

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

*На правах рукопису*

**СУХАЦЬКИЙ ЮРІЙ ВІКТОРОВИЧ**

УДК 620.193.16:621.928.5

**ГІДРОДИНАМІЧНИЙ КАВІТАТОР ДЛЯ  
КАВІТАЦІЙНО-ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ ВОДНИХ  
ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

**Знак З.О.**



Ідентичність всіх примірників дисертації

**ЗАСВІДЧУЮ:**

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.09, д.т.н., проф.

/Гумницький Я.М./

Львів – 2017

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1	
ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	14
1.1. Процеси розділення дисперсних систем.....	15
1.2. Процеси гомогенізування водних гетерогенних середовищ.....	24
1.3. Кавітація як метод інтенсифікації різноманітних процесів.....	27
1.4. Кавітаційні теплогенератори.....	30
1.5. Пристрої для генерування кавітаційних полів.....	32
1.6. Комбіновані процеси оброблення водних гетерогенних середовищ....	35
Висновки до розділу.....	37
РОЗДІЛ 2	
ОПИС УСТАНОВОК ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	41
2.1. Лабораторна установка та методики досліджень впливу акустичних випромінювань ультразвукового діапазону на ефективність кавітаційного оброблення води.....	41
2.2. Установка та методики досліджень впливу конструктивних параметрів гідродинамічного струменевого кавітатора на ефективність кавітаційного оброблення води та процес комбінованого кавітаційно- флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ.....	42
2.3. Методика визначення оптимальних параметрів процесу кавітаційного оброблення води.....	46
2.4. Методика порівняльного сонохімічного аналізу розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів.....	47

2.5. Методики дослідження впливу кавітаційного оброблення на процеси генерування сполук окисного характеру.....	48
2.6. Методики визначення седиментаційної стійкості дисперсних частинок.....	50
2.7. Методика визначення вмісту сірки у сірчаній руді та флотоконцентраті.....	52
2.8. Методика комплексонометричного визначення вмісту іонів $Mg^{2+}$ у пульпі лангбейнітової руди.....	53
2.9. Оцінка похибок вимірювання.....	53

## РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КАВІТАЦІЙНИХ ПОЛЯХ .....	57
3.1. Дослідження впливу технологічного та конструктивних параметрів гідродинамічного струменевого кавітатора на ефективність кавітаційного оброблення води.....	58
3.2. Статистичне моделювання процесу кавітаційного оброблення води з використанням методу Брандона.....	65
3.3. Дослідження розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів методом сонохімічного аналізу.....	68
3.3.1. Дослідження розвитку кавітаційних полів, сформованих ультразвуковим магнітострикційним випромінювачем, методом сонохімічного аналізу.....	71
3.3.2. Дослідження розвитку кавітаційних полів, сформованих у гідродинамічному струменовому кавітаторі, методом сонохімічного аналізу.....	76
3.4. Дослідження впливу повітря, введеного у воду, на розвиток кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації твердих дисперсних	

частинок.....	87
3.5. Дослідження процесів генерування газів внаслідок кавітаційного оброблення води.....	91
3.6. Дослідження процесу утворення сполук окисного характеру під час кавітації.....	95
3.7. Дослідження електрокінетичних характеристик дисперсних частинок кальцію гідроксиду, оброблених у гідродинамічному струменевому кавітаторі.....	105
Висновки до розділу.....	107

## РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КАВІТАЦІЙНО-ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ ВОДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ.....	109
4.1. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного розділення пульпи під час збагачення сірчаної руди.....	110
4.2. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії, що утворюється при очищенні відхідних газів печей прожарювання пасти метатитанової кислоти від SO <sub>2</sub> .....	113
4.3. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного відділення тонких шламових частинок.....	115
4.3.1. Дослідження процесів розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку в суміщеному кавітаційно-флотаційному апараті...	116
4.3.2. Дослідження процесу флотації нерозчинного залишку з Домбровського кар'єру у суміщеному кавітаційно-флотаційному апараті..	119
4.3.3. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії каоліну.....	121
4.4. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного розділення рідких відходів легкої промисловості.....	126

Висновки до розділу.....	133
--------------------------	-----

## РОЗДІЛ 5

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ КАВІТАЦІЙНО-ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ ВОДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ .....	135
5.1. Гідродинамічний струменевий кавітатор.....	135
5.2. Технологічний процес кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди.....	138
5.3. Технологічний процес кавітаційно-флотаційного розділення суспензії, що утворюється під час регенерації відпрацьованого поглинального розчину у виробництві пігментного титану(IV) оксиду.....	141
5.4. Технологічні процеси розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку у суміщеному кавітаційно-флотаційному апараті...	143
5.5. Техніко-економічний аналіз запропонованого процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди.....	145
Висновки до розділу.....	147
ВИСНОВКИ.....	148
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	150
ДОДАТКИ.....	189

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У чисельних технологічних процесах утворюються водні гетерогенні середовища, що містять тверді частинки різного ступеня дисперсності. Розділення таких систем, що охоплює як збільшення ступеня перероблення твердофазної сировини, зокрема рудної, так і фізичне відділення фаз залишається доволі складним технологічним завданням. Воно зумовлює значні енерговитрати на здійснення процесу, а також необхідність застосування громіздкого обладнання (ємностей з мішалками, флотаторів, відстійників тощо), що призводить до низьких інтенсивності та швидкості процесів. Недостатній ступінь розділення водних гетерогенних середовищ спричиняє не тільки втрату цінних компонентів сировини, але й забруднення довкілля.

Зазначені й інші недоліки типових процесів зумовлюють актуальність й важливість виконання досліджень, спрямованих на розроблення ефективного обладнання для реалізації економічно обґрунтованого процесу розділення водних гетерогенних середовищ.

Виконані аналіз джерел інформації та пошукові дослідження дають підстави вважати, що значний практичний інтерес становить комбінація методів, що ґрунтується на цілеспрямованій зміні фізико-хімічних властивостей складових водних гетерогенних систем (як дисперсійного середовища, так і дисперсної фази) під впливом концентрованих енергетичних впливів кавітаційних полів та використанні генерованих кавітаційних бульбашок для ефективного флотаційного відділення дисперсної фази.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку кафедри хімії і технології неорганічних речовин Національного університету “Львівська політехніка” “Дослідження процесів комплексного перероблення сірчаної та калійної сировини, відходів кольорових і рідкісних металів з розробленням екологічно чистих, ресурсощадних технологій мінеральних добрив, солей, спеціальних

видів сірки, металів та їх сполук, металевих порошоків та інших продуктів”, яку виконували відповідно до тематик науково-дослідних робіт “Технології очищення висококонцентрованих органічних стічних вод” (номер державної реєстрації 0114U001698), в яких дисертант був виконавцем окремих етапів.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягала у розробленні обладнання для реалізації гнучкого, ефективного та енергоощадного процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ від дисперсних частинок.

Для досягнення зазначеної мети необхідно було вирішити такі завдання:

– обґрунтувати вибір та оптимізувати конструкцію гідродинамічного струменевого кавітатора (ГДСК);

– дослідити закономірності формування та структуру кавітаційних полів у генераторах різних типів (ультразвуковому магнітострикційному та гідродинамічному струменевому);

– дослідити вплив повітря (об’ємна витрата повітря –  $(1,5...9) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ), введеного у водне середовище, на інтенсивність розвитку кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації дисперсних частинок;

– дослідити електрокінетичні характеристики частинок дисперсної фази, оброблених у кавітаційних полях;

– здійснити апробацію визначених оптимальних умов процесу кавітаційно-флотаційного розділення на водних гетерогенних середовищах, що містили дисперсні частинки;

– розробити технологічну схему процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ від дисперсних частинок під час збагачення сірчаної руди;

– виконати матеріальні, енергетичні та узагальнені техніко-економічні розрахунки розробленого процесу.

*Об’єкт дослідження* – процес кавітаційно-флотаційного розділення

водних гетерогенних середовищ.

*Предмет дослідження* – основні фізико-хімічні закономірності процесів, що відбуваються під час кавітаційного оброблення водного середовища (генерування кавітаційних бульбашок; формування флотаційного шару), їх вплив на електрокінетичні характеристики дисперсної фази та ефективність розділення водних гетерогенних середовищ.

*Методи дослідження.* Ефективність дії ГДСК оцінювали за двома величинами, визначеними калориметрично: тепловою енергією, що виділяється внаслідок кавітації, та тепловим (енергетичним) коефіцієнтом корисної дії. Аналіз багатofакторної залежності величини теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, від технологічного (тиск на вході у кавітатор) та конструктивних (діаметр сопла, кут атаки струменів) параметрів для різної кількості сопел здійснювали на основі енергетичних поверхонь, побудованих у середовищі автоматизованого проектування MathCad. Оптимізацію конструкції кавітатора виконували на основі аналізу графічної інтерпретації 4-факторної мультиплікативної статистичної моделі, яка пов'язує величину теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, з технологічним (тиск на вході у кавітатор) та конструктивними (діаметр сопла, кількість сопел, кут атаки струменів) параметрами. Для побудови моделі використовували метод послідовного виключення впливу незалежних змінних – метод Брандона. Адекватність отриманого рівняння регресії перевіряли за критерієм Фішера, точність оцінювали за величинами коефіцієнта детермінації та середньої відносної похибки апроксимації. Поширення області кавітації, а також формування області флотації у суміщеному кавітаційно-флотаційному апараті (СКФА) визначали лазерним скануванням, а також на підставі кінограм та фотознімків. Порівняння розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів (ультразвуковому та гідродинамічному) та визначення дисперсності утворених бульбашок виконували на основі сонохімічного аналізу. Графічне представлення отриманих результатів (осцилограми звукового сигналу, спектри



частот та інтенсивностей) здійснювали за допомогою програми для запису та редагування звукових файлів Adobe Audition 1.5. Для вимірювання потенціометричних величин водного середовища використовували: рН – рН-метр типу 150 М з комбінованим електродом ЭСКЛ-08М 1; окисно-відновного потенціалу (ОВП) – іономір універсальний ЭВ-74 з системою електродів (вимірювальним – платиновим ЭВП-1, електродом порівняння – хлорсрібним ЭВЛ-1 М). Об'єм газів, що виділились внаслідок кавітації, визначали методом еквівалентного витіснення рідини (води) і приводили до нормальних умов. Вміст кисню, що виділився внаслідок сонолізу, і розчинився у воді за ізотермічних або адіабатичних умов, вимірювали киснеміром EZODO 7031. Пошук оптимальних технологічних параметрів процесу кавітаційного насичення деоксигенованої води киснем здійснювали за схемою повнофакторного експерименту (ПФЕ). Для перевірки однорідності дисперсій застосовували критерій Кохрена. Значущість коефіцієнтів отриманого рівняння регресії перевіряли за величиною довірчого інтервалу, визначеного з врахуванням табличного значення t-критерію Стьюдента. Масову концентрацію розчинених у воді сполук окисного характеру визначали методом йодометричного титрування за Вінклером відповідно до МВВ 081/12-0008-01 і перераховували на вміст розчиненого у воді кисню, вміст гідрогену пероксиду – перманганатометрично. Седиментаційну стійкість дисперсних частинок (кальцію гідроксиду, кальцію оксалату, нерозчинного залишку калійних руд та каоліну) оцінювали нефелометрично. Вплив кавітаційного оброблення на величину електрокінетичного потенціалу дисперсних частинок кальцію гідроксиду вивчали методом зонального електрофорезу. Вміст сірки у сірчаній руді та флотоконцентраті визначали сульфідним методом, ступінь розділення рідких відходів шкіряних виробництв – на підставі даних стандартного об'ємного аналізу визначення величини хімічного споживання кисню (ХСК), вихід флотоконцентрату – гравіметрично.

**Наукова новизна одержаних результатів.** До найважливіших результатів

дисертаційної роботи, що мають наукову новизну, належать такі:

- вперше запропоновано і обґрунтовано застосування кавітаційно-флотаційного процесу для розділення водних гетерогенних середовищ;

- вперше визначено закономірності та кількісні залежності величини енергії, зокрема теплової, що виділяється внаслідок кавітації, від технологічного (тиск на вході у кавітатор) та конструктивних (діаметр сопла, кількість сопел, кут атаки струменів) параметрів ГДСК;

- набула подальшого розвитку теорія формування кавітаційних полів, збуджених різними способами;

- встановлено закономірності та отримано характеристики параметрів сформованих кавітаційних полів (резонансної частоти коливань бульбашок, їх розмірів) залежно від параметрів роботи ультразвукового випромінювача і ГДСК;

- встановлено закономірності та отримано кількісні характеристики процесу генерування газів, які спричиняють флотацію дисперсних частинок, внаслідок кавітаційного оброблення водного середовища.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у розробленні конструкції СКФА, яка дає змогу цілеспрямовано регулювати інтенсивність розвитку кавітаційних явищ зміною технологічного (тиску на вході у кавітатор) та конструктивних (розміру кавітувальних елементів, їх кількості та просторового розміщення) параметрів ГДСК і впливати на ефективність флотаційного вилучення дисперсних частинок зміною структури флотаційного шару (його висоти, газонаповненості, дисперсності бульбашок тощо). СКФА також може бути використаний для інтенсифікації процесу розчинення важкорозчинних мінералів калійних руд (зокрема, лангбейніту), у теплоенергетиці. Розроблено гнучкий, ефективний та енергоощадний процес кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ, зокрема видалення дисперсних частинок. Встановлено кількісні закономірності процесу кавітаційно-флотаційного розділення під час: збагачення сірчаної руди; регенерації поглинального розчину і седиментації гіпсу при очищенні газів від

SO<sub>2</sub>; розчинення калійної руди; відділення дисперсних частинок каоліну із його водної суспензії; очищення рідких відходів шкіряних виробництв від натрію оксалату. Ці закономірності можуть бути використані під час очищення газових викидів на підприємстві ПАТ “Сумихімпром”, а також для інтенсифікації процесу розчинення важкорозчинних мінералів калійних руд та відділення нерозчинного залишку від рідкої фази на ЗАТ “Карпатнафтохім”. Виконані узагальнені матеріально-енергетичні та техніко-економічні розрахунки свідчать про високу ефективність, керованість та економічну доцільність запропонованого процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ.

Теоретичні та технологічні положення, закономірності, математичні моделі, схеми процесів, наведені у дисертаційній роботі, використані у навчальному процесі під час викладання дисциплін “Процеси та апарати хімічних виробництв”, “Застосування якісно нових процесів у хімічній технології неорганічних речовин”. Висока ефективність процесу розділення водних гетерогенних середовищ із застосуванням ГДСК підтверджена результатами випробувань у Корпорації “Енергоресурс-Інвест” (м. Львів).

**Особистий внесок здобувача** полягає у самостійному виконанні критичного аналізу джерел інформації, виборі та апробації методик контролю перебігу процесів та аналізів, розробленні та апробації конструкцій гідродинамічних кавітаторів та методик досліджень кавітаційних явищ, побудові математичних моделей та їх статистичному оцінюванні, обробленні одержаних результатів, виконанні експериментальних досліджень у лабораторних та напівпромислових умовах. Формулювання теми, мети, постановка завдань дисертації, обговорення результатів досліджень, їх інтерпретація, узагальнення, формулювання висновків та написання статей здійснювалось разом із науковим керівником, д.т.н., проф. Знаком З.О. Внесок співавторів публікацій полягає в обговоренні результатів досліджень та їх узагальненні.

Особистий внесок здобувача в наукові роботи:

- підбір і критичний аналіз джерел інформації, виконання попередніх

пошукових експериментів [1-7, 10];

- результати дослідження енергетичної ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора за різних параметрів кавітувальних елементів [8, 9, 11-14, 21, 22, 28];

- 4-факторна мультиплікативна статистична модель процесу кавітаційного оброблення води [24, 26];

- результати аналізу даних сонохімічних досліджень розвитку кавітаційних полів, сформованих ультразвуковим випромінювачем та у ГДСК [19, 25, 26, 28];

- результати дослідження впливу введення у воду незначних кількостей повітря на розвиток кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації твердих дисперсних частинок [20, 26, 27];

- результати дослідження процесів генерування газової фази та сполук окисного характеру [15-19, 27];

- результати дослідження впливу кавітаційного оброблення суспензії кальцію гідроксиду на електрокінетичні характеристики частинок дисперсної фази [24, 27];

- результати дослідження ефективності розробленого процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ [23, 27].

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційного дослідження доповідали і обговорювали на таких конференціях: XIX Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (Україна, м. Харків, 2011 р.); XIX Міжнародній науково-практичній конференції “КАЗАНТИП-ЭКО-2011. Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения” (Україна, м. Щолкіно, 2011 р.); V Міжнародній конференції студентів, магістрантів і аспірантів “Регіональні екологічні проблеми” (Україна, м. Одеса, 2012 р.); IV, V, VI, VII Всеукраїнських науково-практичних конференціях молодих учених, аспірантів і студентів “Вода в харчовій промисловості” (Україна, м. Одеса, 2013-2016 р.); 71 студентській науково-технічній конференції (Україна, м. Львів, 2013 р.);

XIII, XIV, XV Міжнародних науково-практичних конференціях “Ресурси природних вод Карпатського регіону” (Україна, м. Львів, 2014-2016 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій” (Україна, м. Тернопіль, 2014 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції “Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні” (Україна, м. Львів, 2015 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Хімія та сучасні технології” (Україна, м. Дніпропетровськ, 2015 р.); XIII Всеукраїнській конференції молодих вчених та студентів з актуальних питань сучасної хімії з міжнародною участю (Україна, м. Дніпропетровськ, 2015 р.); V Всеукраїнському з’їзді екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology – 2015) (Україна, м. Вінниця, 2015 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми технології неорганічних речовин та ресурсозбереження” (Україна, м. Дніпропетровськ, 2015 р.); II Міжнародній науковій конференції “Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин (APCTOS2)” (Україна, м. Львів, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції “Сучасні проблеми агроекології” (Україна, м. Миколаїв, 2015 р.); XV конгресі Європейського звукохімічного товариства (Туреччина, м. Стамбул, 2016 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 26 наукових праць, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України (у тому числі 1 стаття у виданні України, яке включене до міжнародної наукометричної бази даних Scopus) та тези 20 доповідей на наукових конференціях; отримано 2 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5-ти розділів, висновків, списку джерел інформації (290 найменувань) та додатків. Повний обсяг дисертації становить 194 сторінки, з яких на основний текст припадає 150 сторінок. Робота містить 49 рисунків і 21 таблицю.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

Наявність різноманітних процесів, як механічних (подрібнення, перемішування), так і масообмінних (розчинення, екстракція, сушіння, абсорбція тощо), під час діяльності підприємств різних галузей промисловості призводить до утворення дисперсних систем, у яких частинки однієї фази (дисперсної) рівномірно розподілені в середовищі іншої (дисперсійному середовищі) [29, 30]. Залежно від розміру частинок дисперсної фази дисперсні системи класифікують на [30]:

- 1) істинні розчини (розмір частинок  $< 10^{-9}$  м – іонні, молекулярно-іонні та молекулярні);
- 2) тонкодисперсні колоїдні системи (розмір частинок  $< 10^{-7}$  м – золі, гелі);
- 3) грубодисперсні зависі (розмір частинок  $> 10^{-7}$  м – суспензії, емульсії, аерозолі).

Обсяги утворення колоїдних систем та зависей з водним дисперсійним середовищем як в Україні, так і в світі, надзвичайно великі. Так, за результатами узагальнення даних державного обліку водокористування в 2012-му році у поверхневі водні об'єкти України підприємствами промисловості, житлово-комунальної галузі, сільського господарства та суб'єктами інших видів діяльності скинуто  $8,081 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> стічних вод (типовий приклад дисперсних систем з рідиннофазним дисперсійним середовищем) [31]. Для порівняння у США, державі з найпотужнішою у світі економічною системою, об'єм стічних вод лише промислового сектору в 2010-му році становив  $135 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> [32].

Як правило, утворення колоїдних систем та зависей є небажаним, оскільки вони можуть негативно впливати на здоров'я людини та порушувати стан рівноваги природних екосистем [33-35]. Загальносвітова тенденція, яка виявляється не тільки в усуненні негативних проявів певних процесів та явищ, але й у використанні їх у тих галузях, де вони можуть бути корисними, може

бути застосована і до дисперсних систем з водним дисперсійним середовищем. Зважаючи на вищесказане, доцільно розглянути як методи розділення таких дисперсних систем, так і методи їх гомогенізування.

### **1.1. Процеси розділення дисперсних систем**

Завислі частинки дисперсної фази певних видів дисперсних систем (стічних вод різноманітних промислових підприємств, шахтних вод, шламів галургійної галузі, вуглезбагачення, нафтоперероблення) зумовлюють каламутність, кольоровість, унеможливають застосування водних середовищ у системах оборотного водопостачання. Тому виникає необхідність відокремлення частинок дисперсної фази від дисперсійного середовища. Всі процеси розділення дисперсних систем базуються на різниці фізико-хімічних властивостей (густина, змочуваності, електропровідності, магнітної сприйнятливості тощо) дисперсної фази та дисперсійного середовища. Переважно для сепарації завислих частинок використовують механічні та фізико-хімічні процеси.

Механічні процеси ґрунтуються на вилученні дисперсних частинок під дією гравітаційної (відстоювання та фільтрування) або відцентрової (центрифугування, сепарація із застосуванням гідроциклонів) сил.

Відстоювання відбувається у горизонтальних, вертикальних та радіальних відстійниках [36-39]. Найчастіше застосовують горизонтальні відстійники. Ефективність очищення від завислих речовин для горизонтальних відстійників з регульовальними перфорованими перегородками коливається від 39 до 49%, відстійників із системою розосередженого поверхневого відбору води – від 62 до 69%, відстійників із тонкошаровими елементами з нахилених перегородок – від 47 до 71% [40].

Процес фільтрування використовують для сепарації дрібнодисперсних частинок, а також після інших процесів для досягнення вищого ступеня

вилучення. Так, у праці [41] для доочищення побутових стічних вод після стадій коагуляції та флотації застосовують фільтри із плаваючим завантаженням – гранулами спіненого полістиролу. Вміст завислих речовин у воді, яка надходить після флокулятора-флотатора, становить  $44,8 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>, після фільтра –  $4,2 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>. Ступінь вилучення завислих речовин – 90,6%.

Залежно від механізму фільтрування розрізняють два основних його типи: фільтрування з утворенням шару осаду на фільтрі (фільтрування на фільтрувальній основі) та фільтрування в глибину шару (фільтрування на гранульованому шарі) [42]. Роль фільтрувальної основи виконують: металеві сітки з розмірами отворів до 100 мкм [43]; льняні, бавовняні тканини, скловолокно, капрон [44]. Як фільтрувальне завантаження використовують зерна кварцового піску, а також його комбінації з антрацитом, пемзою, сланцями, гравій, щебінь, природні мінерали шунгіт і гранат, керамзит, полістирол, поліуретан, гранульоване активоване вугілля та інші матеріали з пористою структурою тощо [45-48]. Швидкість та ефективність фільтрування залежать від розміру гранул завантаження – зростають за зменшення еквівалентного діаметру гранул [49, 50].

Основним недоліком процесу фільтрування є необхідність регенерування матеріалу фільтра та періодичного промивання фільтрувального завантаження.

Центрифуги неперервної або періодичної дії застосовують для відділення дрібнодисперсних завислих речовин, які не можна вилучити реагентними методами, а також цінних компонентів [51-54]. Встановлено, що для освітлення водних гетерогенних середовищ енергетично доцільно застосовувати центрифуги з параметрами, значення яких близькі до критичних [52, 53].

Суттєвою перевагою розділення в полі відцентрової сили є низька вологість отриманих осадів – до 10%.

Для розділення дисперсних систем, які містять дисперсні частинки з густиною близькою до густини води чи більшою, застосовують гідроциклони [55]. Так, ефективність свердловинного розділення емульсії “нафта-вода”



(густина нафти –  $860 \text{ кг/м}^3$ ) у гідроциклоні за витрати  $9,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  та коефіцієнта розподілу нафти 15% становить 94,82% [56].

До фізико-хімічних процесів сепарації дисперсних частинок належать коагуляція, мембранні процеси (мікро-, ультра- і нанофільтрація) та флотація.

Для вилучення колоїдних чи тонкодисперсних частинок з розміром меншим, ніж  $10^{-4} \text{ м}$ , до дисперсних систем додають коагулянти та флокулянти [57]. Як коагулянти використовують середні (сульфати, хлориди), подвійні (хлорсульфати) й основні (гідроксохлориди, гідроксосульфати й гідроксохлорсульфати) солі Алюмінію та Феруму [58-61]. На ефективність розділення дисперсних систем із застосуванням коагулянтів впливають не тільки вид реагенту, але і його доза, умови подачі, гідродинамічні умови формування утворених пластівців, температурний режим та величина рН середовища.

З метою запобігання вторинного забруднення водних середовищ продуктами гідролізу солей Алюмінію та Феруму, зниження їх корозійної активності, зменшення витрати реагентів, а також кількості утворених осадів (у 1,5...2 рази порівняно із використанням коагулянтів), підвищення їх здатності до зневоднення, підвищення ефективності й стабільності очищення середовищ, суттєвого зростання продуктивності й надійності роботи очисних споруд, можливості повторного використання води застосовують флокулянти. Розрізняють неорганічні (активна кремнієва кислота) та органічні (природні – крохмаль, гуарові смоли, карбоксиметилцелюлоза (КМЦ), натрію альгінат, хітин, хітозан; синтетичні – поліакриламід (ПАА), поліациламід, поліетиленоксид, акрилати, метакрилати, поліаміни, полііміни, полівінілпіридини, полімерні четвертинні амонійні солі) флокулянти [62, 63].

Розширення діапазону застосування коагулянтів та флокулянтів, зменшення собівартості процесу очищення досягають за допомогою композиційних реагентів – багатокomпонентних сумішей, до складу яких можуть входити коагулянти, флокулянти та різноманітні добавки [57, 64].

Найперспективнішою групою композиційних реагентів є коагуляційно-флокуляційні композиції. Ефективність композиційних реагентів у процесах очищення побутових та промислових стічних вод є значно вищою, ніж монопродуктів. Так, про синергетичний ефект композиції, що містить катіонний поліелектроліт (67%), 50%-ий рідкий алюмінію гідроксохлорид (32%) та слюду (1%), свідчить зменшення у 5...10 разів витрати композиції для досягнення необхідного ефекту (зменшення мутності) порівняно із 50%-им рідким алюмінію гідроксохлоридом [65].

Новим напрямом у процесах розділення дисперсних систем є використання біофлокулянтів [66-69]. Так, застосування біофлокулянту, синтезованого консорціумом двох видів бактерій, що належать до сімей *Oceanobacillus* і *Hallobacillus*, для очищення стічних вод пивоварень та стічних вод підприємств молочної промисловості дало змогу знизити ХСК на 99,7 і 99,9%, а також зменшити мутність на 93,9 і 88,3% відповідно [66].

Для суттєвого зменшення потреби у високовартісних коагулянтах, і, відповідно, зниження собівартості процесу розділення водних гетерогенних середовищ застосовують різновид процесу коагуляції – електрокоагуляцію. Ефективність електрокоагуляції залежить від таких факторів: величини рН, дози й типу коагулянту, густини струму електролізу, прикладеної напруги, типу електродів (алюміній, сталь, залізо), їх розміру (площі електродів) і кількості, розташування в розчині електроліту, складу середовищ [70-75]. Істотними перевагами електрокоагуляції порівняно із хімічною коагуляцією є зменшення кількості осадів та тривалості оброблення водних гетерогенних середовищ.

Перевагою процесу коагуляції є можливість розділення дисперсних систем з високим вмістом дисперсної фази, однак його застосування спричиняє зростання ступеня мінералізації дисперсійного середовища. Крім того, певні види коагулянтів та флокулянтів є недоступними для застосування через їх високу вартість та активність лише за певних умов, що визначаються величиною рН середовища.

До ресурсозберігаючих процесів належать мембранні, які дають змогу не тільки розділити дисперсні системи, але й забезпечити стабільний склад фільтрату на виході незалежно від зміни початкового складу систем і мінімізувати забір природних вод за рахунок повторного використання очищених стічних вод у замкнених системах водопостачання [76, 77].

Найбільш поширеними є баромембранні процеси, які залежно від робочого тиску поділяють на [78]: мікрофільтрацію ( $\Delta P = 10^4 \dots 0,2 \cdot 10^6$  Па), ультрафільтрацію ( $\Delta P = 0,1 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^6$  Па), нанофільтрацію ( $\Delta P = 0,5 \cdot 10^6 \dots 3,5 \cdot 10^6$  Па).

Процес мікрофільтрації застосовують для стерилізації та освітлення всіх видів напоїв та лікарських препаратів у харчовій та фармацевтичній галузях промисловості, отримання ультрачистої води для промисловості напівпровідників [79]. Так, для стабілізації та стерилізації нефільтрованого пива процес мікрофільтрації здійснювали у тангенційно-поточному режимі. Це давало змогу знизити величину концентраційної поляризації. За сталої величини рН, що дорівнювала 4,38, вдалось цілком вилучити клітини дріжджів та великі білкові сполуки і зменшити величину мутності на 99,4% [80]. Розміри пор мікрофільтрувальних мембран –  $(0,02 \dots 4) \cdot 10^{-6}$  м [78].

Ультрафільтрацію використовують у процесах очищення природних та стічних вод, зокрема від гумінових речовин, під час виробництва овочевих та фруктових соків, молока та молочних продуктів, для розділення масляних емульсій, концентрування дисперсних систем [81-84]. Розмір пор ультрафільтрувальних (УФ) мембран –  $(0,02 \dots 0,2) \cdot 10^{-6}$  м [78].

УФ-мембрани виготовляють як з неорганічних, так і з органічних матеріалів. Серед неорганічних матеріалів перевагу надають кераміці та металокераміці. Асортимент органічних полімерних матеріалів значно ширший, ніж неорганічних. Найпоширенішими є мембрани на основі целюлози, целюлози ацетату, поліестерсульфону, поліаміду, полісульфонаміду,

полістирену, поліпропілену, поліакрилонітрилу, полівініліденфториду, поліетилену [85].

Нанofільтрація – процес розділення дисперсних систем, зокрема вилучення мінеральних та органічних дисперсних частинок, що зумовлюють кольоровість води, а також пестицидів. Розмір пор нанofільтрувальних мембран –  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  м [78]. Успішний приклад реалізації процесу нанofільтрації для оброблення озерних вод у країнах Скандинавії продемонструвала фірма “Goodtech” (Норвегія) [86].

До переваг процесів мембранного розділення належать: забезпечення стабільності процесу незалежно від змін фізико-хімічного складу водних гетерогенних середовищ; відсутність необхідності використання високо-вартісних хімічних реагентів; низькі енергетичні витрати, оскільки не відбуваються фазові перетворення; довговічність полімерних та корозійностійких матеріалів мембран; компактність установок; надійність експлуатації та можливість повної автоматизації процесів.

Недоліками процесів мембранного розділення є необхідність забезпечення селективності мембран тільки щодо певних компонентів та певного діапазону робочих параметрів, зокрема величини рН середовища, а також пошуку шляхів ефективної регенерації мембран.

Флотація – процес очищення водних гетерогенних середовищ від гідрофобних частинок [87]: жирів, нафтопродуктів, смол, латексів, поверхнево-активних речовин, полімерів тощо. Ефективність флотації визначають розмір, кількість, стабільність бульбашок повітря та рівномірність їх розподілу в об’ємі середовища [88-90]. Так, використання енергоощадних GEM-систем, у яких генеруються бульбашки з розміром  $(15 \dots 40) \cdot 10^{-6}$  м внаслідок здійснення флотації в полі дії відцентрових сил, дало змогу вилучити із водних гетерогенних середовищ (дисперсних систем, що утворюються під час перероблення морепродуктів, стічних вод пралень, підприємств харчової галузі промисловості) понад 99% завислих речовин та 99,5% емульгованих, зменшити

величину ХСК на 80%. Суттєвою перевагою ГЕМ-систем є інтенсивне перемішування реакційного середовища, яке містить бульбашки повітря, дисперсні частинки, коагулянти та флокулянти. Істотний недолік – отримання шламу з вмістом твердої фази близько 20% мас., що збільшує ймовірність виходу з ладу обладнання, зокрема насосів. Тому шлам розбавляють водою для подальшого оброблення [91].

Залежно від способу насичення водних середовищ бульбашками повітря певних розмірів розрізняють такі види флотації [92]:

- 1) флотація з механічним диспергуванням повітря (імпелерна, безнапірна, пневматична, струменева, з подаванням повітря через пористі матеріали);
- 2) флотація з виділенням бульбашок із перенасичених за повітрям розчинів (вакуумна, напірна);
- 3) електрофлотація.

Для збагачення вугільних шламів [93] та освітлення стічних вод з високим вмістом завислих речовин (понад 2 кг/м<sup>3</sup>) застосовують імпелерну флотацію, ефективність якої можна регулювати швидкістю обертання імпелера. Однак слід враховувати, що за високих швидкостей існує небезпека руйнування утворених аерофлокул, що впливає на стабільність процесу очищення [94].

У випадку наявності у водних середовищах домішок, агресивних щодо рухомих частин механізмів, використовують пневматичні флотаційні апарати. Пневматична флотація вигідно відрізняється від інших видів флотації можливістю подачі будь-яких кількостей повітря і порівняно невеликими витратами електроенергії. Однак недостатнє диспергування повітря призводить до коалесценції бульбашок, що, в свою чергу, зменшує ефективність розділення та підвищує витрати реагентів. Такий недолік усунули в пневматичній флотаційній машині типу “реактор-сепаратор”, у якій реалізували принцип просторового розподілу характерних зон, у кожній із яких забезпечували оптимальні для перебігу певних субпроцесів гідродинамічні умови. Так, у реакторі-сепараторі виділили зони диспергування повітря в аераторі,

прилипання частинок до бульбашок повітря у реакторі, спливання утворених флотокомплексів та їх відділення у сепараторі [95].

Особливий інтерес з енергетичної точки зору викликають струменеві флотаційні апарати, у яких для генерування бульбашок використовується кінетична енергія струменя рідини, що падає. Це спричиняє утворення газорідинної системи з розвинутою міжфазною поверхнею та сильною турбулізацією середовища. Впровадженню струменевих флотаційних установок перешкоджають недостатнє вивчення гідродинаміки фаз, що взаємодіють, впливу кількості інжектowanego газу, дисперсного складу газової фази на ефективність процесу флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ [96].

Найпростішою в плані конструктивної реалізації є флотація з подачею повітря через пористі матеріали. Відсутність насосів та імпелерів значно зменшує енерговитрати на здійснення процесу. Ефективність флотаційного розділення залежить від величини отворів матеріалу, витрати повітря, тривалості процесу, рівня води у флотаторі. Недоліками такого процесу є висока ймовірність забивання пор, руйнування пористого матеріалу (наприклад, кераміки) та труднощі, пов'язані з вибором пористих матеріалів, які б забезпечували певний відносно стабільний у часі розмір бульбашок повітря [97].

Найкраще флотуються дисперсні частинки з розміром  $(0,1...0,4) \cdot 10^{-3}$  м. Дисперсні системи з дрібнішими частинками розділяються гірше, а частинки з розміром меншим, ніж  $5 \cdot 10^{-6}$  м, навіть утруднюють процес флотації більших частинок, призводячи до зменшення площі прилипання бульбашок повітря [92].

Негативний вплив частинок мікронних розмірів зменшують, використовуючи специфічні реагенти – коагулянти і флокулянти [98-100]. Великі частинки з розміром  $(1...3) \cdot 10^{-3}$  м під час флотації відриваються від бульбашок і не флотуються. Тому для флотації великих частинок з розмірами  $(0,5...5) \cdot 10^{-3}$  м розроблені процеси пінної флотації, які передбачають подачу

пульпи на шар піни, що здатний утримувати тільки гідрофобізовані частинки [101, 102].

Напірна флотація має дуже широкий діапазон застосування, оскільки дає змогу досягати необхідного ступеня вилучення завислих дисперсних частинок регулюванням ступеня перенасичення рідини повітрям. Так, використання напірної флотації для розділення суспензії каоліну з розміром частинок близько  $0,9 \cdot 10^{-6}$  м за витрати повітря  $6,7 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с спричиняє зменшення мутності на 99%. Частинки каоліну попередньо укрупнюються з використанням алюмінію сульфату як коагулянта та високомолекулярного неіоногенного поліакриламідну марки 920SH (витрата –  $1,25 \cdot 10^{-3}$  кг/кг каоліну) як флокулянта [103]. Крім того, початкова концентрація дисперсних частинок у водних гетерогенних середовищах, які подають на розділення, може перевищувати 5 кг/м<sup>3</sup> [97]. Середній розмір бульбашок –  $0,4 \cdot 10^{-6}$  м [104]. З підвищенням кратності рециркуляції води ступінь вилучення дисперсних частинок в установках напірної флотації зростає [105].

Установки напірної флотації характеризуються простотою конструкції та обслуговування, займають незначні площі і не потребують великих капіталовкладень. Недоліками напірної флотації є необхідність спорудження герметичних апаратів, нестабільність роботи флотаторів у випадках різких відхилень продуктивності від номінальної величини, можливість вторинного забруднення атмосфери шкідливими леткими речовинами [106, 107].

З метою зменшення тривалості процесу флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ застосовують електрофлотацію. Суть електрофлотації полягає у винесенні дисперсних частинок на поверхню рідини за допомогою бульбашок газів, що утворюються під час електролізу водних середовищ. Під час електролізу води на катоді виділяється водень, а на аноді – кисень. Основну роль у процесі флотації дисперсних частинок відіграють бульбашки, що виділяються на катоді. Атомарний Оксиген, який виділяється на аноді, окиснює

органічні речовини і, відповідно, призводить до зниження величин ХСК і БСК водних середовищ [108, 109].

Катод виготовляють з нержавіючої сталі, нікелю, титану. Як матеріали для анодів використовують графіт, плюмбуму(IV) оксид та платину [110, 111]. Часто флотатори обладнані розчинними електродами – залізними або алюмінієвими. Утворення феруму(III) та алюмінію гідроксидів, типових коагулянтів, інтенсифікує процес електрофлотаційного розділення водних гетерогенних середовищ [112-116].

Перевага електрофлотації, порівняно з іншими видами флотації, полягає у генеруванні бульбашок з дисперсністю від  $10^{-5}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$  м, поверхня яких володіє значним запасом вільної енергії і створює сприятливий гідродинамічний режим у зоні флотації, що підвищує ефективність розділення [117].

До переваг процесів флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ належать їх безперервність, невеликі капітальні та експлуатаційні витрати, селективність вилучення дисперсних частинок. Однак, створення оптимальних умов для перебігу флотації потребує введення певних реагентів – колекторів, піноутворювачів та модифікаторів (активаторів або депресорів, регуляторів рН середовища, флокулянтів). Вони зумовлюють вторинне забруднення водних середовищ [118].

## **1.2. Процеси гомогенізування водних гетерогенних середовищ**

Інколи компоненти водних гетерогенних середовищ необхідно не розділяти, а, навпаки, досягнути їх інтенсивніших змішування та фізико-хімічної взаємодії, тобто гомогенізування, для отримання середовищ з новими властивостями. Процес гомогенізування особливо важливий для енергетичної (отримання альтернативних видів палива з відходів), хімічної, харчової, переробної, фармацевтичної галузей промисловості тощо.

У праці [119] виділяють такі види гомогенізування:



- 1) механічне перемішування з високими значеннями градієнта зсуву;
- 2) ультразвукове;
- 3) протікання дисперсної системи через дуже вузький отвір або канал за високого тиску (більше  $0,5 \cdot 10^6$  Па).

Для механічного перемішування та подрібнення застосовують мішалки різноманітної конструкції (лопатеві, пропелерні, турбінні), колоїдні млини, роторно-динамічні агрегати, різальні пристрої (блендери) з частотою обертання лез від 100 до 800 об./с [119, 120-125].

Як правило, механічні гомогенізатори не забезпечують необхідний для формування стабільних дисперсних систем ступінь подрібнення. Тому для отримання частинок з розмірами від  $2 \cdot 10^{-6}$  до  $10^{-5}$  м застосовують ультразвукові та поршневі гомогенізатори [126].

Робота ультразвукових (УЗ) та гомогенізаторів високого тиску ґрунтується на принципі дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), реалізація якого активує кавітаційні механізми. Вони уможливають створення високо-амплітудних енергетичних імпульсів з тривалістю кілька наносекунд і дають змогу концентрувати енергію таких імпульсів у дискретних локальних зонах малих розмірів [127-130].

У сучасних УЗ-гомогенізаторах використовують п'єзоелектричні титанові випромінювачі, що генерують коливання з резонансною частотою  $(15 \dots 25) \cdot 10^3$  Гц. Номінальна потужність УЗ-гомогенізаторів коливається від 10 до 375 Вт [119, 131, 132]. Оброблення водних гетерогенних середовищ в УЗ-гомогенізаторах дає змогу значно скоротити тривалість процесу гомогенізування, а також впливати на їх реологічні властивості [133, 134]. Основний недолік УЗ-гомогенізаторів – можливість оброблення лише невеликих об'ємів водних середовищ.

Гомогенізатори високого тиску забезпечують тонке подрібнення частинок дисперсної фази до розмірів близько  $10^{-6}$  м. Подрібнені частинки виходять під час нагнітання з високою швидкістю (150...300 м/с) через плоский і вузький

(діаметр –  $10^{-4}$  м) канал. Він може бути гладеньким або хвилеподібним з постійним або змінним перерізом. Для подолання опору під час проходження через вузький канал середовище подають за високого тиску –  $(0,5...30) \cdot 10^6$  Па [135-143].

У працях [144, 145] досліджено вплив кавітаційного оброблення на процеси диспергування і гомогенізування суспензії бентоніту. Встановлено, що на ефективність вищезазначених процесів впливають такі фактори: тиск рециркуляції суспензії, тривалість гомогенізування та співвідношення фаз “рідина – тверде”. Запропонована тричастотна кавітаційна установка для гомогенізування суспензії бентоніту, що складається з: відцентрового насоса марки НЦ-Г 1,6/100 КТЗ (тиск –  $10^6$  Па; витрата –  $8,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с; потужність приводу –  $2,5 \cdot 10^3$  Вт), гідродинамічного апарата (витрата <  $1,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с; ширина зазору конічної секції апарату –  $3,5 \cdot 10^{-3}$  м; тривалість оброблення – 1800 с; частота гідродинамічної кавітації – 450...650 Гц), імпульсного ротора (витрата –  $8,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с; розміри отворів статора і ротора –  $(3,5 \times 10,5) \cdot 10^{-3}$  м; тривалість оброблення – 1800 с; частота гідродинамічної кавітації – 2000...3500 Гц) та гідроакустичного випромінювача (витрата –  $1,4 \cdot 10^{-4}...4,2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с; ширина кільцевої частини січення випромінювача на виході –  $(0,9...1,2) \cdot 10^{-3}$  м; частота гідроакустичної кавітації –  $10^4...1,2 \cdot 10^4$  Гц). На першій стадії (у гідродинамічному апараті) частинки диспергуються до розмірів  $(4...5) \cdot 10^{-5}$  м, на другій (в імпульсному роторі) –  $(1...1,5) \cdot 10^{-5}$  м, на третій (у гідроакустичному випромінювачі) –  $(0,04...1) \cdot 10^{-5}$  м [144]. Використання тонко диспергованого бентоніту в процесах депротейнізації вин скорочує його витрату в 6 разів – до 0,5 кг/м<sup>3</sup> [145].

На сьогодні у всіх розвинутих країнах світу спостерігається справжній бум у галузі енергозбереження, використання відновлювальних джерел енергії, ставки робляться на нові ефективні процеси, що дають змогу економити природні ресурси. Важливими напрямками діяльності у цих сферах є створення енергоефективних процесів, що підвищують ефективність та глибину

перероблення нафтопродуктів, виробництво та використання альтернативних і штучних композитних рідких палив (ШКРП). Як основу для виробництва ШКРП можна застосовувати водомазутні емульсії (ВМЕ), водовугільні суспензії (ВВС), складовими компонентами яких є мазути, буре вугілля, вугільний пил, кубові залишки, шлами, торф, біологічно активний мул очисних споруд, відходи птахофабрик та тваринницьких підприємств [146-155].

Новий підхід до отримання ШКРП полягає у використанні гідродинамічного кавітаційного впливу на середовище, що обробляють. Процес отримання ШКРП передбачає дві стадії: першу – стадію попереднього перемішування і другу – безпосереднього кавітаційного оброблення у спеціальних пристроях (УЗ-генераторах, газорідних кавітаційно-вихрових, пластинчасто-стержневих і гідродинамічних апаратах) [146, 148, 155].

Далі доцільно розглянути механізм виникнення кавітації, її види, області застосування, супутні ефекти, зокрема виділення теплоти, проаналізувати основні типи генераторів кавітації.

### **1.3. Кавітація як метод інтенсифікації різноманітних процесів**

Під “кавітацією” розуміють явище утворення в рідині порожнин (кавітаційних бульбашок, каверн), заповнених пароповітряною сумішшю, їх пульсацій, росту та сплескування (колапсу) з дуже великими густинами енергії – від  $10^3$  до  $10^{21}$  Вт/м<sup>3</sup> [156-158]. Кавітація виникає внаслідок локального зниження тиску до значень тиску насиченої водяної пари за відповідних умов. Залежно від причин, що спричиняють таке зниження, виділяють 4 види кавітації [157, 159]:

1) різка зміна швидкості рідини, що визначається геометрією системи, – гідродинамічна;

2) вплив звукових хвиль (як правило, УЗ-діапазону –  $1,6 \cdot 10^4 \dots 10^8$  Гц) – акустична;

3) фотони світла дуже великої інтенсивності (лазери), здатні розривати рідину, – оптична;

4) використання пучків елементарних частинок (протонів, нейтронів, електронів тощо) для розривання рідини – кавітація, зумовлена частинками.

Високі енерговитрати для отримання елементарних частинок і надання їм необхідної кінетичної енергії, складність конструктивного виконання та експлуатації апаратів для здійснення вищезазначених функцій обмежують сферу застосування двох останніх видів кавітації лабораторними дослідженнями.

Гідродинамічна та акустична кавітація є важливими методами інтенсифікації гідромеханічних, теплових та масообмінних процесів: очищення та знезараження стічних вод [160-168]; дезінфекції та підвищення терміну зберігання продуктів у харчовій промисловості [169-172]; очищення дифузійних соків та підвищення реакційної здатності суспензій вапняного молока у цукровій промисловості [173, 174]; оброблення поверхонь деталей [175, 176]; зниження в'язкості нафти [177] та епоксидних смол [178]; розрихлювання пластів вугілля [179]; отримання наноматеріалів – кластерів наноалмазів з розмірами кристалів  $(1...3) \cdot 10^{-8}$  м [180, 181], наночастинок кальциту [182], нових матеріалів графенового і фулеренового типів із водної суспензії карбоновмісних матеріалів [183] тощо.

Для покращення механічних властивостей цементних бетонів їх модифікують дисперсними додатками – карбоновими нанотрубками, які обробляють у гідродинамічному кавітаторі [184]. Відомі процеси кавітаційної активації реагентів чи продуктів галургійних виробництв [185, 186].

Деструкція біомаси (відходи, зелена маса, активний мул очисних споруд) у кавітаційних полях інтенсифікує процес виробництва біогазу [187-190]. При цьому значно скорочується період бродіння біомаси, що дає змогу будувати біореактори менших розмірів, стабілізуються біологічні процеси, що проявляється у відсутності піноутворення у верхній частині біореактора і, як

наслідок, підвищується ефективність використання корисного об'єму апарата [187].

Інтенсифікація вищезазначених процесів пояснюється виникненням низки ефектів, що супроводжують кавітацію. Серед них виділяють первинні, наявні під час будь-якого кавітаційного процесу, та вторинні, що потребують створення додаткових умов у зоні кавітації і пов'язані з конкретною групою процесів (механічні, гідромеханічні, теплові, масообмінні тощо) [191].

До первинних ефектів належать [191-193]: підвищення тиску (до  $10^8 \dots 10^9$  Па) і температури (до  $10^3 \dots 10^4$  К) в зоні сплескування кавітаційних бульбашок, що й призводить до нагрівання всього об'єму рідини за рахунок теплопровідності; випромінювання акустичних імпульсів різних інтенсивності та частоти; дегазація рідини; люмінесценція; виникнення ударних хвиль та кумулятивних мікроструминок з діаметром близько  $(3 \dots 7) \cdot 10^{-5}$  м, швидкістю течії 100...500 м/с; активне оновлення поверхонь з утворенням ювенільних реакційноздатних ділянок; фазові переходи на поверхні кавітаційних бульбашок; зміна електричного потенціалу, електропровідності, коефіцієнтів тепло- та масовіддачі, величини рН середовища.

Група вторинних ефектів, що є закономірними наслідками дії первинних, нараховує багато елементів [163, 193, 194]: диспергування твердих речовин; очищення поверхні матеріалу; емульгування та гомогенізування; руйнування великих молекул і розрив полімерних ланцюгів; ініціювання та прискорення хімічних і звукохімічних реакцій внаслідок сонолізу води (утворення високоактивних частинок – збуджених молекул води, радикалів Гідрогену, Оксигену, гідроксильних та пероксидних, іонів Гідрогену та гідроксильних, молекул водню, кисню, гідрогену пероксиду тощо); очищення та знезараження рідин.

Найважливішими характеристиками кавітаційних явищ є енергетичні, зокрема: витрати енергії на створення, розвиток кавітаційної зони та її підтримання на певному рівні, питомі енерговитрати, величина теплової

енергії, що виділяється внаслідок кавітації. Тому розглянемо особливості генерування теплоти у кавітаторах та вплив їх конструктивних параметрів на енергетичні характеристики кавітаційного оброблення.

#### **1.4. Кавітаційні теплогенератори**

Питанням генерування теплоти у кавітаторах присвячені праці Федоткіна, Нефедова, Гелера, Оболенського, Некоза та інших дослідників [195-208].

Сили та процеси, що беруть участь у процесах утворення та виділення теплової енергії, можуть мати найрізноманітнішу фізичну природу [195-200, 207]: сили пружності, тиску, інерції, гравітації; реактивні сили; гідравлічні пульсації; взаємодія торсійних полів; теплові процеси гістерезису фазових переходів; набуття додаткової кінетичної енергії під час закипання рідини в реактивних соплах у надзвуковому режимі; спінова поляризація електричного струму; еманация (перетворення) речовини у теплову енергію; електростатичні поля високої напруги; резонансні явища; механоактивація води; вплив на кластерну структуру води бабстонів – стабільних нанобульбашок повітря,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  та інших газів, здатних утворювати з водою стійкі колоїдні системи тощо.

Активному вирішенню проблеми економії енергоресурсів сприяє впровадження апаратів, у яких реалізується об'ємне нагрівання рідини, – кавітаційних вихрових теплогенераторів (КВТГ) [201-206, 209-211]. Конструктивно КВТГ виконують у вигляді вихрової трубки, подібної до трубки Ранка-Хільша. У ній рідина внаслідок тангенційного підведення закручується, і вихровий потік спрямовується у циліндричну частину трубки, на виході з якої обертання потоку гальмується. Відбувається дисипація енергії – втрата кінетичної енергії потоку рідини, що супроводжується його нагріванням. Свій внесок у дисипативні процеси робить і гідродинамічна кавітація у пристрої гальмування [206]. Коефіцієнт корисної дії вихрових теплогенераторів досягає

95%. КВТГ можна використовувати для аерації стічних вод та окиснення органічних речовин [209].

Великі витрати енергії на формування кавітаційних полів у генераторах обумовлюють пошук шляхів заміни традиційних електродвигунів, приводів гідродинамічних насосів, більш економними конструкціями. Запропоновані теплогенератори-гідротарани [199, 200] з дросельними пристроями та електрогідрокавітаційні генератори [212], дія яких ґрунтується на ефекті Юткіна, що значно знижують енерговитрати на створення та розвиток області кавітації та дають змогу відмовитись від використання електродвигунів насосів.

Відомо, що енергетичні характеристики кавітаційного оброблення зазвичай визначаються елементами конструкції генераторів кавітації: формою кавітувальних елементів, їх розмірами (діаметром), кількістю, просторовим розташуванням тощо.

Так, на підставі аналізу витратно-перепадних характеристик дросельних пристроїв встановлено, що у насадку Вентурі для розвитку і підтримання зони кавітації використовується до 43% енергії потоку, у конфузотно-дифузотному насадку вкороченого типу – до 62%, а у повнорозмірному конфузотно-дифузотному насадку – від 62 до 89% [213].

У праці [214] наведено дані щодо синтезу метилових естерів жирних кислот у кавітаційних полях. Як кавітувальний елемент використовували сопло з камерою розширення на базі сопла Вентурі з діаметром вузької частини  $2 \cdot 10^{-3}$  м. Швидкість руху рідини у вузькій частині сопла становила 50 м/с, тиск на вході в сопло –  $1,8 \cdot 10^6$  Па. Така конструкція дала змогу досягнути 95%-го виходу продукту реакції за величини питомих енерговитрат  $3,9 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>.

Пастеризацію розсолів на виробництвах молочних продуктів здійснюють у КВТГ за температури  $358 \pm 5$  К. Визначені оптимальні конструктивні параметри КВТГ, які забезпечують необхідні різницю температур на вході і виході кавітатора ( $\Delta t = 2,3$  К) за кратності циркуляції, що дорівнює 1, та теплопродуктивність за рідкою фазою ( $Q = 11,7 \cdot 10^3$  Дж/с): ширина вхідного

сопла –  $63 \cdot 10^{-3}$  м, діаметр діафрагми –  $40 \cdot 10^{-3}$  м, довжина циліндричної вихрової труби – 0,8 м [215].

Результати випробувань кавітаційних теплогенераторів переконливо свідчать, що ефективність та інтенсивність процесу кавітаційного оброблення можна регулювати зміною конструктивних параметрів самих теплогенераторів.

### **1.5. Пристрої для генерування кавітаційних полів**

Спосіб підведення енергії до реакційної системи та рівномірність її розподілу за січенням апарату визначають ефективність впливу кавітаційних механізмів на інтенсивність процесів тепло- і масообміну і, відповідно, на швидкість хімічної взаємодії. З огляду на вищезазначене, виділяють 4 типи кавітаційних пристроїв: акустичні (ультразвукові), гідроакустичні (низько- та високочастотні вібраційні, пульсаційні), розрядно-імпульсні та гідродинамічні.

У більшості існуючого ультразвукового кавітаційного обладнання промислового та медичного призначення успішно використовується ультразвук інтенсивністю до  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> (для деяких процесів, зокрема знезараження водних середовищ, –  $2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> і більше). Ввести в рідину УЗ-коливання такої інтенсивності вдається з мінімальними втратами енергії завдяки узгодженню роботи випромінювача з рідинним навантаженням [216].

В УЗ-діапазоні найпоширенішими є п'єзоелектричні (перетворювачі Ланжевена) та магнітострикційні випромінювачі УЗ-коливань [217, 218]. У промисловості налагоджене серійне виробництво ультразвукових ванн (УЗВ), ультразвукових прохідних хімічних апаратів (УПХА) та ультразвукових ванн високого тиску (УЗВТ) [193]. Внаслідок співпадіння розмірів УЗВ з частотою випромінювання перетворювача Ланжевена в об'ємі рідини формується стояча хвиля деформації. При цьому у вузлах і пучностях хвилі деформації концентруються кавітаційні бульбашки визначеного діапазону розмірів. Поблизу поверхні випромінювача знаходиться область з максимальною



інтенсивністю кавітації [218]. Як наслідок, більша частина кавітаційних бульбашок сплескуються на робочій поверхні випромінювача, спричиняючи її інтенсивну ерозію. Іншими недоліками УЗ-апаратів є низький ступінь регулювання інтенсивності кавітаційного оброблення та малий діапазон зміни часу перебування зародків кавітації у зоні розрідження, що ускладнює досягнення бульбашкою необхідних для сплескування розмірів [219]. Крім того, УЗ-генератори кавітації призначені для оброблення малих об'ємів тільки таких рідин, що володіють незначними поглинальними, щодо ультразвуку, властивостями. Наявні недоліки кавітаційного оброблення за допомогою УЗ-пристроїв намагаються усунути, здійснюючи процес у проточному режимі [220].

Діапазон робочих частот гідроакустичних пристроїв знаходиться в широких межах – від десятків Гц (низькочастотні) до декількох кГц (високочастотні) [221-229]. Для створення вібронавантаження застосовують кавітаційні генератори низько- або високочастотних коливань тиску рідини (пластинчасті, мембранні, стрижневі коливальні системи), в яких реалізується режим періодично-зривної кавітації. Це дає змогу перетворити стаціонарний потік рідини в дискретно-імпульсний [221, 222]. Сумісна дія кавітаційного та магнітного полів призводить до послаблення та руйнування водневих зв'язків між молекулами води з утворенням мономолекул, яким притаманна підвищена хімічна активність [225-229]. Недоліки гідроакустичних пристроїв аналогічні до недоліків акустичних.

Робота розрядно-імпульсних кавітаційних пристроїв ґрунтується на виникненні під час пропускання крізь об'єм рідини спеціально сформованого імпульсного електричного розряду надвисоких гідравлічних тисків, здатних виконувати корисну механічну роботу. Таке явище дістало назву електрогідравлічного ефекту (ефекту Юткіна). ККД розрядно-імпульсних пристроїв, що відображає ефективність перетворення електричної енергії в механічну, залежить як від параметрів електричної схеми, так і від

властивостей об'єктів, що піддаються електрогідравлічному обробленню, середовища, в якому воно відбувається, та характеру оброблення. З підвищенням напруги ККД збільшується, а тривалість електрогідравлічного удару зменшується. При цьому реалізується “жорсткий режим” оброблення (так званий бризантний електрогідравлічний удар) [230].

Основними недоліками розрядно-імпульсних генераторів кавітації є низька ефективність використання енергії, складність обладнання, небезпечність під час експлуатації.

У гідродинамічних апаратах кавітація виникає внаслідок обтікання високошвидкісним потоком кавітаторів різноманітних конструкцій або зіткнення зустрічно спрямованих струменів рідини. Кавітувальні елементи можуть бути як статичними (конуси, циліндри, насадки, пластини, сопла Вентурі, Лаваля) [140, 191, 231-234], так і динамічними (з обертовими елементами – лопатями, дисками, – що працюють в режимі насоса або турбіни; роторні) [235-239].

З метою підвищення ефективності оброблення водних гетерогенних середовищ запропоновано використовувати каскад кавітаторів. Каскад кавітаторів є гідродинамічним реактором, що містить проточну камеру діаметром  $d$ , у якій на поздовжньо розміщеному стрижні встановлені кавітатори на певній відстані один від одного. Максимальний розмір у поперечному перерізі першого за ходом потоку кавітатора становить не менше  $0,9d$ , а розмір кожного наступного зменшується на  $0,1d$ , причому кількість кавітаторів – не менше 3-ох, а відстань між ними – не менше  $(7...10)d$ . За першим кавітатором виникає бульбашкова кавітація, що забезпечує найбільш інтенсивну ударно-хвильову дію на потік. За наступними кавітаторами генеруються приєднані каверни, внаслідок змикання яких формується кавітаційне поле, де компоненти потоку піддаються додатковому обробленню [234].

Для високоефективного оброблення (ККД = 93...97%) великих обсягів водних середовищ застосовують гідродинамічні струменеві кавітатори, у яких

нагрівання рідини здійснюється за рахунок перетворення енергії співударних струменів рідини в теплову [240]. Характерною ознакою струменевих апаратів є виникнення явища “суперкавітації” [219], тобто створення каверн значних розмірів, які зникають за межами робочих органів, що запобігає кавітаційному руйнуванню останніх.

### **1.6. Комбіновані процеси оброблення водних гетерогенних середовищ**

Найефективнішими процесами оброблення водних гетерогенних середовищ, що поєднують переваги хімічних процесів та процесів розділення (фізико-хімічних), є комбіновані. Вони передбачають використання комплексних енергетичних впливів (кавітація, електромагнітні поля, ІЧ- та УФ-випромінювання тощо) для інтенсифікації процесів тепло- і масообміну, що збільшує швидкість хімічної взаємодії і, відповідно, скорочує загальну тривалість процесу.

На завершальних стадіях очищення стічних вод від розчинених нафтопродуктів та інших органічних речовин ефективним є оброблення УФ-випромінюванням. Як високоінтенсивні джерела УФ-випромінювання інколи застосовують УФ-лазери, що володіють селективним деструктивним впливом на певну органічну речовину чи групу речовин, спектр адсорбції яких відповідає спектру емісії лазера. Недоліком УФ-лазерів, що обмежує їх застосування, є випромінювання в дуже вузькій смузі спектра, а для забезпечення деструкції органічних сполук різних класів необхідне УФ-випромінювання в широкому діапазоні 100...300 нм. Тому для фотолітичного розкладання органічних сполук запропоновано обробляти стічні води імпульсним джерелом УФ-випромінювання суцільного спектра з тривалістю імпульсу від  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$  с і густиною імпульсної потужності випромінювання на одиницю поверхні води, що обробляють, не менше, ніж  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> за наявності

окиснювача – озону. Поширені імпульсні лампи типів ИФП-800, ИФП-5000, ИФП-20000, що заповнені інертним газом [241].

Вилучення завислих дисперсних частинок з імітату стічних вод молокопереробних підприємств здійснювали за допомогою комбінованого процесу, що передбачав поєднання дії магнітного поля з електрокоагуляцією. Концентрація сухого молока в імітаті становила  $0,7 \text{ кг/м}^3$ . Як електроди використовували залізні пластини, джерела магнітного поля – три постійні магніти NdFeB, SmCo, AlNiCo з індукцією 0,55; 0,16 і 0,08 Тл відповідно. За 1800 с оброблення постійним струмом величиною 0,5 А досягали ступеня вилучення завислих дисперсних частинок 92,3% [242].

Для очищення водних середовищ з високим вмістом органічних сполук застосовують передові процеси окиснення АОР (Advanced Oxidation Processes), до яких належать реакція Фентона, УФ-фотоліз, УЗ-оброблення, озонування, електрохімічне окиснення тощо [243-245]. Під час таких процесів внаслідок перебігу хімічних, фотохімічних та фотокаталітичних реакцій генеруються вільні радикали (найчастіше, гідроксильний), які й беруть участь у процесах окиснення. Використання комбінації напірної флотації з процесом Фентона для очищення стічних вод м'ясопереробних підприємств дало змогу знизити ХСК на 97,6% і БСК<sub>5</sub> на 95,7% [243].

Величезні перспективи демонструють комбінації кавітаційного оброблення з іншими процесами. Так, під час УЗ-оброблення рослинної сировини (ягід журавлини) тривалістю 300 с вміст сухих речовин у готовому екстракті зростав на 19%, а загальна тривалість процесу екстракції скорочувалась на 900 с. Підвищення ефективності екстракції обумовлене збільшенням коефіцієнта масопереносу та величини міжфазної поверхні [246]. Сумісна дія УЗ-випромінювань та хлорування підвищує ефективність знезараження стічних вод у 2,5 рази, порівняно із застосуванням лише хлорування. При цьому концентрація хлору є дуже низькою –  $10^{-3} \text{ кг/м}^3$  [247].

У працях [248-250] наведено результати випробувань установок для глибокого очищення стічних вод від нафтопродуктів. Запропонована

двостадійна технологічна схема [248], що передбачає попереднє очищення відстояної стічної води в електрокоагуляторі продуктивністю  $5,6 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$  та глибоке очищення в гідродинамічному кавітаторі роторного типу. Концентрація нафтопродуктів у вихідній воді –  $4 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Гранично допустимої концентрації нафтопродуктів у стічних водах ( $\text{ГДК} = 10^{-4} \text{ кг}/\text{м}^3$ ) досягали за кратності кавітаційно-деструкційного оброблення, що дорівнювала 4.

Відомі комбінації процесу флотації з кавітаційним обробленням для очищення стічних вод нафтопереробних підприємств [250] та м'ясокомбінатів [251]. Низький енергетичний потенціал кавітаційного ефекту флотаційних насосів, нестабільність їх роботи та висока ймовірність ерозії конструктивних елементів обумовлюють доцільність застосування флотаційно-кавітаційного процесу лише на стадії доочищення стоків, за низьких залишкових концентрацій нафтопродуктів [250]. Установа для очищення стічних вод м'ясокомбінатів складається з насоса, засувки, всмоктувального та напірного трубопроводів, шести модулів кавітаційного насичення повітрям, що встановлені у флотаційній камері. Витрата рідини через 1 модуль за тиску  $(1,2 \dots 1,7) \cdot 10^6 \text{ Па}$  становить  $(2,8 \dots 4,2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , що забезпечує продуктивність на рівні  $(1,7 \dots 2,5) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ . Ступінь газонасичення може змінюватись від 0,03 до  $1,2 \text{ м}^3 \text{ повітря}/\text{м}^3 \text{ води}$ . Всі вузли кавітаційних модулів виготовлені з нержавіючих матеріалів. Ефективність очищення від забруднювачів становить, %: жирів – 80...90, завислих речовин – 80...90. Величини ХСК та БСК<sub>5</sub> зменшуються на 40...50% [251]. До недоліків установки належать можливість ерозії стінок кавітаційних модулів, складність регулювання ступеня газонасичення води і, відповідно, ефективності очищення.

### **Висновки до розділу**

Вищенаведений критичний аналіз джерел інформації (як наукової, так і патентної), присвячений процесам розділення дисперсних систем, гомогенізування водних гетерогенних середовищ, використанню кавітації як

методу інтенсифікації різноманітних процесів, дає змогу сформулювати загальні висновки, визначити мету і завдання дисертаційної роботи.

1. Колоїдні системи та зависі з водним дисперсійним середовищем, обсяги утворення яких як в Україні, так і в світі надзвичайно великі, можуть негативно впливати на здоров'я людей та порушувати стан рівноваги природних екосистем. Для усунення негативного впливу таких дисперсних систем їх необхідно розділяти, або гомогенізувати з метою подальшого цілеспрямованого корисного застосування у різних галузях промисловості – енергетичній, харчовій, хімічній, переробній, фармацевтичній тощо.

2. Серед процесів розділення дисперсних систем найбільший практичний інтерес викликають флотаційні, оскільки дають змогу регулювати ефективність розділення зміною розміру, кількості, стабільності бульбашок повітря та рівномірності їх розподілу в об'ємі середовища. До переваг флотаційних установок належать безперервність процесу, невеликі капітальні та експлуатаційні витрати, можливість розділення середовищ з дуже широким діапазоном якісного та кількісного складу дисперсних частинок.

3. Найефективніше гомогенізування водних середовищ типу “вода-тверді дисперсні частинки” забезпечують ультразвукові та гомогенізатори високого тиску. Робота таких гомогенізаторів ґрунтується на принципі дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), реалізація якого активує кавітаційні механізми.

4. Для рівномірного високопродуктивного кавітаційного оброблення водних гетерогенних середовищ доцільно застосовувати гідродинамічні кавітатори, ефективність роботи яких визначається конструктивними параметрами кавітувальних елементів. Виникнення явища “суперкавітації” під час формування кавітаційних полів у струменевих кавітаторах унеможливорює ерозію їх робочих органів та сприяє максимальному перетворенню енергії співударних струменів у теплову, що дуже важливо для інтенсифікації різноманітних процесів (механічних, гідромеханічних, теплових, масообмінних тощо).

5. Найефективнішими процесами оброблення водних гетерогенних середовищ, що поєднують переваги хімічних процесів та процесів розділення (фізико-хімічних), є комбіновані. Вони передбачають використання комплексних енергетичних впливів (кавітація, електромагнітні поля, ІЧ- та УФ-випромінювання тощо) для інтенсифікації процесів тепло- і масообміну, що збільшує швидкість хімічної взаємодії і, відповідно, скорочує загальну тривалість процесу.

6. В аспекті реалізації сучасних концепцій синтезу різних процесів запропоновані комбінації кавітації з іншими методами. Створення комбінованого кавітаційно-флотаційного процесу відкриє шлях до збільшення універсальності кавітаційного оброблення: дасть змогу інтенсифікувати флотаційні явища за рахунок використання кавітаційних бульбашок для флотації дисперсних частинок або підвищити ступінь гомогенізування водних середовищ типу “вода-тверді частинки”.

7. Численні дослідження, виконані дотепер, обмежувались вивченням впливу лише одного з конструктивних параметрів (форми, діаметра тощо) кавітувальних елементів на енергетичні характеристики кавітаційного оброблення, тоді як важливе значення мають комплексні дослідження сумісного впливу зазначених параметрів. Крім того, наведені у наявних джерелах інформації дані щодо енергоефективності різних конструкцій генераторів кавітації є суперечливими. Тому важливим є отримання поліфункційної залежності виділеної внаслідок кавітації теплової енергії від технологічних та конструктивних параметрів кавітувальних елементів, що дасть змогу цілеспрямовано регулювати ефективність кавітаційного оброблення водних гетерогенних середовищ.

Висновки, сформульовані вище, стали основою для визначення мети дисертації, яка полягає у розробленні обладнання для реалізації гнучкого, ефективного та енергоощадного процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ від дисперсних частинок.

Для досягнення мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити вплив конструктивних параметрів гідродинамічного кавітатора (кількість кавітувальних елементів, їх розмір, просторове розміщення) на ефективність внесення енергії в систему (величину коефіцієнта корисної дії);
- виявити закономірності формування кавітаційних полів у генераторах різних типів (УЗ-випромінювачі та струменевому кавітаторі);
- встановити характеристики флотаційного шару (його щільність, дисперсність та кількість флотаційних бульбашок, рівномірність їх розподілу за січенням апарату тощо);
- оптимізувати конструкцію струменевого кавітатора на основі статистичної моделі, що пов'язує величину теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, з технологічним (тиск на вході у кавітатор) та конструктивними (діаметр сопла, кількість сопел, кут атаки струменів) параметрами кавітувальних елементів;
- дослідити вплив введення незначних кількостей повітря у систему на ефективність розвитку кавітаційних та флотаційних явищ;
- дослідити процеси кавітаційно-флотаційного розділення дисперсних систем;
- на підставі отриманих експериментальних даних та розроблених технологічних схем процесів кавітаційно-флотаційного розділення виконати техніко-економічні розрахунки запропонованих процесів та оцінити їх ефективність.

Нижче викладено та інтерпретовано основні результати, отримані під час виконання дисертаційної роботи.



## РОЗДІЛ 2

### ОПИС УСТАНОВОК ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Лабораторна установка та методики досліджень впливу акустичних випромінювань ультразвукового діапазону на ефективність кавітаційного оброблення води

Лабораторна установка для досліджень впливу акустичних випромінювань ультразвукового (УЗ) діапазону на інтенсивність розвитку кавітаційних полів у воді, особливості формування флотаційного шару та його параметри (висоту, газонаповненість та дисперсність бульбашок) наведена на рис. 2.1.

Установка складалась із реакційної ємності 1, у яку були занурені електроди 2, ультразвукового випромінювача магнітострикційного типу “Ultrasonic Disintegrator” UD-20 3 з блоком живлення 4, ультратермостата UTU-4 7 із виносною термостатною ванною 8, в якій розташовували реакційну ємність 1, магнітної мішалки MM-5 9, а також системи пристроїв для сонохімічного аналізу (гідрофона 10, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) 11 і портативного комп’ютера 12). Для вимірювання потенціометричних величин використовували: рН середовища – рН-метр типу 150 М 5 з комбінованим електродом ЭСКЛ-08М 1; окисно-відновного потенціалу води – іономір універсальний ЭВ-74 6 з системою електродів (вимірювальним – платиновим ЭВП-1, електродом порівняння – хлорсрібним ЭВЛ-1 М). Температуру в реакційній ємності фіксували термометром (на рис. 2.1 не показано).

Величина потужності генератора УЗ-коливань становила 8,0...12,5 Вт, частота випромінювання –  $2,2 \cdot 10^4$  Гц. Параметри вихідної води: температура –  $291 \pm 5$  К, рН  $7,51 \pm 0,05$ , ОВП  $(225 \pm 10) \cdot 10^{-3}$  В. Упродовж УЗ-оброблення води контролювали зміну її температури, рН та ОВП. Розвиток кавітаційних полів фіксували фотографічно за допомогою фотоапарата “Nikon” Coolpix L25.

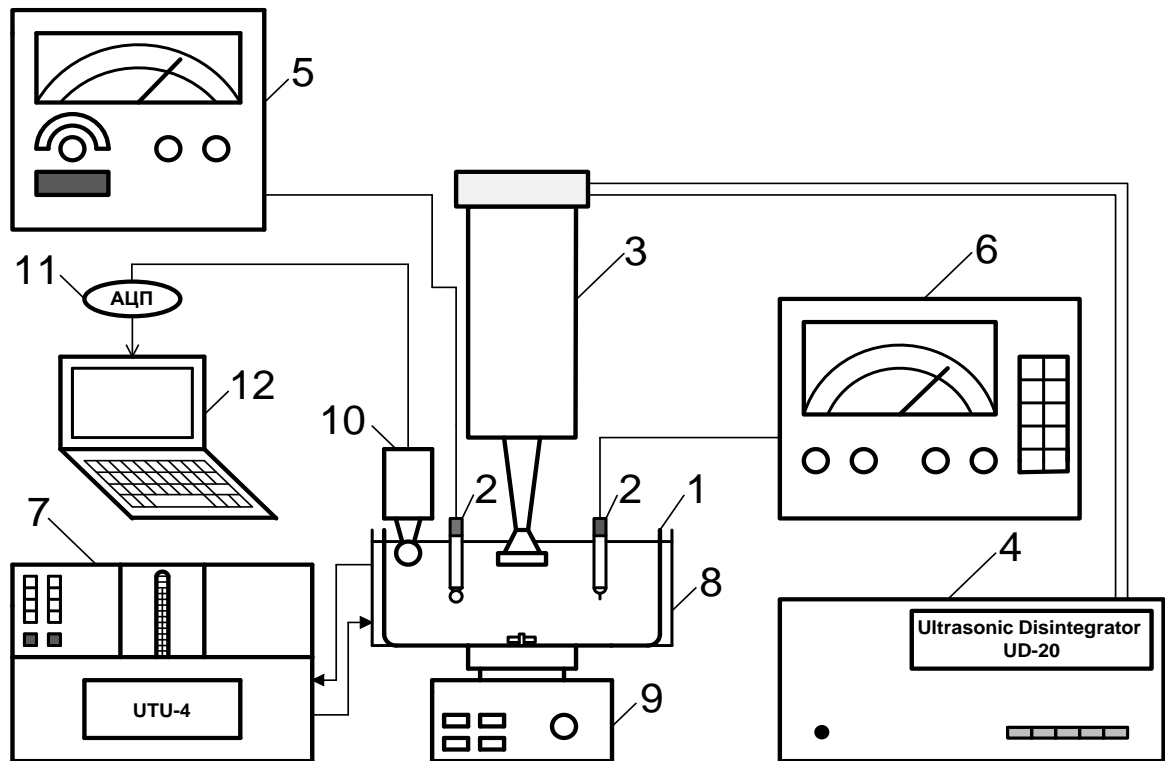


Рис. 2.1. Схема лабораторної установки для дослідження впливу акустичних випромінювань УЗ-діапазону на ефективність кавітаційного оброблення води: 1 – реакційна ємність; 2 – електроди; 3 – ультразвуковий магнітострикційний випромінювач; 4 – блок живлення; 5 – рН-метр; 6 – іонімір; 7 – термостат; 8 – термостатна ванна; 9 – магнітна мішалка; 10 – гідрофон; 11 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 12 – портативний комп'ютер.

## **2.2. Установка та методики досліджень впливу конструктивних параметрів гідродинамічного струменевого кавітатора на ефективність кавітаційного оброблення води та процес комбінованого кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ**

Схема установки, на якій виконували дослідження впливу гідродинамічної кавітації та супутнього їй ефекту флотації дисперсних частинок на

ефективність оброблення дисперсійного середовища (води) та процес розділення водних гетерогенних середовищ, наведена на рис. 2.2.

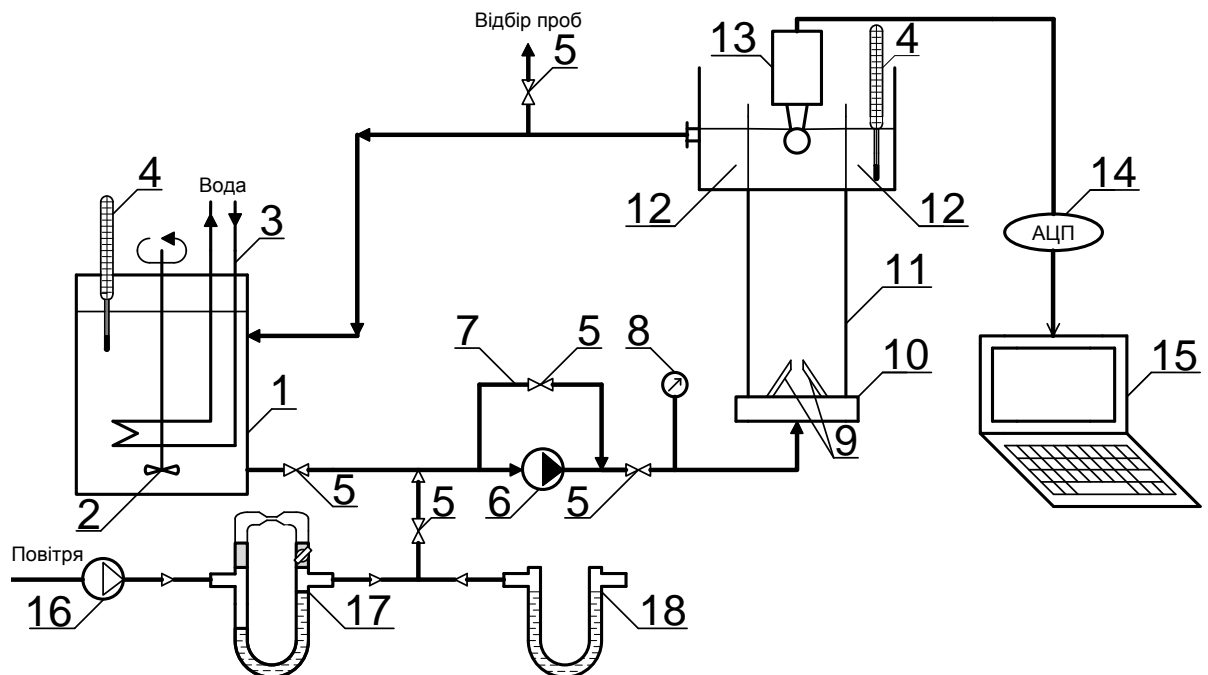


Рис. 2.2. Схема суміщеної кавітаційно-флотаційної установки гідродинамічного типу: 1 – циркуляційна ємність; 2 – мішалка; 3 – контур охолодження; 4 – контрольний термометр; 5 – кран; 6 – насос; 7 – байпас; 8 – манометр; 9 – кавітувальний елемент (сопло); 10 – колектор; 11 – скляний корпус; 12 – збірник піни; 13 – гідрофон; 14 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 15 – портативний комп'ютер; 16 – компресор; 17 – засіб вимірювання (реометр); 18 – диференційний манометр.

Основний елемент установки – суміщений кавітаційно-флотаційний апарат (СКФА), у нижній частині якого (гідродинамічному струменевому кавітаторі – ГДСК) формується область кавітації. Корпус 11 кавітатора (діаметр корпуса – 0,11 м; висота – 1 м) закріплений у вузлі герметизації 10, який одночасно є і колектором, що забезпечує розподіл рідинного потоку між кавітувальними елементами, і виконаний із прозорого оргскла, що давало змогу проводити візуальні спостереження за розвитком області бульбашкової кавітації впродовж

процесу кавітаційного оброблення та здійснювати фото- і відеозйомку. Кавітатор оснащений системою профільованих сопел 9 змінного діаметра, розміщених під певним кутом. Кут між соплами (у межах 30...180 град.) регулювали за допомогою шарнірного механізму. Віддаль між соплами –  $(10 \pm 5) \cdot 10^{-3}$  м.

Дисперсні частинки флотувались у верхній частині СКФА. Флотоконцентрат (піна) збиравсь у збірниках піни 12, звідки його відбирали для аналізу. Водне середовище (воду, суспензії, рідкі відходи) подавали з циркуляційної ємності 1 відцентровим насосом 6 у ГДСК. Тиск на вході у кавітатор (у межах  $0,3 \cdot 10^6 \dots 0,6 \cdot 10^6$  Па) регулювали байпасом 7. Ізотермічність процесу забезпечували за допомогою контура охолодження 3, яким була оснащена циркуляційна ємність 1. Під час виконання досліджень в умовах, що наближались до адіабатичних, контур охолодження 3 не задіювали, а основні елементи установки (СКФА, циркуляційну ємність та комунікації) термоізолювали теплоізоляційною фольгою.

Об'єм водного середовища, що циркулювало в контурі, становив  $0,025 \dots 0,14$  м<sup>3</sup>. Зміну температури середовища, рН та ОВП контролювали так, як описано у підрозділі 2.1. Проби середовищ для визначення рН, ОВП, вмісту розчиненого кисню, завислих частинок тощо відбирали через пробовідбірник.

З метою інтенсифікації кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації дисперсних частинок у водне середовище перед кавітатором компресором Sonic Silent Powerful 9908 16 вводили незначні кількості повітря (об'ємна витрата повітря –  $(1,5 \dots 9) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с). Кількість введеного повітря контролювали реометром 17. Для стабілізації гідростатичного тиску стовпа рідини використовували компенсаційний диференційний манометр 18.

Ефективність дії ГДСК з різними кількістю кавітувальних елементів (сопел), їх розміром (діаметром) та просторовим розташуванням, яке

характеризували кутом атаки струменів, оцінювали за величинами, визначеними калориметрично: тепловою енергією ( $E$ , Дж), що виділяється внаслідок кавітації, та тепловим (енергетичним) коефіцієнтом корисної дії ( $KKД$ , %), які обчислювали за формулами:

$$E = cm\Delta T, \quad (2.1)$$

$$KKД = \frac{N_T}{N_H} \cdot 100 = \frac{\frac{E}{\tau}}{N_H} \cdot 100 = \frac{cm\Delta T}{N_H \tau} \cdot 100, \quad (2.2)$$

де  $c$  – теплоємність води, Дж/(кг·К);  $m$  – маса води в циркуляційному контурі, кг;  $\Delta T$  – різниця температур води, К;  $N_T$  – тепла потужність, Вт;  $N_H$  – потужність насоса, Вт;  $\tau$  – тривалість кавітаційного оброблення, с.

Залежність потужності насоса ( $N_H$ ) від тиску на вході у кавітатор ( $P$ ), визначена експериментально, наведена на рис. 2.3.

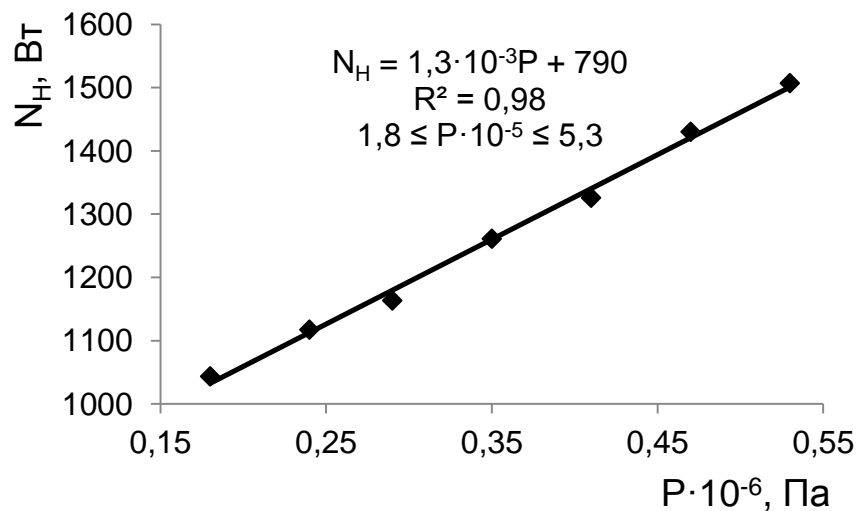


Рис. 2.3. Залежність потужності насоса ( $N_H$ ) від тиску на вході у кавітатор ( $P$ )

Аналіз багатофакторної залежності величини теплової енергії ( $E$ , МДж), що виділяється внаслідок кавітації, від технологічного (тиск на вході у кавітатор –  $P$ , МПа) та конструктивних (діаметр сопла –  $d$ , мм; кут атаки струменів –  $\beta$ , град.) параметрів для різної кількості сопел ( $n$ , од.) здійснювали

на основі енергетичних поверхонь, побудованих у середовищі автоматизованого проектування MathCad.

### 2.3. Методика визначення оптимальних параметрів процесу кавітаційного оброблення води

Оптимізацію конструкції кавітатора здійснювали на основі аналізу графічної інтерпретації 4-факторної статистичної моделі, яка пов'язує величину теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, з технологічним (тиск на вході у кавітатор) та конструктивними (діаметр сопла, кількість сопел, кут атаки струменів) параметрами. Оскільки побудова рівнянь багатofакторної нелінійної регресії за допомогою аналітичних методів у більшості випадків неможлива, тому використано емпіричні методи, які дають адекватні результати. У роботі застосовано метод Брандона – метод послідовного виключення впливу незалежних змінних [252, 253], який дає змогу отримувати мультиплікативні моделі вигляду

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 \prod_{i=1}^N f_i(x_i), \quad (2.3)$$

де  $b_0$  – коефіцієнт моделі;  $f_i(x_i)$  – довільна одномірна функція;  $N$  – кількість вхідних факторів,  $i = \overline{1, N}$ .

Змінна  $x_1$  відповідає тиску на вході у кавітатор,  $x_2$  – діаметру сопла,  $x_3$  – кількості сопел,  $x_4$  – куту атаки струменів. Кроки варіювання параметрів становили для: тиску на вході у кавітатор –  $0,06 \cdot 10^6$  Па; діаметра сопла –  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м; кількості сопел – 1 сопло; кута атаки струменів – 36 град. Области варіювання параметрів для: тиску –  $(0,36 \dots 0,6) \cdot 10^6$  Па; діаметра сопла –  $(1 \dots 2,2) \cdot 10^{-3}$  м; кількості сопел – 3...7; кута атаки струменів – 36...180 град.

Адекватність отриманого рівняння регресії перевіряли за критерієм Фішера [254]. Як критерії точності апроксимації використовували коефіцієнт детермінації та середню відносну похибку апроксимації [255].

## 2.4. Методика порівняльного сонохімічного аналізу розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів

Порівняння розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів (ультразвуковому та гідродинамічному) виконували на основі сонохімічного аналізу. Характеристики звукових сигналів вимірювали за допомогою сферичного гідрофона типу 8105 13, комутованого з ПК 15 через аналогово-цифровий перетворювач 14 (рис. 2.2). Робочий діапазон частот такого гідрофона знаходиться в межах  $0,1 \dots 1,6 \cdot 10^5$  Гц, а чутливість у режимі прийому звуку становить  $-205$  (дБ відн. 1 В)/мкПа. Перевагою сферичного гідрофона є його особлива конструкція, що забезпечує віброізоляцію чутливого елемента [256].

Графічне представлення отриманих результатів (осцилограми звукового сигналу, спектри частот та інтенсивностей) здійснювали за допомогою програми для запису та редагування звукових файлів Adobe Audition 1.5.

Критичний радіус зародка кавітації ( $R_{з.кр}$ , м) сфероподібної форми визначали за формулою Лапласа [257]

$$R_{з.кр} = \frac{2\sigma}{P_{нас} - P_{гидр}}, \quad (2.4)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідини (води), Н/м;  $P_{нас}$  – тиск насиченої водяної пари за умов досліду, Па;  $P_{гидр}$  – гідростатичний тиск стовпа рідини у СКФА, Па.

Розмір флотаційних бульбашок ( $R_{\sigma}$ , м) визначали за формулою Міннерта [258], що зв'язує резонансну частоту з радіусом бульбашки за адіабатичного процесу її пульсацій:

$$R_{\sigma} = \frac{1}{2\pi\omega} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}}, \quad (2.5)$$

де  $\omega$  – резонансна частота, Гц;  $\gamma$  – показник адіабати (для повітря  $\gamma = 1,4$ );  $P_0$  – гідростатичний тиск на поверхні рідини ( $P_0 = 10^5$  Па), Па;  $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>.

Для порівняння амплітуди відносного звукового тиску кавітаційних полів, сформованих у ГДСК, за різної кількості сопел використовували залежність [259]

$$\frac{P_{зв}}{P_{баз}} = 10^{\frac{\Delta A}{20}}, \quad (2.6)$$

де  $P_{зв}$  – амплітудне значення звукового тиску кавітаційного поля, мкПа;  $P_{баз}$  – опорний рівень звукового тиску (відповідає мінімальному рівню чутливості людського вуха для сигналу 1 Гц,  $P_{баз} = 20 \cdot 10^{-6}$  Па);  $\Delta A$  – зміна інтенсивності акустичного сигналу, дБ. В акустиці зміна інтенсивності акустичного сигналу на 10 дБ відповідає зміні амплітуди звукового тиску в 3,16 рази.

## **2.5. Методики дослідження впливу кавітаційного оброблення на процеси генерування сполук окисного характеру**

**Вимірювання об'єму газів, що виділяються внаслідок кавітації, методом еквівалентного витіснення рідини.** Об'єм газів, що виділяються внаслідок кавітації, визначали методом еквівалентного витіснення рідини (води). Суть методу полягає у вимірюванні об'єму рідини, витісненої газом. Об'єм газів, що виділялись, приводили до нормальних умов. Установку (рис. 2.2) під час таких досліджень герметизували.

**Визначення ступеня насичення деоксигенованої води киснем, що виділяється внаслідок кавітації.** Для визначення ступеня насичення води киснем, що виділяється саме внаслідок кавітації, попередньо проводили деоксигенацію води. Для цього кисень, розчинений у вихідній воді і вміст якого



визначали завчасно, зв'язували хімічно, додаючи стехіометричну кількість натрію сульфату. Вміст кисню (у мг/дм<sup>3</sup>), що виділивсь внаслідок сонолізу, і розчинився у воді за ізотермічних або адіабатичних умов вимірювали киснеміром EZODO 7031. Точність вимірювання – 10<sup>-2</sup> мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Ступінь насичення води киснем визначали як співвідношення вмісту розчиненого у воді кисню до максимальної розчинності кисню за відповідних умов (температури води, атмосферного тиску та солемісту (іонної сили)).

**Методика визначення оптимальних параметрів процесу кавітаційного насичення киснем деоксигенованої води.** Пошук оптимальних параметрів процесу кавітаційного насичення деоксигенованої води киснем здійснювали за схемою повнофакторного експерименту (ПФЕ) [253], що передбачає: вибір базових факторів та функції відгуку, задання областей визначення базових факторів; кодування факторів; складання плану-матриці експерименту; реалізацію плану експерименту; статистичний аналіз рівняння регресії (перевірку однорідності дисперсій; обчислення і перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії; перевірку адекватності регресійної моделі); розкодування змінних та зведення подібних членів.

Базовими факторами під час планування експерименту були:  $x_1$  – кількість введеного у воду повітря ( $C_{\text{пов}}, \% \text{ об.}$ );  $x_2$  – кратність кавітаційного оброблення ( $n$ , рази). Функція відгуку – ступінь кавітаційного насичення деоксигенованої води киснем ( $\theta$ , % від максимально можливого за відповідних умов). Надання кожному базовому факторові ( $x_1, x_2$ ) двох значень (для верхнього рівня – „+1“, нижнього – „-1“) дає змогу отримати 4 можливі комбінації рівнів для 2-ох факторів, тобто план-матрицю 2<sup>2</sup>.

Для перевірки однорідності дисперсій застосовували критерій Кохрена [253]. За величиною довірчого інтервалу ( $\Delta b$ ) здійснювали перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії [253].

**Визначення масової концентрації сполук окисного характеру методом йодометричного титрування за Вінклером.** Масову концентрацію сполук окисного характеру, що утворюються внаслідок кавітації у попередньо деоксигенованій воді, визначали йодометричним методом за Вінклером і перераховували на вміст розчиненого у воді кисню.

**Методика перманганатометричного визначення вмісту гідрогену пероксиду в обробленій у кавітаторі воді.** Вміст гідрогену пероксиду ( $C((1/2)H_2O_2)$ , г/дм<sup>3</sup>) у воді, обробленій УЗ-випромінювачем або у ГДСК, визначали перманганатометрично [260] і розраховували за формулою

$$C((1/2)H_2O_2) = \frac{C_N((1/5)KMnO_4) \cdot V(KMnO_4) \cdot E(H_2O_2)}{V_{np}}, \quad (2.7)$$

де  $C_N((1/5)KMnO_4)$  – нормальна концентрація  $KMnO_4$ , (моль-екв)/дм<sup>3</sup>;  $V(KMnO_4)$  – об'єм розчину  $KMnO_4$ , витрачений на титрування, см<sup>3</sup>;  $V_{np}$  – об'єм відібраної проби води, см<sup>3</sup>;  $E(H_2O_2)$  – еквівалентна маса гідрогену пероксиду, г/(моль-екв) ( $E(H_2O_2) = 17$  г/(моль-екв)).

Чутливість перманганатометрії –  $10^{-6}$ % мас. [260].

## 2.6. Методики визначення седиментаційної стійкості дисперсних частинок

**Визначення седиментаційної стійкості дисперсних частинок методом нефелометрії.** Седиментаційну стійкість дисперсних частинок визначали фотометрично. Суть методу полягає у вимірюванні інтенсивності світлового потоку, розсіяного завислими частинками. Для вимірювань оптичної густини застосовували фотометр фотоелектричний КФК-3 (у режимі нефелометра) за довжини хвилі 340 нм (товщина кювети – 20 мм; середовище порівняння – дистильована вода).

**Визначення седиментаційної стійкості дисперсних частинок кальцію гідроксиду методом зонального електрофорезу.** Визначення електрокінетичного потенціалу ( $\zeta$ -потенціалу) дисперсних частинок кальцію гідроксиду як за введення незначних кількостей повітря у воду, так і без нього, здійснювали на модифікованій установці Кьона (рис. 2.4), що складалась з U-подібної трубки 1, в коліна якої були занурені електроди 2, під'єднані до джерела постійного струму ЛІПС-35 3. Водне гетерогенне середовище (суспензію кальцію гідроксиду) та “бічну рідину” подавали з напірних ємностей 6, 7.

Електрокінетичний потенціал визначали електрофоретичним методом рухомої межі за переміщенням межі між водним гетерогенним середовищем та “бічною рідиною” в зовнішньому електричному полі. Для чіткого визначення межі до суспензії кальцію гідроксиду додавали індикатор – фенолфталеїн. Як “бічну рідину” використовували 0,2 N розчин натрію хлориду (ГОСТ 4233-77 кваліфікації “ХЧ”). На електроди подавали напругу 35 В.

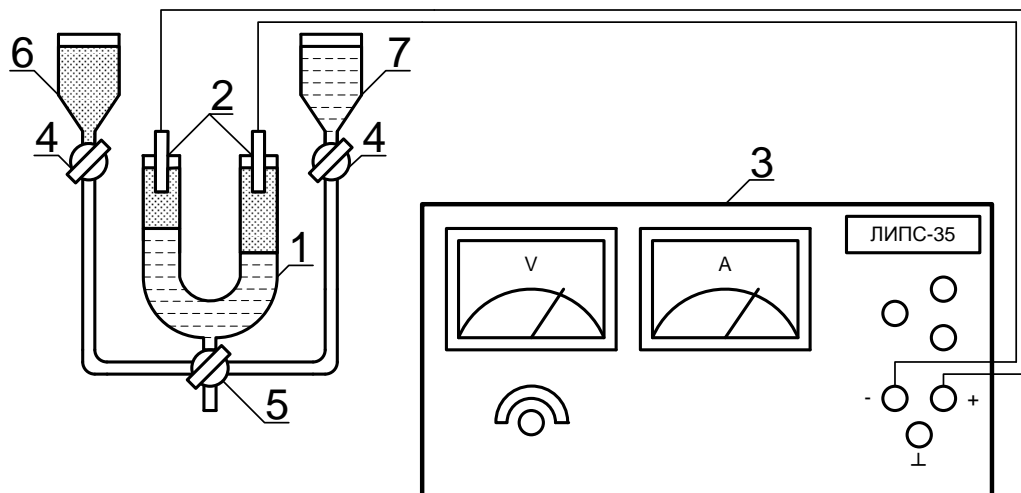


Рис. 2.4. Схема модифікованої установки Кьона для визначення електрокінетичного потенціалу дисперсних частинок кальцію гідроксиду: 1 – U-подібна трубка; 2 – електроди; 3 – джерело постійного струму ЛІПС-35; 4 – одноходові крани; 5 – триходовий кран; 6 – напірна ємність із водним гетерогенним середовищем; 7 – напірна ємність із розчином NaCl.

Положення межі розділу “суспензія  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ –бічна рідина” впродовж дослідів фіксували фотографічно за допомогою фотоапарата “Nikon” Coolpix L25 на фоні шкали; отримані фотозображення обробляли в редакторі “Adobe Photoshop CS 6”.

Значення електрокінетичного потенціалу ( $\zeta$ , мВ) обчислювали за рівнянням Гельмгольца-Смолуховського [57]

$$\zeta = \frac{1000\eta}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{SL}{\tau E}, \quad (2.8)$$

де 1000 – коефіцієнт перерахунку В у мВ;  $\eta$  – в'язкість дисперсійного середовища, Па·с (для води  $\eta = 0,001$  Па·с);  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність дисперсійного середовища (для води  $\varepsilon = 81$ );  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму, Ф/м ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $S$  – переміщення межі, м;  $L$  – відстань між електродами, м;  $\tau$  – тривалість переміщення межі, с;  $E$  – різниця потенціалів, В.

## 2.7. Методика визначення вмісту сірки у сірчаній руді та флотоконцентраті

Вміст сірки у сірчаній руді та флотоконцентраті визначали сульфїтним методом. Суть методу визначення вмісту сірки в твердій фазі полягає в її повному перетворенні внаслідок взаємодії з розчином натрію сульфїту у водорозчинну сполуку – натрію тіосульфат, який кількісно визначали йодометрично.

Вміст сірки ( $C_s$ , %) у руді та флотоконцентраті відповідно розраховували за формулою

$$C_s = \frac{V \cdot N \cdot E}{G \cdot 1000} \cdot 100, \quad (2.9)$$

де  $V$  – об'єм 0,1 N розчину йоду, витраченого на титрування, см<sup>3</sup>;  $N$  – концентрація розчину йоду, (моль-екв)/дм<sup>3</sup>;  $E$  – еквівалентна маса сірки, г/(моль-екв) ( $E = 32$  г/(моль-екв));  $G$  – наважка руди або флотоконцентрату, г.

Коефіцієнт збагачення сірчаної руди ( $\alpha$ ) визначали за формулою

$$\alpha = \frac{C_{S(\phi л)}}{C_{S(p)}}, \quad (2.10)$$

де  $C_{S(\phi л)}, C_{S(p)}$  – вміст сірки у флотоконцентраті та руді відповідно, %.

Вихід флотоконцентрату, який утворювався внаслідок перебігу кавітаційних явищ у СКФА, визначали гравіметрично: флотоконцентрат сушили до постійної маси за температури 373...378 К в сушильній шафі СНОЛ і зважували на електронній вазі “Axis AD-500”.

## **2.8. Методика комплексонометричного визначення вмісту іонів $Mg^{2+}$ у пульпі лангбейнітової руди**

Вміст іонів  $Mg^{2+}$  у пульпі лангбейнітової руди визначали трилонометрично. Проби водного гетерогенного середовища попередньо відфільтровували на вакуум-фільтрі від завислих частинок нерозчинного залишку.

## **2.9. Оцінка похибок вимірювання**

Регресивний аналіз отриманих експериментальних залежностей виконували із застосуванням стандартної програми Microsoft Office Excel 2007.

Адекватність отриманих рівнянь регресії перевіряли за критерієм Фішера [254]

$$F = S_{зал}^2 / S_e^2, \quad (2.11)$$

де  $S_{зал}^2$  – залишкова дисперсія;  $S_e^2$  – дисперсія відтворюваності.

Залишкова дисперсія визначає розсіювання експериментальних даних відносно рівняння регресії, дисперсія відтворюваності – величину випадкової похибки.

Значення  $S_{\text{зал}}^2$  розраховували за формулою

$$S_{\text{зал}}^2 = \left( \sum_{i=1}^N (y_{\text{експ}} - y_{\text{розн}})^2 \right) / (N - (m + 1)), \quad (2.12)$$

де  $y_{\text{експ}}$  – експериментальне значення шуканої величини;  $y_{\text{розн}}$  – значення шуканої величини, розраховане за отриманим рівнянням регресії;  $N - (m + 1) = f_1$  – число степенів свободи, визначається як різниця кількості дослідних точок  $N$  і числа факторів  $m$ , які оцінені за такими точками.

Значення дисперсії відтворюваності знаходили на стадії попереднього аналізу експериментальних даних. Для цього використовували залежність

$$S_{\text{в}}^2 = \left( \sum_{i=1}^N (y_{\text{експ}} - y_{\text{сер.арифм}})^2 \right) / (N - 1), \quad (2.13)$$

де  $y_{\text{сер.арифм}}$  – середнє арифметичне експериментальних значень шуканої величини;  $N - 1 = f_2$  – число степенів свободи.

Розрахункове значення критерію Фішера ( $F$ ), визначене за формулою (2.11), порівнювали з табличним ( $F_T$ ) для вибраного рівня значущості  $\alpha$  і степенів свободи  $f_1$  і  $f_2$ . Якщо  $F < F_T$ , то отримане рівняння регресії адекватно відтворює результати експерименту.

Як критерії точності апроксимації використовували коефіцієнт детермінації та середню відносну похибку апроксимації [255]. Коефіцієнт детермінації розраховували за формулою

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{\text{експ}} - y_{\text{розн}})^2}{\sum_{i=1}^N (y_{\text{експ}} - y_{\text{сер.арифм}})^2}. \quad (2.14)$$

Середню відносну похибку апроксимації ( $\varepsilon_{\text{сер.відн}}, \%$ ) визначали за рівнянням

$$\varepsilon_{\text{сер.відн}} = (1 / N) \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_{\text{експ}} - y_{\text{розн}}}{y_{\text{експ}}} \right| \cdot 100. \quad (2.15)$$

Чим ближче значення коефіцієнта детермінації до 1, а середньої відносної похибки – до 0%, тим точнішою є регресійна модель.

Для перевірки однорідності дисперсій застосовували критерій Кохрена [253]. Критерій Кохрена ( $G$ ) є відношенням максимального значення дисперсії паралельних дослідів ( $S_{\max i}^2$ ) до суми їх дисперсій  $\left(\sum_{i=1}^N S_i^2\right)$

$$G = \frac{S_{\max i}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}. \quad (2.16)$$

Розрахункове значення критерію Кохрена ( $G$ ) порівнювали з табличним ( $G_T$ ) для вибраних величин довірчої ймовірності  $p$ , кількостей дослідів  $k$  і степенів свободи  $\nu$ . Якщо  $G < G_T$ , то дисперсії однорідні.

Коефіцієнти рівняння регресії обчислювали за такими залежностями [253]

$$y_{u.cep} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m y_{uk}, \quad (2.17)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_{u.cep}, \quad i = \overline{0, n}; \quad (2.18)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_{u.cep}, \quad i, j = \overline{0, n}; \quad i \neq j; \quad (2.19)$$

де  $y_{u.cep}$  – середнє арифметичне значень функції відгуку за рядками матриці ( $u$ );  $m$  – кількість паралельних дослідів;  $b_i, b_{ij}$  – коефіцієнти біля закодованих факторів та членів парної взаємодії;  $N$  – кількість можливих комбінацій рівнів для 2-ох базових факторів ( $N = 4$ );  $x_{iu}, x_{iu}x_{ju}$  – знаки („+“ або „-“) у відповідних стовпчиках (факторів або членів парної взаємодії) та рядках плану-матриці експерименту. Попередній вигляд рівняння регресії такий

$$y_{cep} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1; \\ i \neq j}}^n b_{ij} x_i x_j, \quad (2.20)$$

де  $b_0, b_i, b_{ij}$  – коефіцієнти рівняння регресії.

Для перевірки значущості коефіцієнтів рівняння регресії визначали величину довірчого інтервалу ( $\Delta b$ ) [253]

$$\Delta b = \pm t \cdot \sqrt{\frac{S_e^2}{N \cdot m}}, \quad (2.21)$$

де  $t$  – критерій Стюдента. Порівнюючи обчислені коефіцієнти рівняння регресії з довірчим інтервалом, відкидаємо ті з них, які за модулем менші, ніж величина довірчого інтервалу. Як наслідок, залишається рівняння регресії, яке містить лише значущі коефіцієнти.

Після статистичного аналізу рівняння регресії розкодовували змінні та зводили подібні члени. Перехід від кодованих значень змінних до натуральних здійснювали за формулами

$$x_1 = \frac{C_{нов} - C_0}{\Delta x_1}, \quad (2.22)$$

$$x_2 = \frac{n - n_0}{\Delta x_2}, \quad (2.23)$$

де  $C_0, n_0$  – координати центра плану за змінними  $x_1$  та  $x_2$  відповідно;  $C_{нов}$  – кількість введеного у водне середовище повітря, % об.;  $n$  – кратність кавітаційного оброблення, рази;  $\Delta x_1, \Delta x_2$  – інтервали варіювання змінних  $x_1$  та  $x_2$  відповідно.

Установки, призначені для дослідження розвитку кавітаційних полів, забезпечують відтворюваність результатів досліджень. Здійснено статистичний аналіз отриманого масиву експериментальних даних [253-255].



### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КАВІТАЦІЙНИХ ПОЛЯХ

Дослідження фізико-хімічних процесів, якими супроводжується кавітаційне оброблення водних середовищ, здійснювали на прикладі води, оскільки вода – основний компонент (дисперсійне середовище) багатьох водних дисперсних систем (технологічних суспензій, емульсій, тонкодисперсних колоїдних систем, стічних вод тощо).

Як відомо, ефективність використання підведеної до середовища енергії визначається закономірностями розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів, а, отже, – конструктивними параметрами кавітаторів [213-215]. Тому необхідно виконати порівняльний аналіз особливостей розвитку кавітаційних полів у генераторах з принципово різними конструктивними параметрами кавітувальних елементів – ультразвуковому магнітострикційному та гідродинамічному струменевому.

Для визначення оптимальних умов, за яких реалізується режим найефективнішого кавітаційного оброблення води, необхідно встановити залежність енергії, що виділяється внаслідок кавітації, від технологічного (тиск на вході у кавітатор) та конструктивних (діаметр сопла, кількість сопел, кут атаки струменів) параметрів кавітувальних елементів. Відомо, що сумарна кількість цієї енергії є пропорційною тепловій [206]. Для цього необхідно побудувати відповідну математичну модель та проаналізувати її графічну інтерпретацію.

З метою впливу на ефективність вилучення дисперсних частинок слід було визначити параметри сформованого флотаційного шару (дисперсність флотаційних бульбашок, їх кількість, газонаповненість шару та його висоту). Важливими також були пошук можливого шляху інтенсифікації кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації дисперсних частинок, а також з'ясування закономірностей утворення сполук окисного характеру, які можуть відігравати роль реагентів у багатьох процесах, під час кавітації.

### **3.1. Дослідження впливу технологічного та конструктивних параметрів гідродинамічного струменевого кавітатора на ефективність кавітаційного оброблення води**

Важливою ознакою перебігу кавітаційних процесів є виділення великої кількості енергії внаслідок колапсу кавітаційних бульбашок. Крім того, усі види фізико-механічних впливів (ерозія і диспергування твердої фази, ударні хвилі) та фізико-хімічної взаємодії (деструкція, рекомбінація радикалів тощо) у значній мірі трансформуються у теплову енергію [206]. Величину цієї енергії опосередковано можна оцінити калориметрично.

Енергетичні характеристики кавітаційного оброблення зазвичай визначаються елементами конструкції генераторів кавітації: формою кавітувальних елементів [261, 262], їх розмірами (діаметром) та кількістю [263, 264], просторовим розташуванням тощо. Дослідження, виконані дотепер, обмежувались вивченням впливу лише одного з конструктивних параметрів (форми, діаметра тощо) кавітувальних елементів на енергетичні характеристики кавітаційного оброблення, тоді як важливе значення мають комплексні дослідження сумісного впливу зазначених параметрів. Вони дають змогу отримати поліфункційну залежність величини теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, від технологічних та конструктивних параметрів, що, своєю чергою, розширює можливості для цілеспрямованого регулювання ефективності кавітаційного оброблення водних гетерогенних середовищ.

Для визначення конструкції гідродинамічного кавітатора, яка забезпечувала б максимальне трансформування кінетичної енергії струменів рідини у деформаційну та теплову, за адіабатичних умов досліджували вплив тиску на вході у кавітатор, кількості сопел, їх діаметра та кута атаки струменів (кута між осями окремих струменів рідини) на величину теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації. Аналіз багатofакторної залежності величини теплової енергії здійснювали на основі енергетичних поверхонь, побудованих у середовищі автоматизованого проектування MathCad.

Спочатку аналізували вплив тиску на вході у кавітатор та кута атаки струменів на величину теплової енергії за різної кількості сопел ( $d = \text{const} = 1,6$

мм) (рис. 3.1). Потім обирали діаметр сопел, який забезпечував максимальне за умов досліду, зокрема кількості сопел, використання підведеної до води енергії (рис. 3.6).

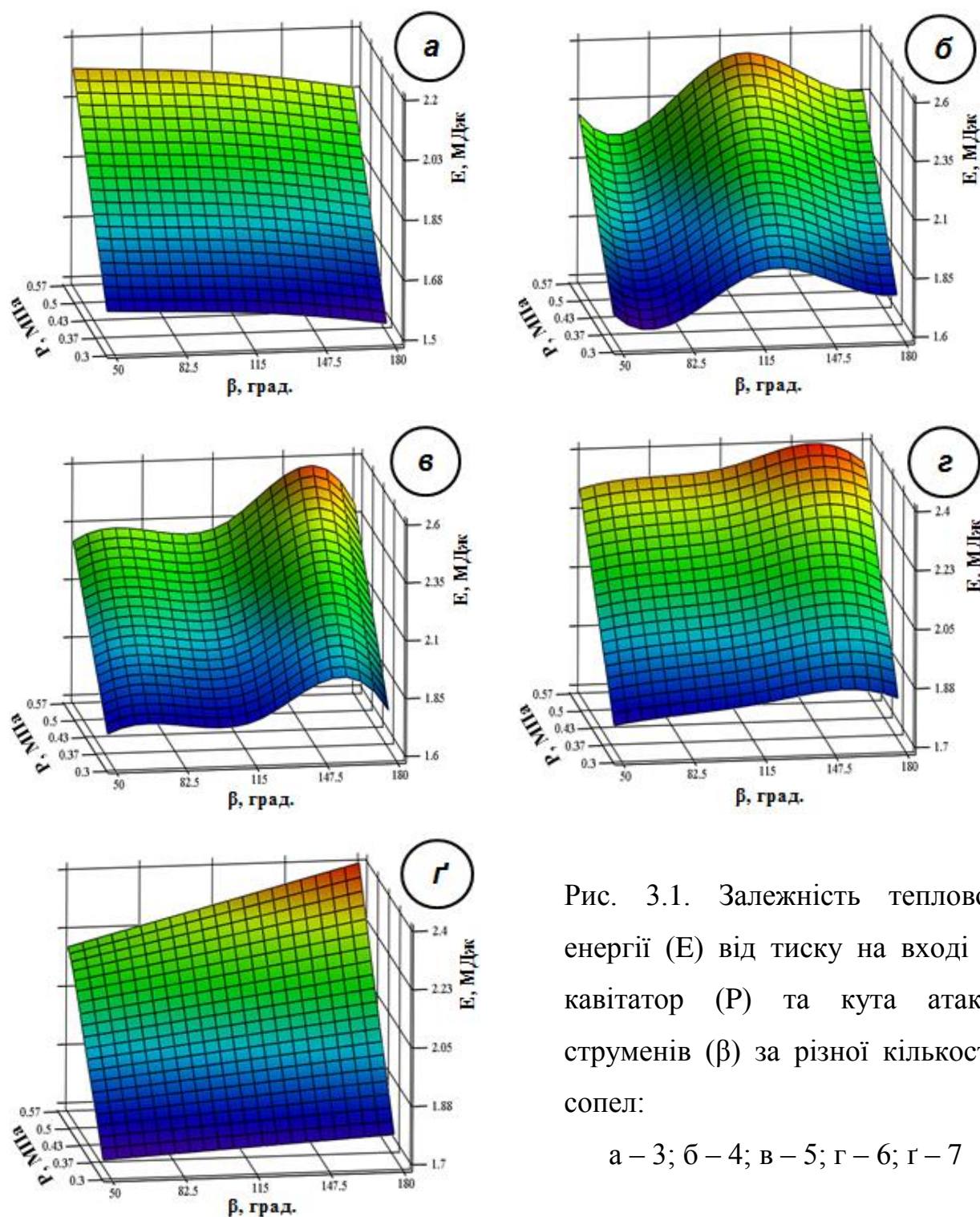


Рис. 3.1. Залежність теплової енергії ( $E$ ) від тиску на вході у кавітатор ( $P$ ) та кута атаки струменів ( $\beta$ ) за різної кількості сопел:

а – 3; б – 4; в – 5; г – 6; д – 7

Із наведених залежностей видно, що зі збільшенням тиску на вході у кавітатор величина теплової енергії суттєво зростає в усьому діапазоні значень

кута атаки струменів. Так, за діаметра сопла  $d = 1,6$  мм зі збільшенням тиску на вході у кавітатор від 0,35 до 0,57 МПа величина теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, зростає від 1,571 до 2,113 МДж (на 34,5%) за кута атаки струменів 50 град. – для 3-х сопел; від 1,846 до 2,525 МДж (на 36,8%) за кута атаки 120 град. – для 4-х сопел; від 1,873 до 2,539 МДж (на 35,6%) за кута атаки 150 град. – для 5-ти сопел; від 1,833 до 2,395 МДж (на 30,7%) за кута атаки 150 град. – для 6-ти сопел; від 1,746 до 2,388 МДж (на 36,8%) за кута атаки 175 град. – для 7-ми сопел. Це обумовлено монотонним збільшенням швидкості води ( $w$ ) у профільованому соплі зі зростанням тиску на вході у кавітатор ( $P$ ) (рис. 3.2).

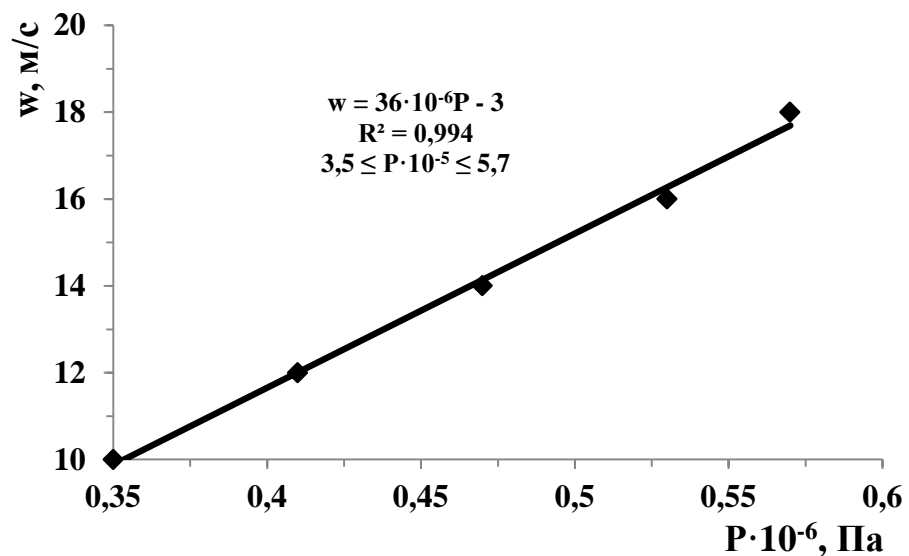


Рис. 3.2. Залежність швидкості води в соплах ( $w$ ) від тиску на вході у кавітатор ( $P$ ); (діаметр сопла – 1,6 мм)

Залежність гідродинамічного режиму, охарактеризованого критерієм Рейнольдса ( $Re$ ), від режиму кавітації, описаного безрозмірним параметром – числом кавітації ( $\sigma$ ), наведено на рис. 3.3.

З рис. 3.3 видно, що зі збільшенням числа кавітації величина критерію Рейнольдса зменшується, тобто зменшується турбулізація потоку і ускладнюється розвиток кавітаційних явищ. За чисел кавітації, менших від 1 ( $\sigma = 0,97 \dots 0,58$ ), у ГДСК формується режим суперкавітації [193, 265], для якого

характерне сплескування кавітаційних бульбашок за межами кавітувальних елементів (сопел), що запобігає їх ерозії. При цьому величина критерію Рейнольдса зростає від  $3,3 \cdot 10^4$  до  $4,5 \cdot 10^4$ .

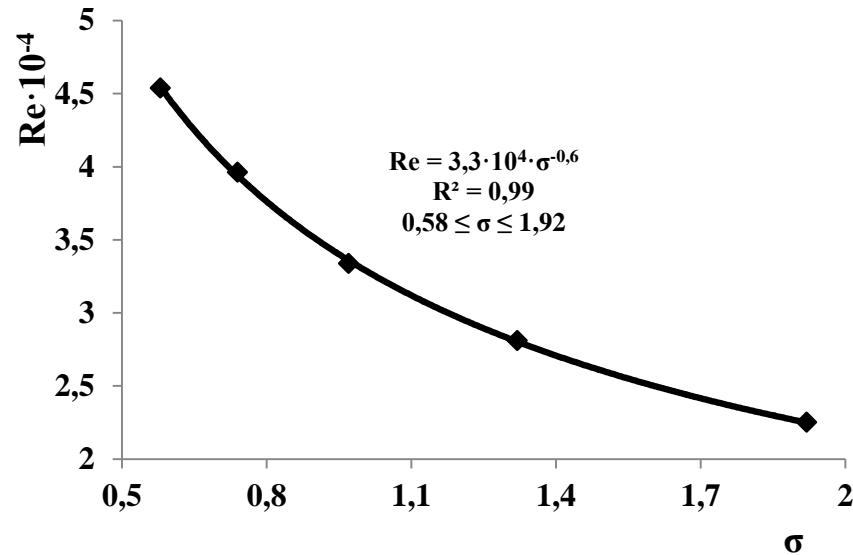


Рис. 3.3. Залежність критерію Рейнольдса ( $Re$ ) від числа кавітації ( $\sigma$ )  
(кількість сопел – 5; діаметр сопла – 1,6 мм)

Як відомо, кінетична енергія струменів пропорційна швидкості рідини у квадраті. Збільшення швидкості струменів призводить до зростання величини їх кінетичної енергії, а, оскільки остання трансформується у теплову, то й теплової енергії, що виділяється внаслідок колапсу кавітаційних парогазових бульбашок.

Встановлено, що зі збільшенням кількості сопел максимум значень теплової енергії зміщується в область більших значень кута атаки струменів (від 50 град. для 3-х сопел – до 175 град. для 7-ми сопел). Це зумовлено зменшенням віддалі між струменями до моменту їх зіткнення, і, відповідно, внесенням більшої частки енергії кожного струменя у кумулятивний. Кумулятивний струмінь – результатний струмінь, що утворюється внаслідок зіткнення кількох вихідних струменів рідини і для якого характерне концентрування кінетичної енергії цих струменів. Частка енергії кожного

струменя, яка вноситься у кумулятивний, залежить від відношення площі січення вихідного струменя з швидкостями, близькими до максимальної (осьової), до площі зіткнення струменів, що дорівнює площі відповідної геометричної фігури. Так, фігурою перетину двох безперервних у часі струменів рідини є неправильний еліпс (рис. 3.4, еліпс CRDR). Найінтенсивніше зіткнення струменів відбувається у ближній до сопел частині еліпса – півеліпсі CROR площею  $S_1$ .

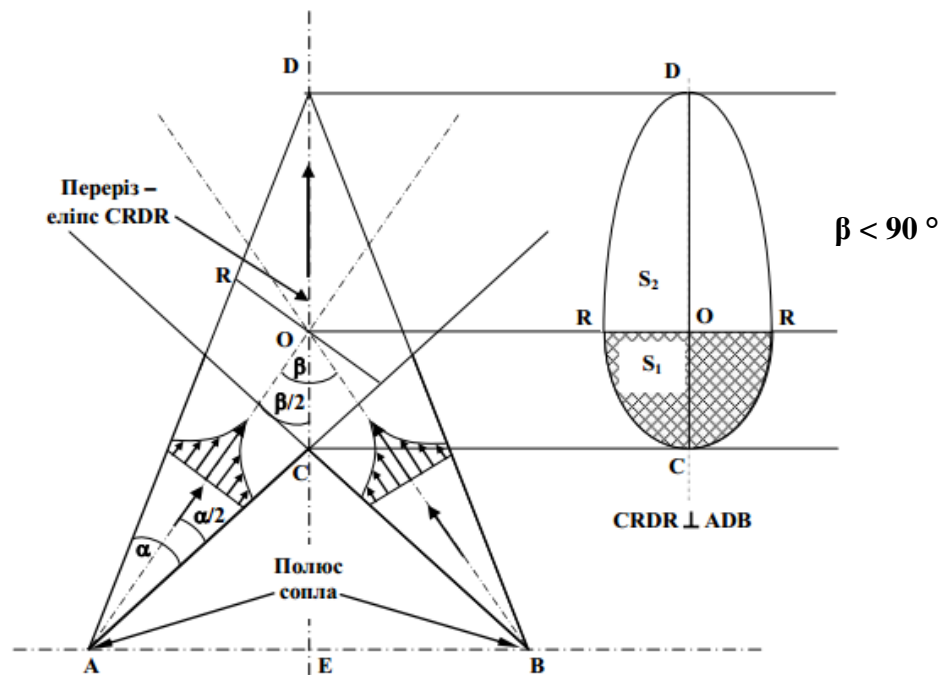


Рис. 3.4. Схема взаємодії двох струменів рідини  
(сопла розташовані у площині рисунка):

$\alpha$  – кут розкриття струменя;  $\beta$  – кут атаки струменів (кут між осями сопел);  
 АВ – віддаль між вершинами конусів (вершина всередині сопла, положення якої можна визначити за діаметром сопла та кутом розкриття струменя);  
 CRDR – неправильний еліпс (переріз площиною місця контакту двох струменів)

Фігура, що утворюється в результаті зіткнення трьох струменів рідини, є об'ємною і складається з трьох пелюстків, розташованих під кутом 120 град. один щодо одного. Кожен із них утворюється під час зіткнення двох суміжних

струменів і також є неправильним еліпсом, зміщеним щодо центру симетрії вздовж однієї з півосей (рис. 3.5, еліпс NLPD). Однак найінтенсивніше зіткнення суміжних струменів відбувається лише у тій частині площини, що розташована найближче до сопел, тобто обмежується площиною NOPD.

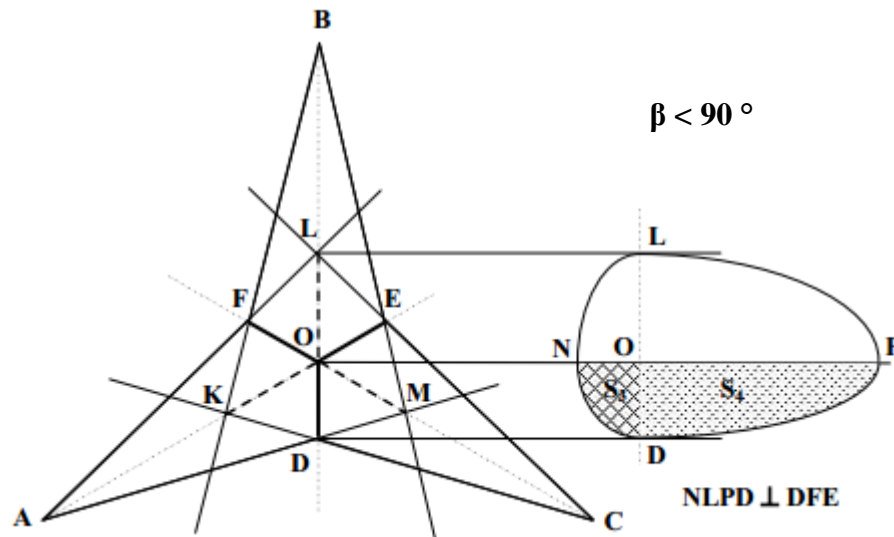


Рис. 3.5. Схема взаємодії трьох струменів рідини  
(сопла розташовані у площині рисунка):

NLPD – площа зіткнення струменів з полюсами A, B і C

За визначених для різної кількості сопел кутів атаки струменів, наведених вище, це відношення є максимальним, що забезпечує максимально можливу за даних умов концентрацію енергії на одиницю площі кавітаційного кластера і, як наслідок, полегшує збудження і розвиток кавітації. Отже, оскільки енергія, що у підсумку виділяється внаслідок зіткнення струменів рідини, залежить від площі такого зіткнення, то процес гідродинамічної струменевої кавітації можна з деяким наближенням розглядати як псевдогетерогенний.

Максимуму теплової енергії (2,539 МДж), що відповідає величині енергетичного коефіцієнта корисної дії 90,71 %, досягали у разі використання 5-ти сопел з кутом атаки струменів 150 град. Виділення великої кількості теплової енергії внаслідок кавітаційного оброблення води зумовлене зміною її кластерної структури. У кавітаційних полях у місцях деструкції гексагональних



кілець типів „ванна“ або „крісло“, характерних для структури необробленої води, можуть локально і короткочасно виникати п'ятичленні кільця молекул води, у яких одна молекула води у конденсованому стані утворює водневі зв'язки з чотирма сусідніми. Ці кільця мають майже плоску структуру, і тому водневі зв'язки у них є слабшими, ніж у гексагональних [266].

За кута атаки 150 град. під час зіткнення декількох струменів виникає спрямований у напрямку від сопел результатний (кумулятивний) струмінь, в якому й збуджується кавітація. При цьому область кавітації формується на певній відстані від вихідної ділянки сопел, що унеможлиблює їх ерозію. Це є безумовною перевагою ГДСК порівняно із кавітаційними апаратами інших конструкцій (ультразвукові магнітострикційні, роторні, вібраційні, розрядно-імпульсні тощо). У разі збільшення кута атаки до 175 град. ця область практично локалізована між соплами й може спричиняти їх руйнування.

Екстремум значень питомої теплової енергії (рис. 3.6) спостерігали за діаметра сопел, що дорівнював 1,6 мм.

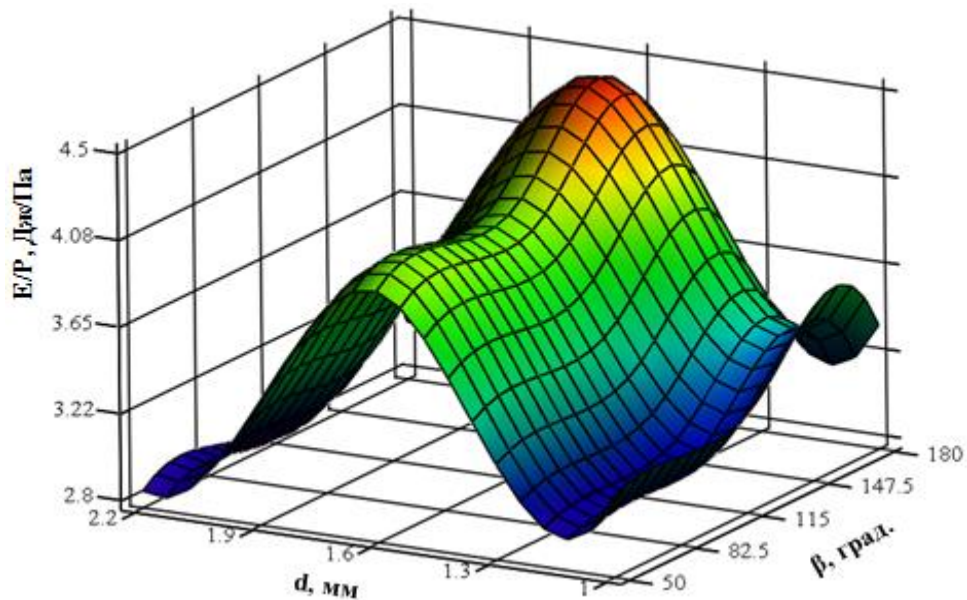


Рис. 3.6. Залежність питомої теплової енергії ( $E/P$ ) від діаметра сопел ( $d$ ) та кута атаки струменів ( $\beta$ ) (кількість сопел – 5;  $P = 0,57$  МПа)



У випадку застосування сопел меншого діаметра (1; 1,3 мм) різко зростає гідравлічний опір. Крім того, за таких діаметрів збільшується імовірність “обтікання” одного струменя іншим і, відповідно, ефективність зіткнення зменшується. Для сопел більшого діаметра (1,9; 2,2 мм) за сталої витрати води зменшувалась величина осьової складової швидкості струменя на виході з сопел і, відповідно, його кінетична енергія, що, своєю чергою, призводило до зменшення ефективності зіткнення кількох струменів. Наведені чинники утруднювали збудження і розвиток кавітаційних процесів.

На основі аналізу енергетичних поверхонь (рис. 3.1, рис. 3.6) попередньо встановили умови процесу кавітаційного оброблення води із застосуванням приводу з номінальною потужністю  $1,1 \cdot 10^3$  Вт, за яких величина виділеної теплової енергії була максимальною: тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа; кількість сопел – 5; кут атаки струменів – 150 град.; діаметр сопла – 1,6 мм.

### **3.2. Статистичне моделювання процесу кавітаційного оброблення води з використанням методу Брандона**

Шукана статистична модель для оптимізації конструкції кавітатора має такий загальний вигляд

$$E(P,d,n,\beta) = E_{\text{сер.арифм}} \cdot f_1(P) \cdot f_2(d) \cdot f_3(n) \cdot f_4(\beta), \quad (3.1)$$

де  $E(P,d,n,\beta)$  – величина теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації (залежить від 4-ох факторів:  $P$ ,  $d$ ,  $n$ ,  $\beta$ ), МДж;  $E_{\text{сер.арифм}}$  – середнє арифметичне значеннь теплової енергії вибірки обсягом  $N$ , МДж;  $P$  – тиск на вході у кавітатор, МПа;  $d$  – діаметр сопла, мм;  $n$  – кількість сопел, од.;  $\beta$  – кут атаки струменів, град.;  $f_1(P)$ ,  $f_2(d)$ ,  $f_3(n)$ ,  $f_4(\beta)$  – одномірні функції, які залежать відповідно від  $P$ ,  $d$ ,  $n$ ,  $\beta$ .

Порядок розташування функцій від змінних параметрів у рівнянні (3.1) визначає вагомість їх впливу на величину теплової енергії.

Внаслідок застосування методу Брандона отримали мультиплікативну модель

$$E(P,d,n,\beta) = 1,722 \cdot f_1(P) \cdot f_2(d) \cdot f_3(n) \cdot f_4(\beta), \quad (3.2)$$

де

$$f_1(P) = 1,562P^{0,599}, \quad (3.3)$$

$$f_2(d) = 4,969d^4 - 32,294d^3 + 76,133d^2 - 76,926d + 29,08, \quad (3.4)$$

$$f_3(n) = -0,009n^4 + 0,206n^3 - 1,597n^2 + 5,353n - 5,494, \quad (3.5)$$

$$f_4(\beta) = -10^{-9}\beta^4 + 3 \cdot 10^{-7}\beta^3 - 2 \cdot 10^{-5}\beta^2 + 0,979. \quad (3.6)$$

Діаграма залежності  $E = f(P,d,n,\beta)$ , розрахованої за рівнянням (3.2) на підставі отриманих експериментальних результатів, наведена на рис. 3.7.

Параметри, від яких залежить величина теплової енергії, змінювали 5 разів, тому обсяг вибірки  $N$  становив  $5^4 = 625$  комбінацій.

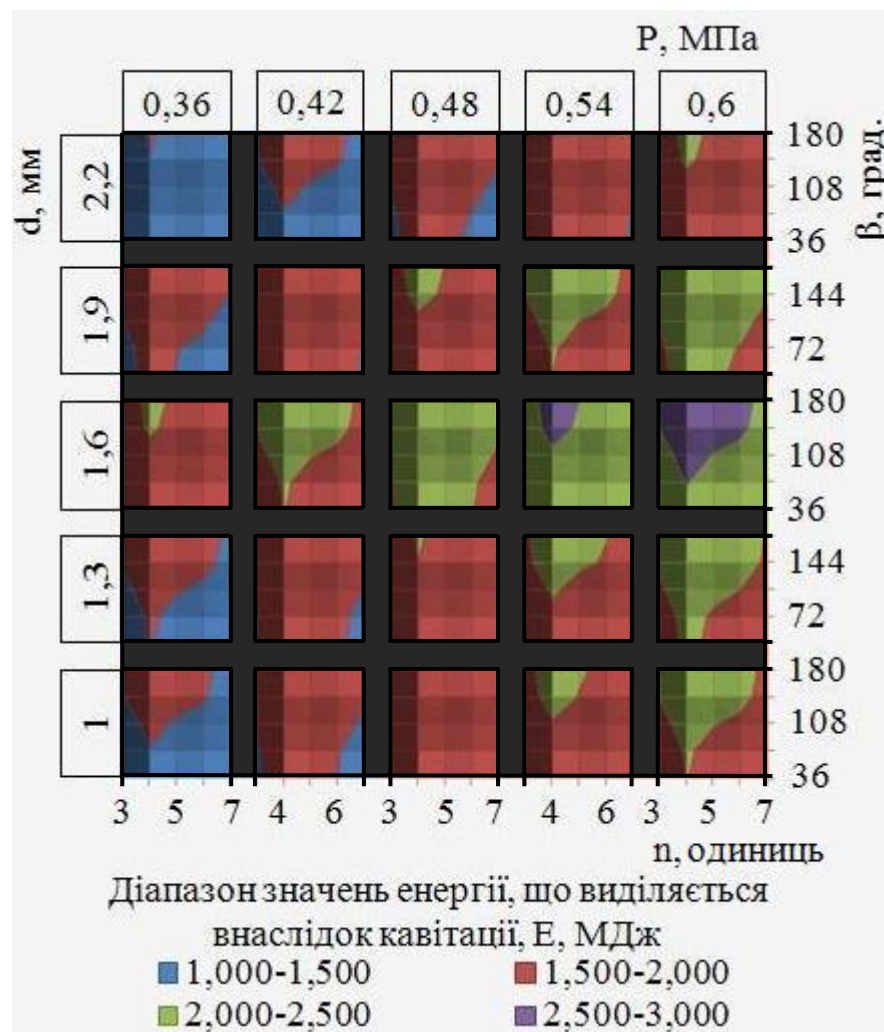


Рис. 3.7. Діаграма залежності  $E = f(P,d,n,\beta)$ , розрахована за методом Брандона

З рис. 3.7 видно, що оптимальні умови для здійснення процесу кавітаційного оброблення води знаходяться в площині значень тиску на вході у кавітатор – 0,54...0,6 МПа, діаметра сопла – 1,6±0,1 мм, кількості сопел – 4...5 од., кута атаки струменів – 144...180 град. За таких умов величина теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, є більшою 2,5 МДж. Враховуючи збільшення ймовірності ерозії кавітувальних елементів (сопел) за наближення величини кута атаки струменів до 180 град., вважали за доцільне обмежити область значень кута атаки у діапазоні – 144...170 град.

Адекватність отриманих рівнянь регресії (3.2-3.6) перевіряли за критерієм Фішера. Обчислювали значення залишкової дисперсії та дисперсії відтворюваності:

$$S_{\text{зал}}^2 = 9,554 / (625 - (4 + 1)) = 0,015, \quad (3.7)$$

$$S_{\text{в}}^2 = 45,924 / (625 - 1) = 0,074. \quad (3.8)$$

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F = 0,015 / 0,074 = 0,203. \quad (3.9)$$

Табличне значення критерію Фішера для вибраного рівня значущості  $\alpha = 0,05$  і чисел ступенів свободи  $f_1 = 620$  і  $f_2 = 624$  становить 1,51 [253].  $F < F_T = 0,203 < 1,51$  – отже, рівняння регресії (3.2-3.6) адекватно відтворюють результати експерименту.

Точність статистичної моделі оцінювали за допомогою двох критеріїв – коефіцієнта детермінації та середньої відносної похибки апроксимації:

$$R^2 = 1 - 9,554 / 45,924 = 0,792, \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{\text{сер.відн}} = (1 / 625) \cdot 36,589 \cdot 100\% = 5,85\%. \quad (3.11)$$

Розраховані значення коефіцієнта детермінації ( $R^2 = 0,792$ ) та середньої відносної похибки апроксимації ( $\varepsilon_{\text{сер.відн}} = 5,85\%$ ) свідчать про достатньо високу точність статистичної моделі, що описує таке складне явище, як кавітація.

Розроблена статистична модель процесу кавітаційного оброблення води може бути використана з певними уточненнями для прогнозування

інтенсивності розвитку кавітаційних полів, яку оцінюють калориметрично, у значно ширших, ніж досліджувані, областях варіювання технологічного та конструктивних параметрів ГДСК. Отримана поліфункційна залежність величини теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, від технологічного (тиск на вході у кавітатор) та конструктивних (діаметр сопла, кількість сопел, кут атаки струменів) параметрів дає змогу цілеспрямовано регулювати ефективність кавітаційного оброблення у струменевому кавітаторі.

### **3.3. Дослідження розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів методом сонохімічного аналізу**

Результати попередньо виконаних досліджень свідчать, що навіть незначне підвищення вихідної температури води суттєво знижує ефективність її кавітаційного оброблення. Так, за підвищення початкової температури води на 9 К (від 289 до 298 К), яку надалі обробляли у кавітаторі, величина енергетичного коефіцієнта корисної дії зменшувалась на 35,47% (від 90,71 до 55,24%). Такий ефект можна пояснити зменшенням вмісту розчинених у воді газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  тощо) з підвищенням її температури, оскільки істотно зростає швидкість процесів десорбції газів з рідкої фази. Зважаючи на це, для вивчення особливостей розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів (ультразвуковому магнітострикційному та гідродинамічному струменевому) доцільно розглянути характеристики газової фази (розмір зародків кавітації, кавітаційних та флотаційних бульбашок, їх кількість тощо), яка утворюється під час кавітаційного оброблення води.

Процес утворення кавітаційних бульбашок складається з двох стадій:

- 1) виникнення у рідині зародків кавітаційних бульбашок з розмірами, що дорівнюють критичним;
- 2) росту сформованих зародків.

Під „критичним радіусом“ зародка кавітації розуміють такий його радіус, за якого починається ріст з утворенням кавітаційної бульбашки. Якщо розміри зародка менші від критичних значень (за відомої величини тиску насиченої водяної пари, що залежить від температури рідини), то він може розчинятись. Радіус зародка кавітації визначали за формулою Лапласа [257]. Радіус кавітаційної бульбашки обчислювали за співвідношенням [267]:

$$R_{\sigma}/R_{z,kr} = 10. \quad (3.12)$$

Значення радіусів зародка кавітації ( $R_{z,kr}$ , мкм) та кавітаційної бульбашки ( $R_{\sigma}$ , мкм), розраховані за формулами (2.4, 3.12), залежно від тиску насиченої водяної пари за відповідних умов наведені у таблиці 3.1.

**Таблиця 3.1 – Значення радіусів зародка кавітації та кавітаційної бульбашки залежно від тиску насиченої водяної пари за відповідних умов**

T, К	283	293	303	313	323	333	343	353	363	373
$P_{нас}$ , кПа	1,23	2,34	4,24	7,37	12,33	19,92	31,15	47,34	70,09	101,31
$R_{z,kr}$ , мкм	215	81	38	20	12	7	4	3	2	1
$R_{\sigma}$ , мкм	2150	810	380	200	120	70	40	30	20	10

Розраховані значення радіусів зародків кавітації та кавітаційних бульбашок необхідно порівняти з визначеними на основі експериментальних досліджень розвитку кавітаційних полів.

Для визначення розмірів мікрочастинок найчастіше застосовують оптичні та звукохімічні (методи сонохімічного аналізу) методи. Суть оптичних методів полягає у вимірюванні інтенсивності розсіяного дисперсними частинками світла. Для урахування оптичних властивостей частинок використовують теорію Мі [268]. Вона описує випромінювання для всіх просторових напрямків, а також навколо гомогенної сферичної частинки у гомогенному, неабсорбувальному середовищі, і стверджує, що розсіювання світла

ґрунтується на явищі резонансу – співпадінні частоти коливань частинки з частотою хвилі світла. Згідно з теорією Мі можливі декілька коливальних станів з різною ймовірністю, й існує зв'язок між оптично активним перерізом і розміром частинок, довжиною світлової хвилі і показниками заломлення частинок та середовища. Тому для використання теорії Мі повинні бути відомими показники заломлення та коефіцієнти поглинання частинок і середовища. Часто такі дані відсутні, що значно обмежує область застосування оптичних методів і зумовлює необхідність застосування інших методів для визначення розмірів мікрочастинок, зокрема звукохімічних.

Звукохімічні методи також базуються на явищі резонансу. У полі акустичних хвиль бульбашка газу (повітря) починає пульсувати і її радіус осцилює навколо середнього значення з частотою падаючої хвилі. На деякій частоті такі осциляції стають резонансними, а їх амплітуда досягає максимуму [269]. Якщо процес пульсацій є адіабатичним, то зв'язок резонансної частоти з радіусом бульбашки відображає формула Міннерта [258], відповідно до якої величини радіуса бульбашки та резонансної частоти є обернено пропорційними, тобто зі зростанням резонансної частоти радіус бульбашки зменшується. Фіксуючи, як змінюється величина резонансної частоти, можна однозначно характеризувати зміну розмірів кавітаційних та флотаційних бульбашок, а, отже, й особливості сформованих кавітаційних полів (їх однорідність, просторову локалізацію тощо) та властивості флотаційного шару, зокрема його щільність. Аналізуючи принципи роботи різних генераторів (магнітострикційні, гідродинамічні), можна спрогнозувати, що резонансна частота коливань кавітаційних бульбашок залежатиме від способу збудження кавітаційних явищ. Тому розглянемо особливості формування кавітаційних полів та флотаційного шару у генераторах різних типів – ультразвуковому магнітострикційному та гідродинамічному струменевому. Необхідно наголосити, що величина питомої потужності для УЗ-випромінювача та ГДСК є однаковою і становить  $\sim 63 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>3</sup>, а тому можна порівнювати інтенсивності розвитку кавітаційних явищ у цих апаратах.

### 3.3.1. Дослідження розвитку кавітаційних полів, сформованих ультразвуковим магнітострикційним випромінювачем, методом сонохімічного аналізу

Кавітаційні поля, сформовані УЗ-випромінювачем, виникають як результат поширення акустичних коливань УЗ-діапазону від поверхні концентратора магнітостриктора в об'єм води. Осцилограма звукового сигналу кавітаційного поля, сформованого ультразвуковим магнітострикційним випромінювачем, наведена на рис. 3.8. Рівень звукового сигналу „0 dB“ відповідає максимально можливій амплітуді піків хвильової форми, за якої ще можливе фіксування величини звукового сигналу.

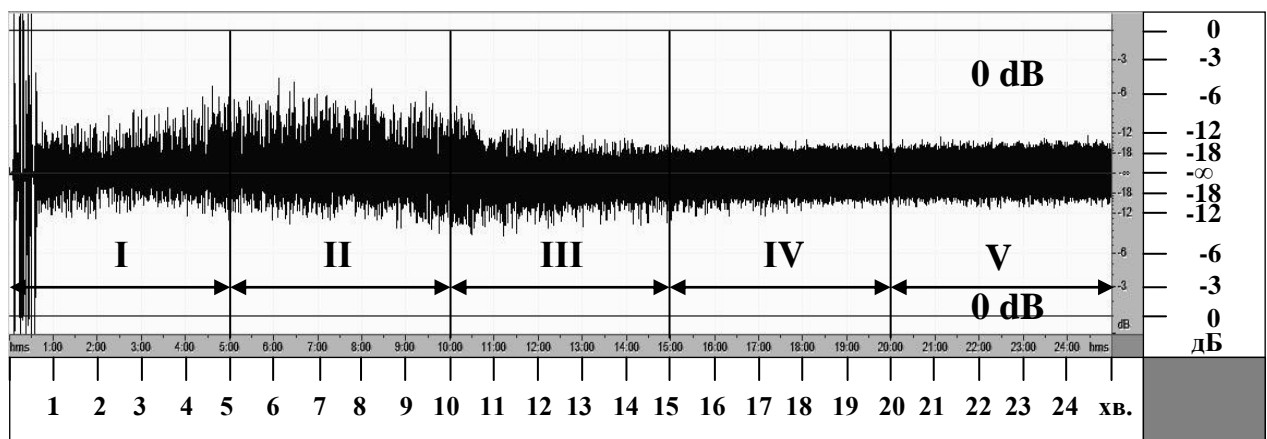


Рис. 3.8. Осцилограма звукового сигналу кавітаційного поля, збудженого магнітострикційним випромінювачем, за зміни в часі (хв.) величини потужності генератора УЗ-коливань (Вт) на ділянках:

I – 8,0; II – 9,2; III – 10,2; IV – 11,5; V – 12,5

Рівень звукового сигналу (акустичного шуму) кавітаційного поля, яке генерували за допомогою ультразвукового випромінювача, впродовж перших 900 с оброблення був значно вищим (у 2...2,5 рази), ніж у подальші 600 с. Крім того, зі збільшенням величини потужності генератора ультразвукових коливань зменшувався період між двома сусідніми амплітудними значеннями сигналу.

Це обумовлено формуванням окремих кавітаційних бульбашок у воді, їх пульсаціями, що відповідає відрізку 0...900 с на осцилограмі (рис. 3.8), та подальшою коалесценцією під дією сил Бьєркнеса. Сили Бьєркнеса – це сили електростатичного притягання, які виникають між пульсуючими у рідині бульбашками повітря сферичної форми [269]. Середня в часі сила взаємодії ( $F$ , Н) між двома сферичними бульбашками, які пульсують у рідині, за Бьєркнесом дорівнює [269]

$$F = \frac{\rho \Omega_1 \Omega_2 \cos \psi}{4\pi l^2}, \quad (3.13)$$

де  $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $\Omega = 4\pi R_0^2 w$  – об'ємна швидкість бульбашки, що пульсує, м<sup>3</sup>/с;  $\psi$  – різниця фаз коливань сферичних бульбашок;  $l$  – відстань між бульбашками, м.

Оскільки концентрація кавітаційних бульбашок (бульбашок I-го покоління) під робочою поверхнею магніостриктора в часі зростає, то закономірно зменшується відстань між ними. Відповідно до рівняння (3.13) це призводить до зростання сили Бьєркнеса, і, своєю чергою, – до коалесценції бульбашок. Як наслідок, утворюються декілька або навіть один агломерат бульбашок (агломерат – бульбашка II покоління), діаметр яких може досягати навіть 10<sup>-2</sup> м. Такий агломерат бульбашок називають великою деформованою бульбашкою (ВДБ) [194].

Враховуючи те, що у разі застосування ультразвукового випромінювача кавітаційна область локалізована поблизу робочої поверхні магніостриктора, можна, з певним наближенням, вважати процес формування кавітаційного поля псевдо- (квазі-) гетерогенним, тобто таким, що, перш за все, залежить від площі поверхні магніостриктора (рис. 3.9).

Отже, за однакових кількостей підведеної до системи енергії та часу оброблення кількість кавітаційних бульбашок, а також розміри кавітаційних полів, їх однорідність та щільність, зростатимуть зі збільшенням площі поверхні магніостриктора.



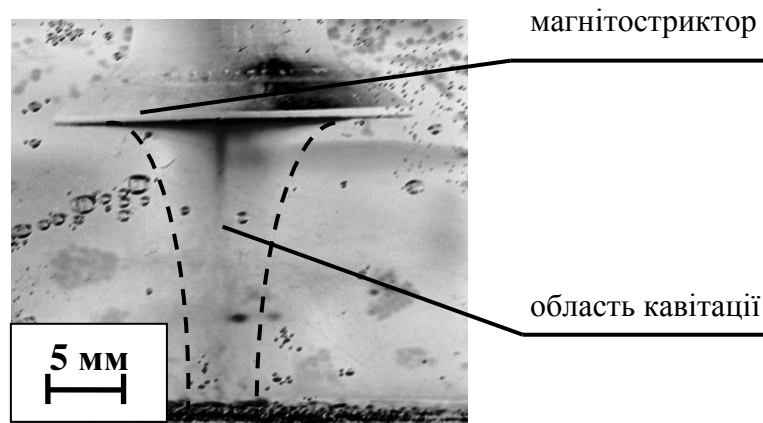


Рис. 3.9. Фотографія кавітаційного поля, сформованого ультразвуковим магнітострикційним випромінювачем (зображення інвертоване)

Про об'єднання бульбашок I-го покоління з утворенням агломератів свідчить зменшення резонансної частоти під час зростання величини потужності генератора ультразвукових коливань (рис. 3.10, 3.11, табл. 3.2).

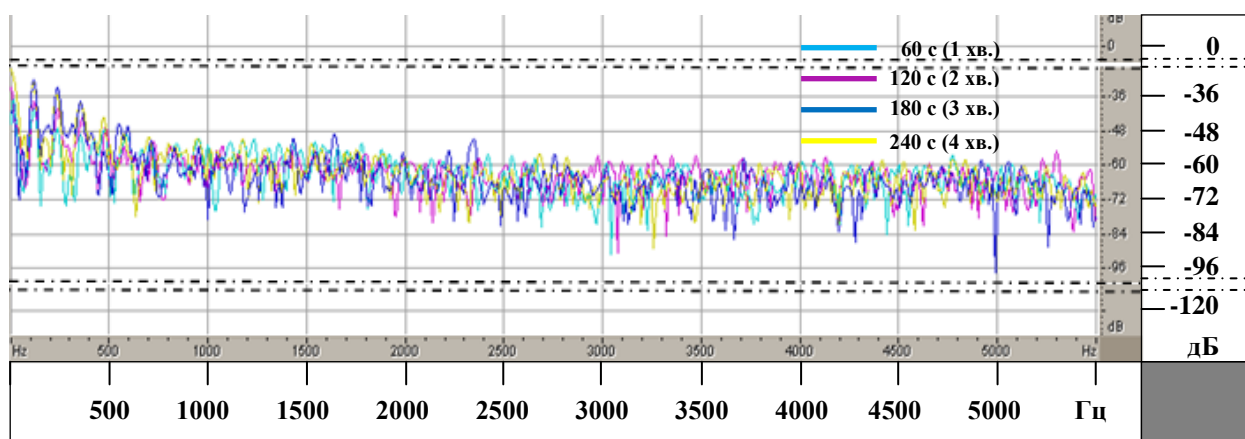


Рис. 3.10. Спектр частот за величини потужності генератора УЗ-коливань 8,0 Вт

З рис. 3.10 видно, що частоти, які відповідають амплітудним значенням звукового сигналу в діапазоні кавітаційного оброблення 60...240 с, знаходяться в області 2500...4900 Гц. Збільшення потужності генератора УЗ-коливань від 8,0 до 12,5 Вт (рис. 3.11) призводить до зміщення амплітудних значень частоти звукового сигналу в область 750...2900 Гц. За цих частот у воді збільшується інтенсивність коалесценції сформованих напередодні окремих кавітаційних бульбашок та їх агрегатів з утворенням ВДБ. Спектри частот за інших величин потужності генератора УЗ-коливань наведено у додатку А.

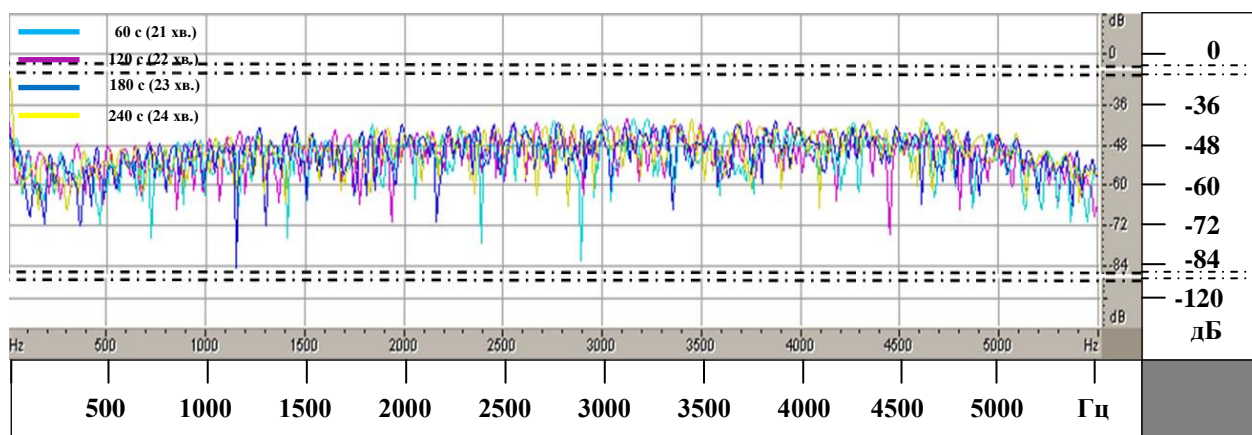


Рис. 3.11. Спектр частот за величини потужності генератора  
УЗ-коливань 12,5 Вт

Для оцінювання розвитку кавітаційних полів та перебігу подальших процесів необхідно було визначити розміри кавітаційних бульбашок та їх агрегатів. З цією метою використовували формулу Міннерта, що зв'язує резонансну частоту (табл. 3.2) з радіусом бульбашки за адіабатичного процесу її пульсацій.

Таблиця 3.2 – Значення резонансної частоти залежно від потужності генератора ультразвукових коливань

Потужність генератора ультразвукових коливань, Вт	Тривалість кавітаційного оброблення, с				Резонансна частота, Гц
	Амплітудне значення частоти, Гц				
8,0 (ділянка I)	$\frac{60}{4900}$	$\frac{120}{4400}$	$\frac{180}{2500}$	$\frac{240}{3400}$	3800
9,2 (ділянка II)	$\frac{60}{2950}$	$\frac{120}{2200}$	$\frac{180}{2300}$	$\frac{240}{3150}$	2650
10,2 (ділянка III)	$\frac{60}{1620}$	$\frac{120}{3800}$	$\frac{180}{1400}$	$\frac{240}{1150}$	1990
11,5 (ділянка IV)	$\frac{60}{500}$	$\frac{120}{3400}$	$\frac{180}{1870}$	$\frac{240}{1300}$	1770
12,5 (ділянка V)	$\frac{60}{1750}$	$\frac{120}{750}$	$\frac{180}{1650}$	$\frac{240}{2900}$	1760

За величину резонансної частоти приймали середнє арифметичне значеннь 4-ох частот (табл. 3.2), що відповідали амплітудним значенням акустичного сигналу в певний період часу (ділянки I...V, рис. 3.8). Залежність резонансної частоти коливань бульбашок від потужності УЗ-випромінювача наведено на рис. 3.12. Зі збільшенням потужності генератора УЗ-коливань резонансна частота коливань бульбашок зменшується, тобто їх розмір (радіус) зростає.

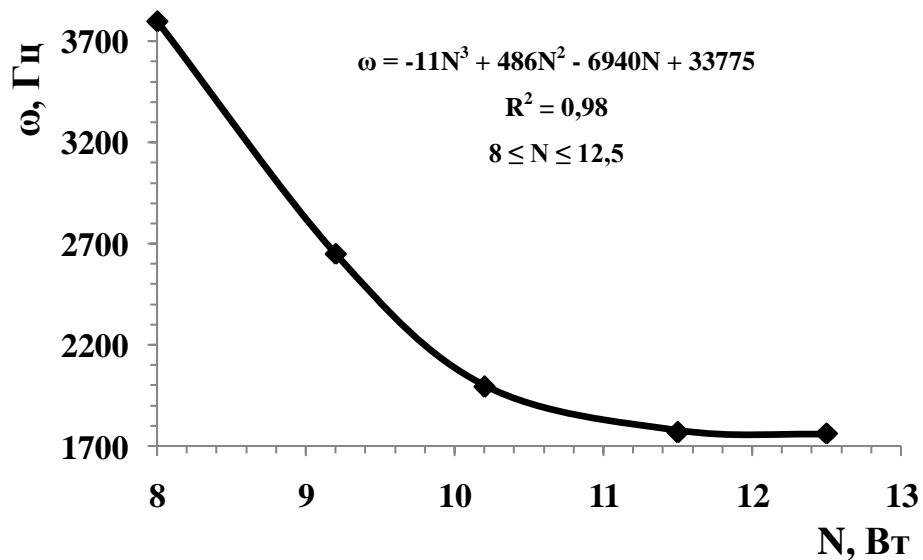


Рис. 3.12. Залежність резонансної частоти ( $\omega$ ) від потужності ультразвукового випромінювача ( $N$ )

Згідно з формулою Міннерта [258], зменшення резонансної частоти під час процесу УЗ-кавітації свідчило про зростання радіуса бульбашок I-го покоління ( $0,86 \cdot 10^{-3}$  м) та їх подальшу коалесценцію з утворенням бульбашок II-го покоління із середнім радіусом  $1,86 \cdot 10^{-3}$  м. За подальшого збільшення потужності УЗ-випромінювача розмір бульбашок газу практично не зміниться. У разі зменшення потужності випромінювання дисперсність бульбашок зростатиме, однак продуктивність за газовою фазою очевидно істотно зменшуватиметься.

Формування кавітаційних полів за допомогою УЗ-випромінювача супроводжується зростанням розміру бульбашок внаслідок їх коалесценції, що

значно ускладнить флотацію дрібнодисперсних частинок. Перебіг кавітації як квазігетерогенного процесу, що лімітується площею концентратора магніостриктора, значно знижує ефективність кавітаційного оброблення, оскільки область кавітації локалізована поблизу магніостриктора. Крім того, до недоліків УЗ-випромінювачів належать: низька потужність; можливість регулювання потужності в обмеженому діапазоні; необхідність вибору такого ущільнення концентраторів магніострикторів, яке не гаситиме коливань, що суттєво ускладнить конструкцію УЗ-кавітаторів. Отже, вищезазначені недоліки унеможливають використання УЗ-випромінювачів з традиційним вертикальним (концентратором донизу) розташуванням магніострикторів, а також інших кавітаторів з рухомими частинами (наприклад, вібраційних) для реалізації процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ.

### **3.3.2. Дослідження розвитку кавітаційних полів, сформованих у гідродинамічному струменевому кавітаторі, методом сонохімічного аналізу**

Відмінності у способах збудження кавітаційних явищ у генераторах різних типів (ультразвуковому магніострикційному і гідродинамічному струменевому), очевидно, впливатимуть на особливості розвитку кавітаційних полів. Тому з метою порівняння ефективності генераторів різних типів доцільно дослідити формування кавітаційних полів у ГДСК.

Осцилограма акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого у ГДСК, наведена на рис. 3.13. З рис. 3.13 видно, що зі збільшенням тиску на вході у кавітатор від 0,29 до 0,57 МПа величина акустичного сигналу зростає від -7 до -4 дБ, що відповідає зростанню величини амплітуди звукового тиску в 1,41 рази. Це зв'язане з розвитком кавітаційних явищ, оскільки візуально утворення яскраво вираженого кавітаційного кластера (області кавітації) спостерігали вже за тиску на вході у кавітатор 0,35 МПа.

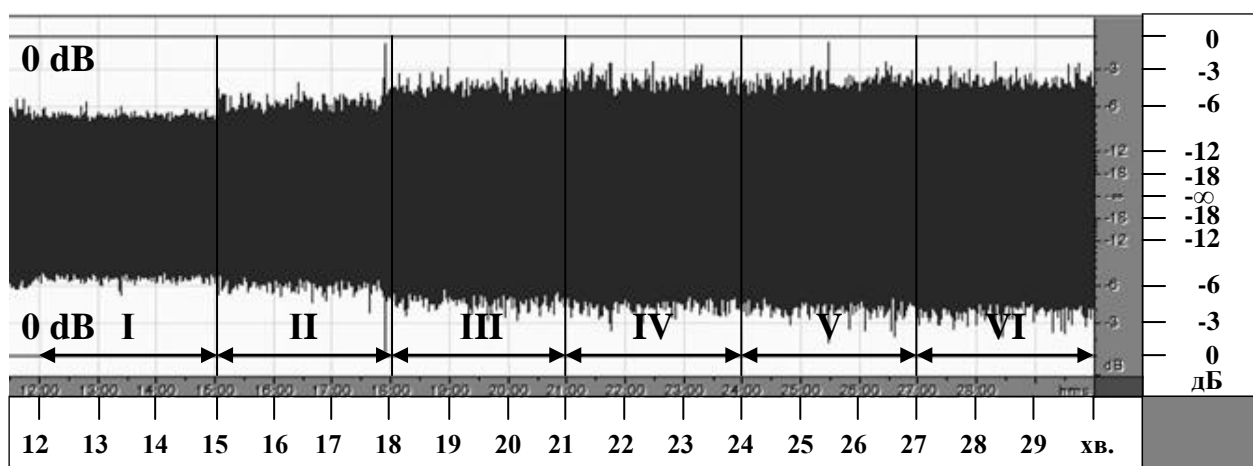


Рис. 3.13. Осцилограма акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого у ГДСК, за зміни в часі (хв.) величини тиску на вході у кавітатор (МПа) на ділянках: I – 0,29; II – 0,35; III – 0,41; IV – 0,47; V – 0,53; VI – 0,57

Типові осцилограми акустичного сигналу кавітаційних полів за різної кількості сопел наведено на рис. 3.14, 3.15, 3.16.

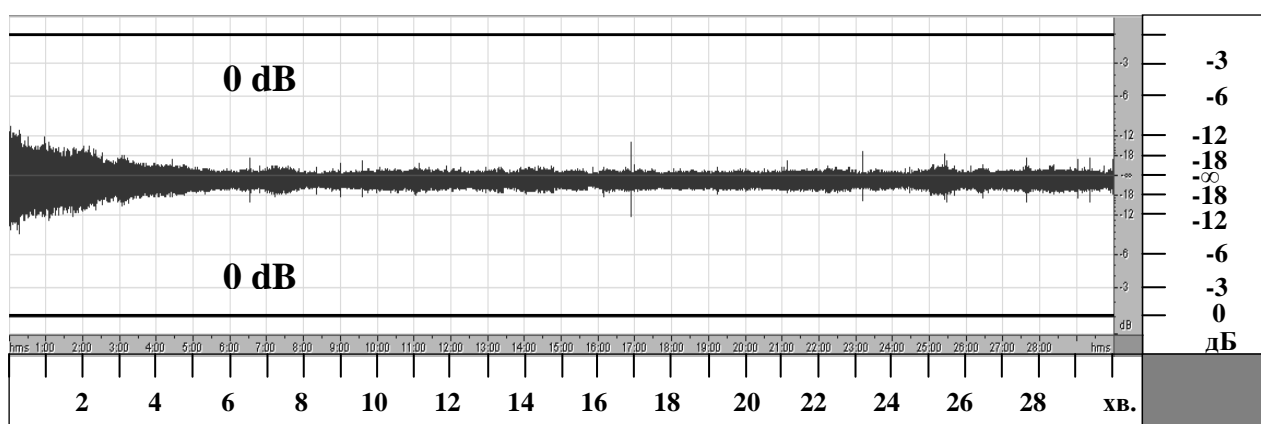


Рис. 3.14. Осцилограма акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого у ГДСК, за кількості сопел 3 од.;

тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа; діаметр сопла – 1,6 мм; кут атаки струменів – 150 град.

Зі збільшенням кількості сопел від 3-х до 5-ти величина акустичного сигналу кавітаційного поля зростає від -21 (рис. 3.14) до -17 дБ (рис. 3.15), що відповідає збільшенню величини амплітуди звукового тиску в 1,6 рази.

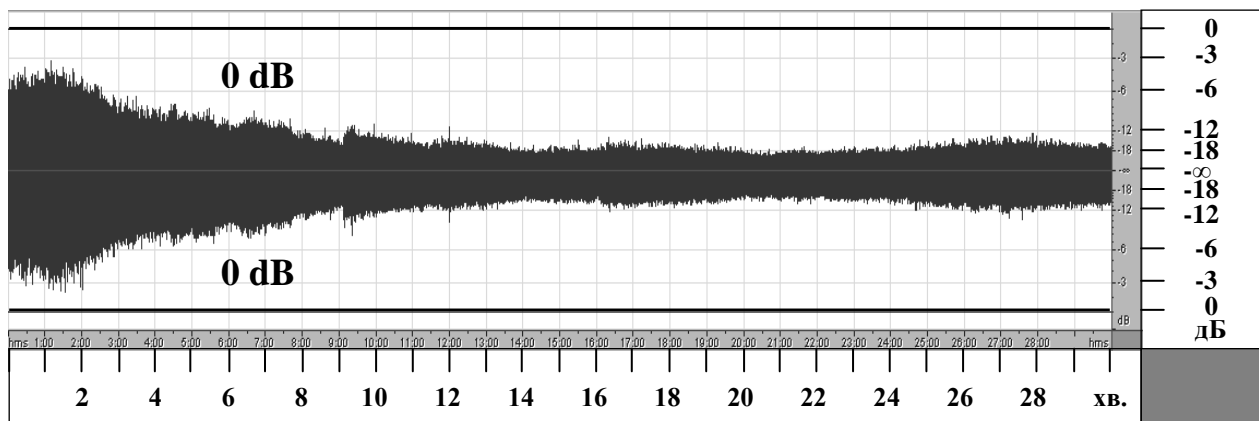


Рис. 3.15. Осцилограма акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого у ГДСК, за кількості сопел 5 од.;  
тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа; діаметр сопла – 1,6 мм; кут атаки струменів – 150 град.

Подальше збільшення кількості сопел до 7-ми призводить до зменшення величини акустичного сигналу кавітаційного поля до -24 дБ (рис. 3.16), що відповідає зменшенню величини амплітуди звукового тиску в 2,2 рази порівняно з використанням 5-ти сопел. Отже, оптимальною кількістю сопел для процесу ефективного кавітаційного оброблення води у ГДСК є 5 од.

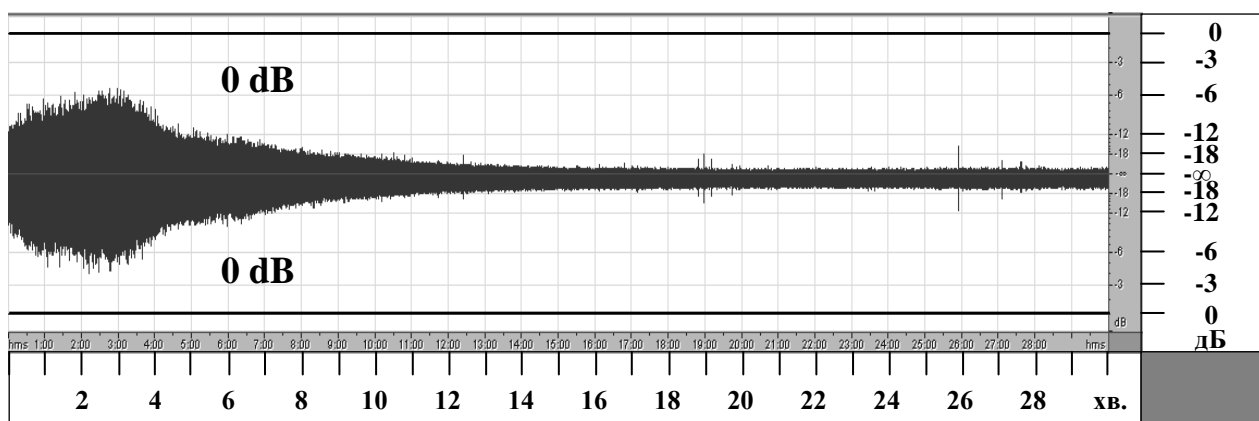


Рис. 3.16. Осцилограма акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого у ГДСК, за кількості сопел 7 од.;  
тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа; діаметр сопла – 1,6 мм; кут атаки струменів – 150 град.

На відміну від акустичної (ультразвукової) під час гідродинамічної кавітації утворюється полідисперсна система з різними за розміром бульбашками. Зі збільшенням тиску на вході у кавітатор частка бульбашок з меншими розмірами зростає. Це підтверджено зростанням величини резонансної частоти компонент кавітаційного поля (бульбашок) зі збільшенням тиску на вході у кавітатор (рис. 3.17, 3.18, табл. 3.3). Як і у випадку з УЗ-випромінювачем, за величину резонансної частоти приймали середнє арифметичне значень 4-ох частот (табл. 3.3), що відповідали амплітудним значенням акустичного сигналу в певний період часу (ділянки II...VI, рис. 3.13).

Встановлено, що зі збільшенням тиску на вході у кавітатор від 0,35 (рис. 3.17) до 0,57 (рис. 3.18) МПа амплітудне значення акустичного сигналу зміщувалось в область вищих частот – величина резонансної частоти коливань бульбашок зростала від 1760 до 4030 Гц. Спектри частот акустичного сигналу кавітаційних полів, сформованих за інших значень тиску на вході у ГДСК наведено у додатку Б.

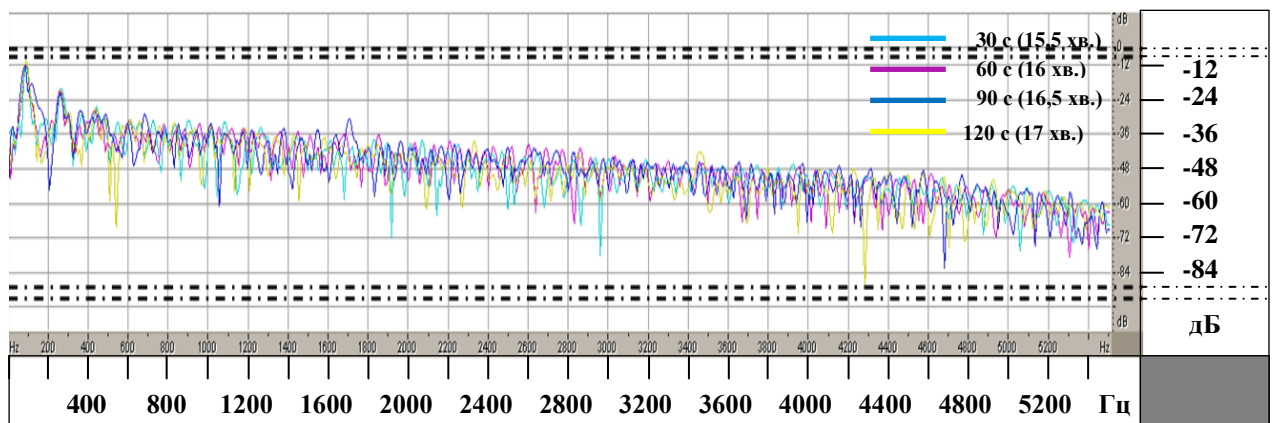


Рис. 3.17. Спектр частот акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого за тиску на вході у ГДСК 0,35 МПа

Збільшення резонансної частоти з підвищенням тиску на вході у кавітатор від 0,35 до 0,57 МПа свідчить про подрібнення певної частини генерованих кавітаційних бульбашок з радіусом  $1,87 \cdot 10^{-3}$  м і утворення їх похідних з радіусом  $0,83 \cdot 10^{-3}$  м. Вищезазначені розміри (радіуси) бульбашок отримані

внаслідок виконання розрахунків за формулою Міннерта з використанням даних, поданих у таблиці 3.3.

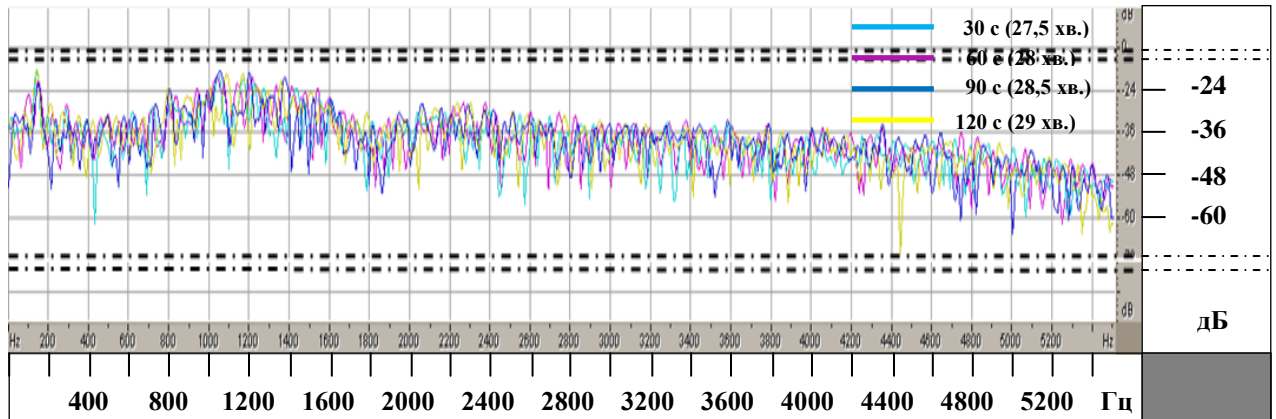


Рис. 3.18. Спектр частот акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого за тиску на вході у ГДСК 0,57 МПа

Значення резонансної частоти коливань бульбашок залежно від тиску на вході у ГДСК (ділянки II...VI, рис. 3.13) наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Значення резонансної частоти залежно від тиску на вході у ГДСК

Тиск на вході у ГДСК, МПа	Тривалість кавітаційного оброблення, с				Резонансна частота, Гц
	Амплітудне значення частоти, Гц				
0,35 (ділянка II)	$\frac{30}{970}$	$\frac{60}{1750}$	$\frac{90}{2800}$	$\frac{120}{1520}$	1760
0,41 (ділянка III)	$\frac{30}{1850}$	$\frac{60}{1800}$	$\frac{90}{3500}$	$\frac{120}{2050}$	2300
0,47 (ділянка IV)	$\frac{30}{2150}$	$\frac{60}{3750}$	$\frac{90}{2220}$	$\frac{120}{2300}$	2610
0,53 (ділянка V)	$\frac{30}{3780}$	$\frac{60}{1300}$	$\frac{90}{3800}$	$\frac{120}{3450}$	3080
0,57 (ділянка VI)	$\frac{30}{3900}$	$\frac{60}{4450}$	$\frac{90}{3950}$	$\frac{120}{3800}$	4030

Аналіз залежності резонансної частоти (3.14), а, отже, і розмірів бульбашок (3.15), від тиску в кавітувальному елементі дає змогу стверджувати, що за подальшого збільшення тиску дисперсність бульбашок зростає:



$$\omega = 520000P^3 - 687400P^2 + 306300P - 43500; (0,35 \text{ МПа} \leq P \leq 1 \text{ МПа}), \quad (3.14)$$

$$R_{\sigma} = 7 \cdot 10^{-3} e^{-3,65P}. \quad (3.15)$$

Так, наприклад, за тиску 1,0 МПа розрахунковий розмір бульбашок дорівнюватиме  $1,8 \cdot 10^{-4}$  м. Отже, у ГДСК існує реальна можливість регулювання перебігом процесу флотації, зокрема збільшенням потужності приводу насоса.

Формування кавітаційних полів, що містять бульбашки різних розмірів, та можливість регулювання частки дрібнодисперсних бульбашок є істотною перевагою ГДСК порівняно із ультразвуковим магнітострикційним випромінювачем. Крім того, величина акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого у гідродинамічному кавітаторі, є в 4 рази більшою, ніж аналогічна величина для УЗ-випромінювача, – відповідно -4 та -16 дБ (рис. 3.13, рис. 3.8). Це відповідає зростанню величини амплітуди звукового тиску в 3,98 рази. Такі значення величин отримують за максимальних значень підведеної до системи енергії, тобто за тиску на вході у ГДСК  $0,57 \cdot 10^6$  Па та потужності генератора УЗ-коливань 12,5 Вт.

Результати досліджень, наведені вище, переконливо свідчать про різну структуру кавітаційних полів, сформованих у генераторах різних типів.

На рис. 3.19 наведено спектр інтенсивності акустичного сигналу кавітаційного поля ГДСК за зміни в часі тиску на вході у кавітувальний елемент. Як відомо, чим більше амплітуда певної складової акустичного сигналу знаходиться в межах визначеного частотного діапазону, тим яскравіший її колір [270]. Найбільш яскравий колір має ділянка спектра інтенсивності для струменевого кавітатора в діапазоні частот від  $10^3$  до  $1,5 \cdot 10^3$  Гц за зміни тиску на вході у кавітатор у межах  $(0,41 \dots 0,57) \cdot 10^6$  Па. Наведене можна пояснити наявністю вихрових утворень, інтенсивність яких зростає зі збільшенням тиску на вході у кавітатор. Вони сприяють диспергуванню генерованих кавітаційних бульбашок (бульбашок I покоління) та їх можливих агрегатів з бульбашками розчинених газів у стовпі рідини над кавітувальним елементом (бульбашок II покоління). Відмічено, що під час руху потоку рідини з диспергованими бульбашками вгору розмір останніх зменшувався.

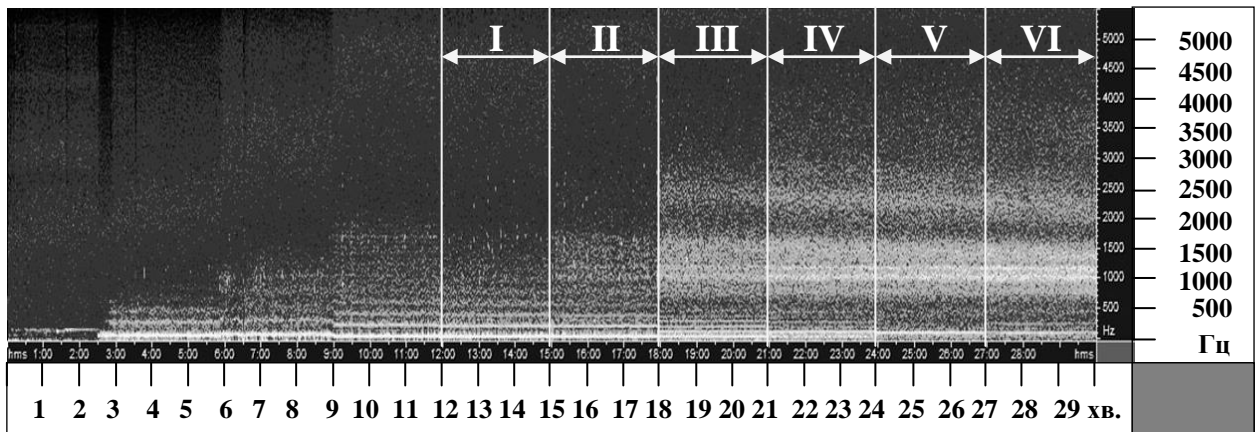


Рис. 3.19. Спектр інтенсивності акустичного сигналу кавітаційного поля ГДСК за зміни в часі (хв.) тиску на вході у кавітувальний елемент (МПа) на ділянках:

I – 0,29; II – 0,35; III – 0,41; IV – 0,47; V – 0,53; VI – 0,57

Отже, у гідродинамічному кавітаторі спостерігали формування 3-ох зон – кавітаційної, перехідної та флотаційної (рис. 3.20).

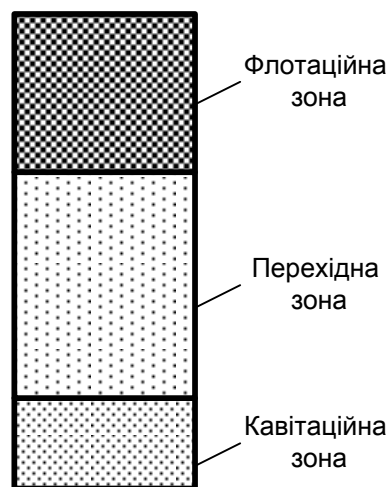


Рис. 3.20. Структура кавітаційних полів у ГДСК

В одному апараті (кавітаторі-флотаторі) ефективно сумістили дві стадії процесу розділення: кавітаційну та флотаційну. У першій зоні внаслідок кавітації генеруються бульбашки певних розмірів (близько  $1,87 \cdot 10^{-3}$  м). Особливістю перехідної зони є виникнення вихрових потоків внаслідок різного роду нестационарностей (градієнтів тиску та швидкості за січенням апарату, виникнення локальних газорідних потоків тощо). З наближенням до

флотаційної зони вихрові потоки руйнуються в результаті взаємодії з шарами рідини, які рухаються з меншою швидкістю, що призводить до формування у флотаційній зоні дрібнодисперсних бульбашок з радіусом  $0,83 \cdot 10^{-3}$  м (бульбашок III-го покоління). За тиску на вході у кавітатор, що дорівнює  $0,57 \cdot 10^6$  Па, висота флотаційної зони становить близько  $1/3$  від висоти СКФА (флотаційної колони), тобто 0,33 м. Межу між кавітаційною та перехідною зонами візуально та фотографічно визначити дуже важко, оскільки генеровані кавітаційні бульбашки відразу ж беруть участь в утворенні вихрових потоків. Тому доцільно говорити про сумарну висоту кавітаційної та перехідної зон, яка за тиску на вході у кавітатор  $0,57 \cdot 10^6$  Па становить близько 0,67 м. Система набувала молочного кольору, зумовленого накопиченням високодисперсних бульбашок.

Фотографічно встановлено, що кавітаційне поле, сформоване у гідродинамічному кавітаторі, охоплює весь реакційний об'єм. Воно є більш однорідним, щільнішим, містить значно більшу кількість дрібнодисперсних бульбашок (рис. 3.21), ніж кавітаційне поле, сформоване за допомогою УЗ-випромінювача. Тому можна стверджувати, що воно забезпечить більшу ефективність флотації завислих дрібнодисперсних частинок.

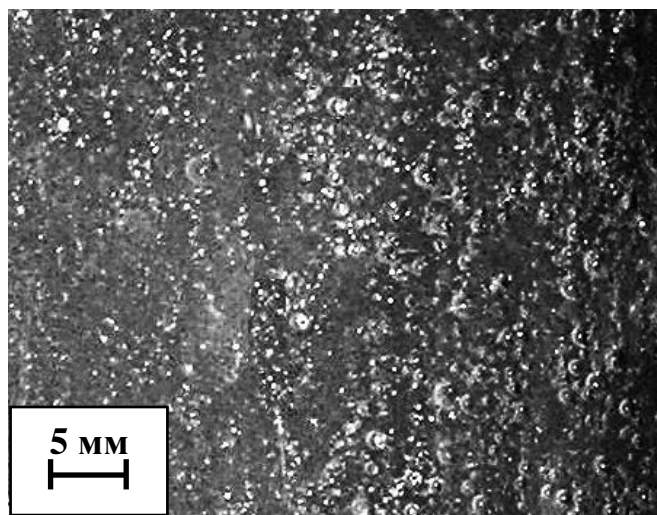


Рис. 3.21. Фотографія області кавітації у ГДСК

Сміт [267] показав, що маленькі бульбашки газу в рідині у полі звукової хвилі коливаються, як резонансна механічна система, що володіє одним ступенем вільності, а період найактивнішої поведінки бульбашок (здатності до сплескування, найбільшої руйнівальної дії) співпадає з моментом, коли їх радіуси дуже близькі до резонансних. На основі даних, отриманих Смітом під час вивчення пульсацій бульбашок у полі звукових хвиль, виведена залежність резонансного радіуса бульбашок від частоти звукової хвилі

$$R_{рез} = \frac{3,3}{\omega}. \quad (3.16)$$

Із формули (3.16) видно, що величина резонансного радіуса обернено пропорційна до величини частоти звукової хвилі.

У таблиці 3.4 наведено значення резонансного радіуса бульбашок, розраховані за формулами: Лапласа за температури 293 К ( $R_L$ , мм); Міннерта з використанням результатів сонохімічного аналізу (для кавітаційного поля, сформованого: за допомогою УЗ-випромінювача, що відповідають I і V ділянкам (рис. 3.8, 3.10, 3.11, табл. 3.2) –  $R_{УЗ(I \text{ діл.})}$ ,  $R_{УЗ(V \text{ діл.})}$ , мм; у ГДСК (рис. 3.18, табл. 3.3) –  $R_{ГДСК}$ , мм); виведеною на основі даних, отриманих Смітом (для кавітаційного поля, сформованого: за допомогою УЗ-випромінювача, що відповідають I і V ділянкам (рис. 3.8, 3.10, 3.11, табл. 3.2) –  $R_{УЗ(I \text{ діл.})}^{См}$ ,  $R_{УЗ(V \text{ діл.})}^{См}$ , мм; у ГДСК (рис. 3.18, табл. 3.3) –  $R_{ГДСК}^{См}$ , мм).

**Таблиця 3.4 – Значення резонансного радіуса бульбашок кавітаційних полів, сформованих за допомогою УЗ-випромінювача та у ГДСК**

Значення резонансного радіуса бульбашок кавітаційних полів, розраховані за формулами						
Лапласа, мм	Міннерта, мм			виведеною на основі даних, отриманих Смітом, мм		
$R_L$	$R_{УЗ(I \text{ діл.})}$	$R_{УЗ(V \text{ діл.})}$	$R_{ГДСК}$	$R_{УЗ(I \text{ діл.})}^{См}$	$R_{УЗ(V \text{ діл.})}^{См}$	$R_{ГДСК}^{См}$
0,81	0,86	1,86	0,83	0,87	1,87	0,82

Дані з таблиці 3.4 свідчать, що незалежно від способу формування кавітаційних полів бульбашки досягають резонансних розмірів. Значення резонансного радіуса кавітаційних бульбашок, розрахованих за різними формулами, коливаються в межах  $(0,81...0,87) \cdot 10^{-3}$  м. Виняток становлять значення резонансного радіуса бульбашок кавітаційного поля, збудженого за допомогою УЗ-випромінювача, що відповідають V ділянці (рис. 3.8, 3.11, табл. 3.2). Це зумовлено різним механізмом формування кавітаційних полів у генераторах різних типів (ультразвуковому та гідродинамічному). У кавітаційних полях, збуджених за допомогою УЗ-випромінювача, визначальну роль відіграють сили електростатичного притягання (сили Бьєркнеса), що призводять до коалесценції бульбашок (зростання резонансного радіуса бульбашок до  $1,86 \cdot 10^{-3} \dots 1,87 \cdot 10^{-3}$  м), тоді як у ГДСК наявність вихрових потоків у перехідній зоні спричиняє інтенсивне диспергування можливих агрегатів бульбашок з утворенням величезної кількості окремих бульбашок, що значно підвищує ефективність флотації дисперсних частинок.

Вплив кількості кавітувальних елементів на інтенсивність розвитку кавітаційних полів визначали за зміною амплітуди відносного звукового тиску кавітаційних полів. Величину амплітуди відносного звукового тиску для 3-х сопел приймали за 1. Залежність амплітуди відносного звукового тиску ( $P_{зв}/P_{баз}$ , рази) кавітаційних полів від кількості сопел ( $n$ , од.) за визначених оптимальних кутів атаки струменів і тиску на вході у кавітатор  $0,57 \cdot 10^6$  Па наведена на рис. 3.22.

Встановлено, що максимальне значення амплітуди відносного звукового тиску кавітаційних полів характерне для 5-ти сопел (рис. 3.22). Зі збільшенням кількості сопел від 3-х до 5-ти амплітуда відносного звукового тиску зростає від 1 до 2,24 рази. Подальше збільшення кількості сопел від 5-ти до 7-ми призводить до зменшення амплітуди відносного звукового тиску від 2,24 до 1,26 рази. Отже, результати сонохімічного аналізу розвитку кавітаційних полів

взаємно узгоджуються з результатами калориметричного методу дослідження кавітаційних явищ.

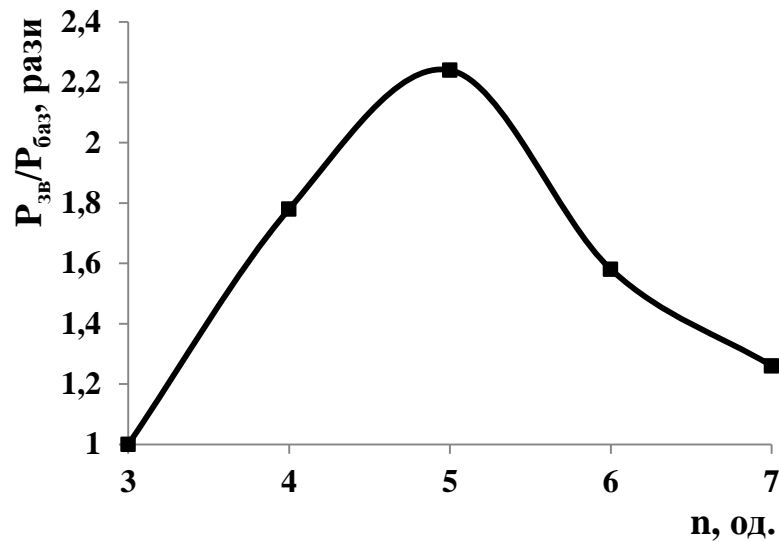


Рис. 3.22. Залежність амплітуди відносного звукового тиску ( $P_{зв}/P_{баз}$ ) від кількості сопел ( $n$ )

Вигляд кавітаційного кластера, утвореного за використання 5-ти сопел для генерування кавітаційних полів у ГДСК, наведено на рис. 3.23.

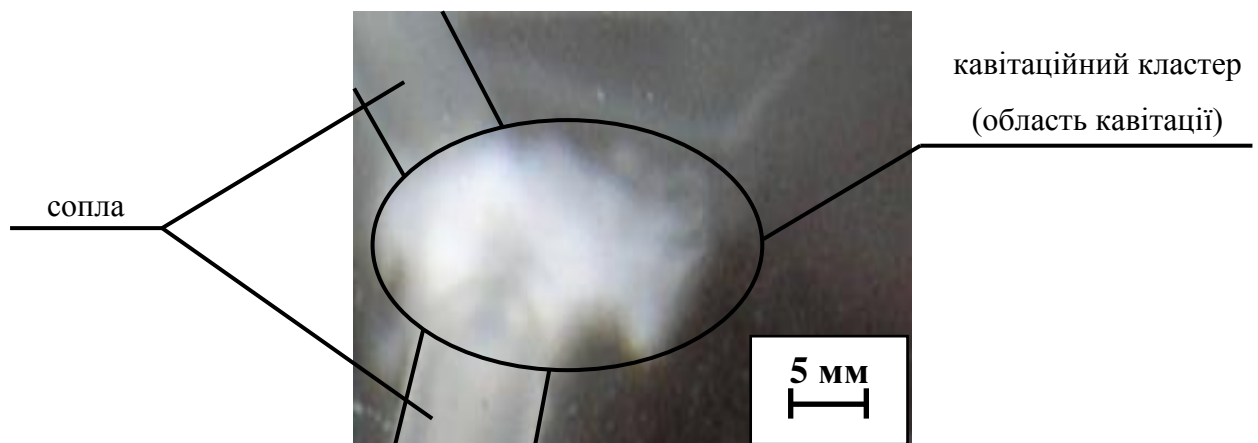


Рис. 3.23. Фотографія кавітаційного кластера, сформованого у ГДСК

Велика кількість та значна дисперсність бульбашок у досліджуваному діапазоні змін параметрів (мінімальний радіус бульбашки  $0,83 \cdot 10^{-3}$  м) у кавітаційних полях, збуджених у ГДСК, зумовлюють формування однорідного,

щільного флотаційного шару за січенням усього апарату. Застосування гідродинамічних кавітаторів забезпечуватиме гнучкість технологічних параметрів (продуктивності, ефективності тощо) запропонованого процесу кавітаційно-флотаційного розділення, зокрема з урахуванням характеристик водного гетерогенного середовища, яке обробляють (в'язкість, густина, вміст дисперсних частинок тощо). Це досягається можливістю цілеспрямованої зміни параметрів (тиску у кавітаторі, кута атаки, кількості сопел, що працюють, тощо) безпосередньо під час роботи ГДСК відповідно до характеристик акустичних сигналів, які фіксуються гідрофоном. Зокрема, тиск у кавітаторі можна змінювати байпасом, кут атаки – за допомогою шарнірного механізму, а кількість сопел, що працюють, – електромагнітними клапанами на вході у них. Розташування кавітувальних елементів може бути будь-яким: вертикальним, горизонтальним, під кутом. Крім того, розмір кавітаційних бульбашок можна регулювати зміною тиску на вході у кавітатор, а потужність струменевих апаратів – застосуванням відповідних насосів.

Вищезазначене переконливо свідчить, що дві стадії процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ можна успішно сумістити в одному апараті – СКФА, а ефективність оброблення і, відповідно, флотації можна регулювати цілеспрямованою зміною технологічних умов процесу кавітаційного оброблення та конструктивних параметрів ГДСК, тобто процес кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ є керованим.

#### **3.4. Дослідження впливу повітря, введеного у воду, на розвиток кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації твердих дисперсних частинок**

Під час дослідження процесу кавітації у гетерогенній системі „вода – тверді дисперсні частинки“ було виявлено ефект флотації цих частинок [162].

Як відомо, розчинені гази, за їх незначного вмісту у рідкій фазі, відіграють роль зародків кавітації. Тому з метою інтенсифікації кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації у водне середовище перед кавітатором вводили незначні кількості повітря (об'ємна витрата повітря –  $(1,5...9) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ). Залежність теплової енергії ( $E$ ), що виділяється внаслідок кавітації, від об'ємної витрати повітря, введеного у воду ( $V$ ), наведено на рис. 3.24.

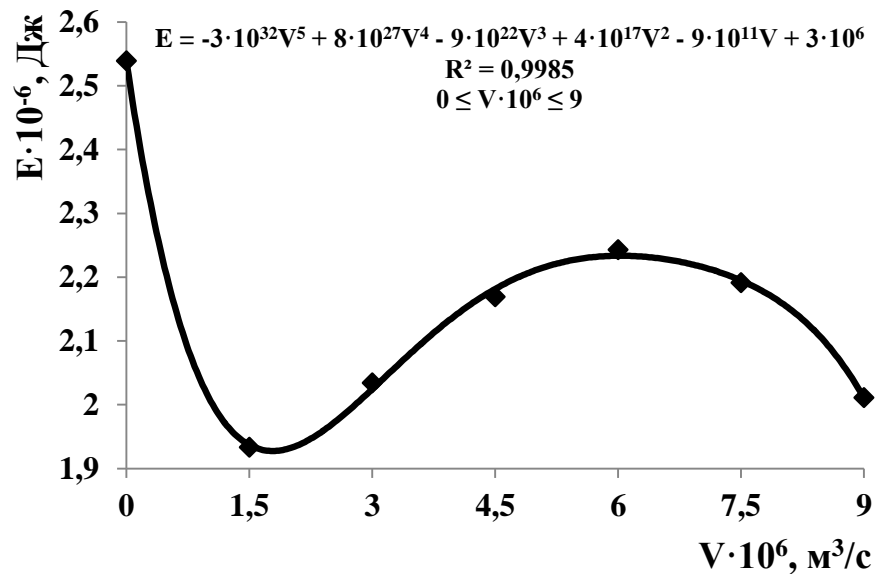


Рис. 3.24. Залежність теплової енергії ( $E$ ) від об'ємної витрати повітря ( $V$ )

Як видно з рис. 3.24, залежність виділеної теплової енергії від об'ємної витрати повітря, введеного у воду, має екстремальний характер. За об'ємної витрати повітря  $0...1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  спостерігали істотне зменшення величини теплової енергії на  $0,606 \cdot 10^6 \text{ Дж}$  (від  $2,539 \cdot 10^6$  до  $1,933 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ ), тобто на 24%. Це зумовлено накопиченням у воді дрібних бульбашок з „великою тривалістю життя“, що не сплескуються [271], й відповідно формуванням режиму „виродженої кавітації“. Подальше збільшення об'ємної витрати повітря (від  $1,5 \cdot 10^{-6}$  до  $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ) призводить до зменшення віддалі між бульбашками та, як наслідок, їх коалесценції. Внаслідок флуктуацій тиску та наявності турбулентних потоків у кавітаторі зростає ймовірність диспергування



утворених бульбашок з подальшим їх сплескуванням, про що й свідчить приріст величини теплової енергії, що становить  $0,31 \cdot 10^6$  Дж. При цьому у кавітаторі формується область, яка характеризується наявністю високодисперсних бульбашок. Саме вони забезпечують ефективну флотацію дисперсних твердих частинок. Хоча за об'ємної витрати повітря  $6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с кількість енергії, що виділяється, є дещо меншою (на 11,7%), ніж за відсутності повітря, формування „флотаційного“ шару (його висота, дисперсність бульбашок, газонаповненість тощо) є значно інтенсивнішим. Подальше збільшення об'ємної витрати повітря до  $9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с призводить до зменшення величини теплової енергії на  $0,232 \cdot 10^6$  Дж (від  $2,243 \cdot 10^6$  до  $2,011 \cdot 10^6$  Дж), що можна пояснити переходом кавітації у „вироджений режим“. У цьому разі зі зростанням об'ємної витрати повітря розміри бульбашок газової фази збільшуються, внаслідок чого ймовірність їх колапсу зменшується.

Локальний екстремум на кривій  $((2,243 \pm 0,011) \cdot 10^6$  Дж), що відповідає об'ємній витраті повітря  $(6 \pm 0,75) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с, відображає найсприятливіші умови для сумісної реалізації кавітаційного оброблення водних середовищ та флотаційного вилучення дисперсної твердої фази як послідовних стадій процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ.

Про доцільність введення повітря у воду свідчать також і дані сонохімічного аналізу. Осцилограми акустичного сигналу кавітаційних полів, сформованих у гідродинамічному кавітаторі з 5-ма соплами (діаметр сопла –  $1,6 \cdot 10^{-3}$  м) за кута атаки струменів 150 град. і тиску на вході у кавітатор  $0,57 \cdot 10^6$  Па як за введення повітря, так і без нього, наведені на рис. 3.25.

Виявлено, що величина акустичного сигналу кавітаційного поля без введення у воду повітря впродовж 900 с оброблення зменшується від -4 до -18 дБ (конусоподібний профіль зміни величини акустичного сигналу, рис. 3.25 а), що відповідає зменшенню величини амплітуди звукового тиску в 5 разів. Тобто кавітація „у часі згасає“ (переходить у „вироджений режим“).

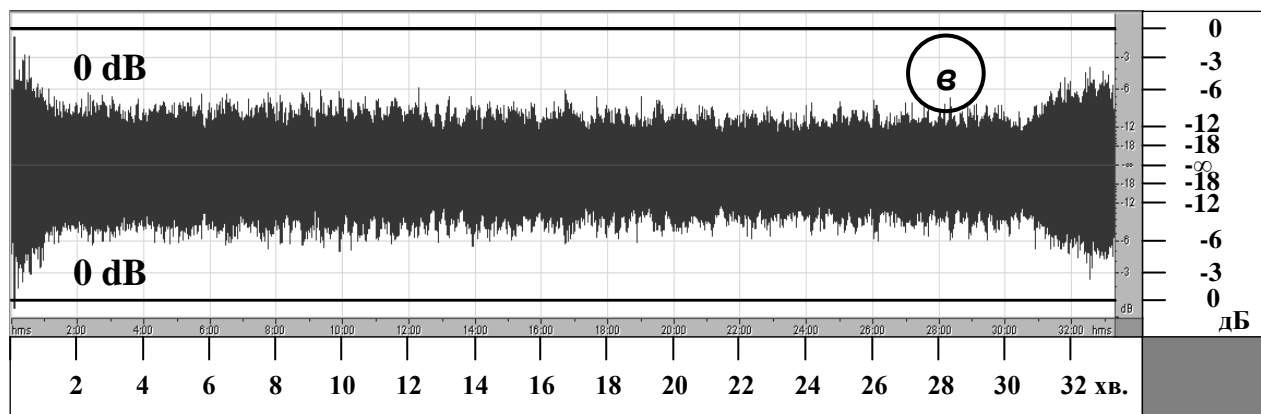
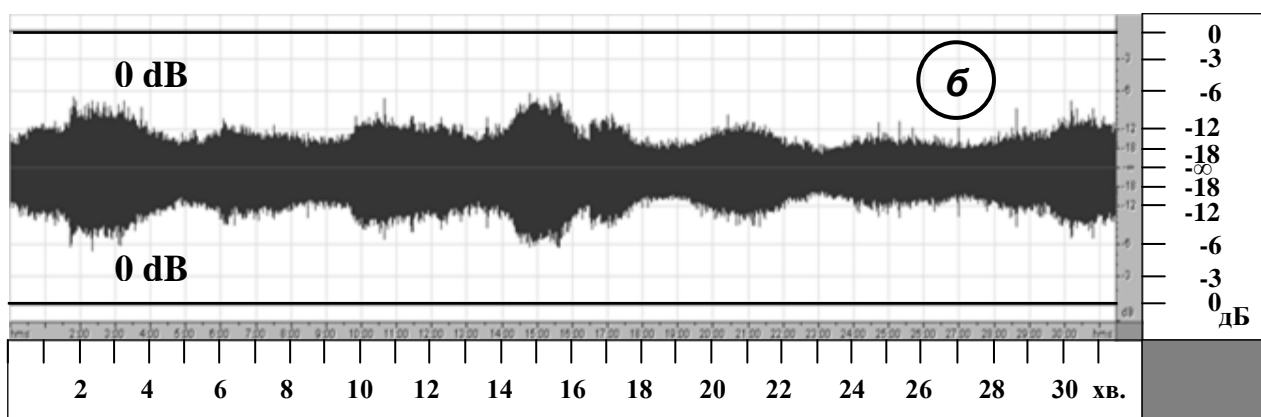
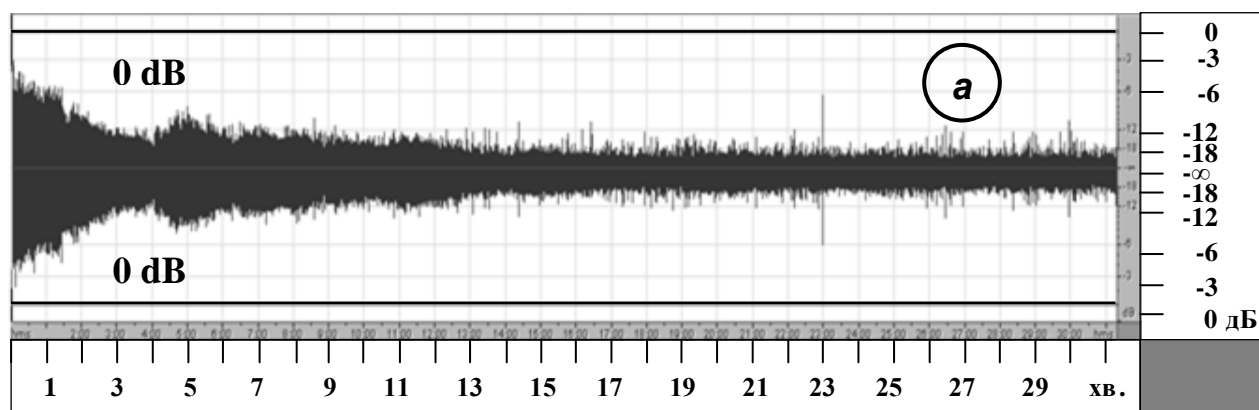


Рис. 3.25. Осцилограми акустичного сигналу кавітаційних полів, сформованих у струменевому кавітаторі, за об'ємної витрати повітря ( $V \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$ ): а – 0; б – 6; в – 9

Введення повітря ( $V = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ), окрім пульсацій синусоїдального характеру (рис. 3.25 б), дає змогу підтримувати усереднене значення величини акустичного сигналу на рівні -12 дБ впродовж усього процесу оброблення. Це відповідає збільшенню величини амплітуди звукового тиску в 2 рази порівняно

із розвитком кавітаційних полів без введення повітря. При цьому розрахований усереднений розмір флотаційних бульбашок, що відповідав значенню резонансної частоти 4250 Гц, становив  $\sim 0,78 \cdot 10^{-3}$  м, що на 6% менше, ніж без введення повітря за оптимальних умов здійснення кавітації.

За об'ємної витрати повітря  $9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с також підтримується усереднене значення величини акустичного сигналу на рівні -12 дБ впродовж усього процесу оброблення. Акустичний сигнал є стабільним (рис. 3.25 в), тобто на осцилограмі немає різких змін величини акустичного сигналу, характерних для осцилограми, що відображає зміну акустичного сигналу кавітаційного поля за об'ємної витрати повітря  $6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с (рис. 3.25 б). Це можна пояснити переходом кавітації у „вироджений режим“ внаслідок накопичення бульбашок великих розмірів (розрахований усереднений розмір флотаційних бульбашок, що відповідав значенню резонансної частоти 1500 Гц, становив  $\sim 2,2 \cdot 10^{-3}$  м), що не сплескуються.

Отже, співставлення результатів калориметричного методу дослідження кавітаційних явищ із результатами сонохімічного аналізу розвитку кавітаційних полів свідчать про їх узгодженість. Це є підставою для використання незначних кількостей повітря, що виконують роль зародків кавітації, для інтенсифікації кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації дисперсних частинок.

### **3.5. Дослідження процесів генерування газів внаслідок кавітаційного оброблення води**

Під час кавітаційного оброблення води спостерігали зростання величини рН та зменшення величини окисно-відновного потенціалу: відповідно від 7,51 до 7,59 та від 225 до 200 мВ – у випадку оброблення УЗ-випромінювачем і до 8,35 та 127 мВ – у випадку оброблення у ГДСК. Вищезазначене переконливо свідчить про десорбцію розчинених у воді газів, зокрема карбону(IV) оксиду, та перебіг реакцій сонолізу води з подальшою рекомбінацією радикалів (радикалів

Гідрогену, Оксигену, гідроксильних груп тощо) з утворенням молекулярних водню та кисню. Тому необхідно було дослідити процес виділення газів із води внаслідок кавітаційного оброблення.

Оскільки гази, що виділяються внаслідок кавітації, неможливо відразу розділити на складові, то вимірювали сумарний об'єм газів. Залежність сумарного об'єму газів ( $\Sigma V$ ), що виділились внаслідок кавітаційного оброблення води, від тривалості оброблення ( $\tau$ ) наведена на рис. 3.26.

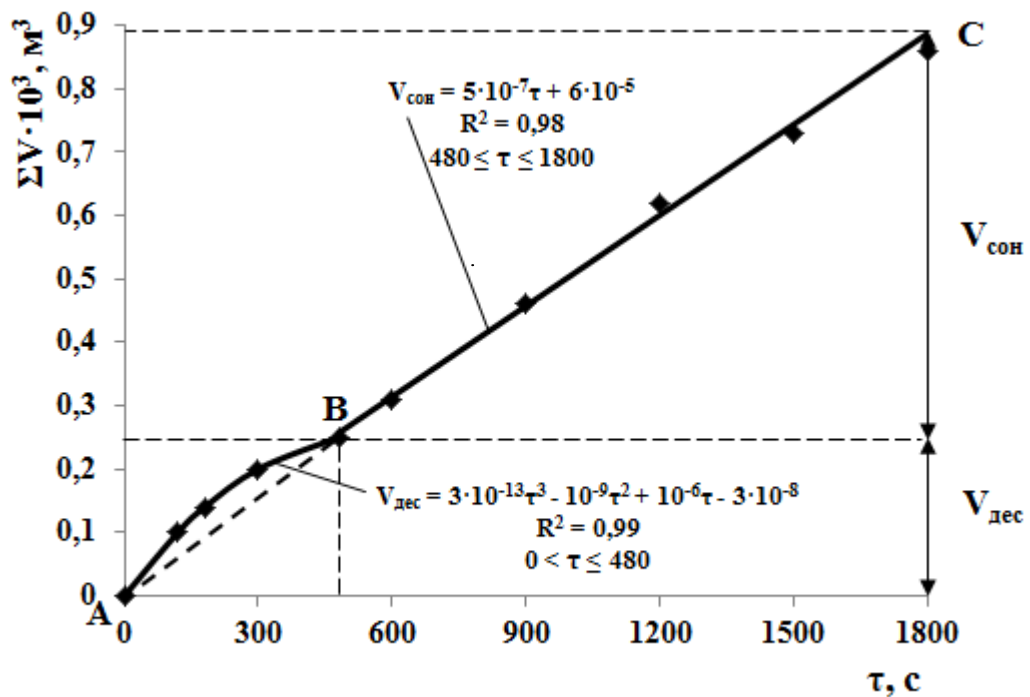


Рис. 3.26. Залежність сумарного об'єму газів ( $\Sigma V$ ), що виділились внаслідок кавітаційного оброблення води, від тривалості оброблення ( $\tau$ )

На кривій AC (рис. 3.26) можна виділити дві ділянки: I) ділянка AB – криволінійний характер зміни сумарного об'єму виділених газів; II) ділянка BC – прямолінійний характер. Виділення газів з води під час її кавітаційного оброблення є результатом процесів десорбції розчинених у ній газів та сонолізу молекул води, що відбуваються одночасно. Для I-ї ділянки (AB), що відповідає тривалості оброблення близько 480 с, характерне збільшення приросту об'єму виділених газів, порівняно з ділянкою BC, що свідчить про переважну

десорбцію розчинених у воді газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  тощо), оскільки для сонолізу необхідні мономолекули води, які утворюються тільки внаслідок руйнування кластерних структур, характерних для неактивованої води. Розраховані об'єми газів, що повинні виділятися внаслідок десорбції за підвищення температури води від 300 до 306 К, становлять для: повітря –  $4,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$  ( $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ N}_2$  і  $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ O}_2$ ), вуглекислого газу –  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Оскільки під час заповнення установки (ГДСК) водою абсорбуються незначні кількості газів, що значно менші від розрахованих теоретично, то й інтенсивність десорбційних процесів також є дуже низькою: виділяється близько  $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  тощо). У випадку відсутності у рідині розчинених газів крива АВ набуває вигляду прямої (штрихова лінія, рис. 3.26).

Практично прямолінійний характер зміни об'єму газів, що виділяються в інтервалі від 480 с до 1800 с кавітаційного оброблення (II-а ділянка – ділянка ВС), вказує на стаціонарність процесу. Зважаючи на те, що вміст розчинених у рідині газів різко зменшився під час кавітації, то прямолінійний характер зміни об'єму виділених газів зумовлений сонолізом води та подальшою рекомбінацією утворених радикалів. За підвищення температури води від 300 до 330 К (адіабатичні умови процесу кавітаційного оброблення) зростає парціальний тиск насиченої водяної пари у кавітаційних бульбашках і, відповідно, у воді. Збільшення парціального тиску насиченої водяної пари призводить до зростання швидкості процесів утворення зародків кавітації, їх росту з утворенням кавітаційних бульбашок та сплескування останніх, що, своєю чергою, інтенсифікує процеси сонолізу молекул води. Однак, необхідно зазначити, що інтенсивність розвитку кавітаційних явищ зі збільшенням тривалості оброблення зменшується, оскільки зменшується загальна кількість розчинених у воді газів, що виконують роль зародків кавітації. Це означає, що полегшення процесів зародкоутворення, зумовлене підвищенням парціального тиску насиченої водяної пари, не компенсує зменшення загальної кількості зародків кавітації, що здатні рости з утворенням кавітаційних бульбашок, адже

з підвищенням температури розмір зародків кавітації різко зменшується. Більшість зародків кавітації не досягають величини резонансного радіуса, яка залежить від усередненого значення резонансної частоти пульсацій уже наявних у середовищі кавітаційних бульбашок та коливань флотаційних бульбашок, і, як наслідок, розчиняються у воді. Об'єм газів, що виділяються переважно внаслідок десорбції розчинених у воді газів ( $V_{\text{дес}}$ ), становить  $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , сонолізу молекул води ( $V_{\text{сон}}$ ) –  $0,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Це свідчить про те, що за 1800 с кавітаційного оброблення води процес десорбції розчинених у ній газів визначає ефективність флотації на 28%, а соноліз молекул води – на 72%. Сумарний об'єм виділених газів –  $0,89 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  щодо  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$  води.

Ефективність флотації дисперсних частинок визначають не тільки розміри флотаційних бульбашок, але й інтенсивність утворення бульбашок в одиниці об'єму рідини. Оскільки об'єм виділених газів ( $\Sigma V$ ,  $\text{м}^3$ ), усереднений радіус флотаційних бульбашок ( $R_{\sigma}$ , м) та параметри флотаційної зони (радіус –  $R_{\text{фл.з}}$ , м; висота –  $H_{\text{фл.з}}$ , м) відомі, то інтенсивність утворення бульбашок ( $C_{\sigma}$ , од./( $\text{с} \cdot \text{м}^3$  флотаційної зони)) можна обчислити за формулою:

$$C_{\sigma} = \frac{\Sigma V}{V_{\sigma} \tau V_{\text{фл.з}}} = \frac{\Sigma V}{\frac{4}{3} \pi R_{\sigma}^3 \tau \pi R_{\text{фл.з}}^2 H_{\text{фл.з}}} = \frac{3 \Sigma V}{4 \pi^2 R_{\sigma}^3 R_{\text{фл.з}}^2 H_{\text{фл.з}} \tau}, \quad (3.17)$$

де  $V_{\sigma} = \frac{4}{3} \pi R_{\sigma}^3$  – об'єм флотаційної бульбашки сфероподібної форми,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{фл.з}} = \pi R_{\text{фл.з}}^2 H_{\text{фл.з}}$  – об'єм флотаційної зони колони, що дорівнює об'єму циліндра,  $\text{м}^3$ ;  $\tau$  – тривалість кавітаційного оброблення, с. За значень (тиску на вході у кавітатор, діаметра сопла, кількості сопел, кута атаки струменів, тривалості кавітаційного оброблення, усередненого радіуса флотаційної бульбашки, радіуса та висоти флотаційної зони), що дорівнюють відповідно ( $0,57 \cdot 10^6$  Па;  $1,6 \cdot 10^{-3}$  м; 5 сопел; 150 град.; 1800 с;  $0,83 \cdot 10^{-3}$  м;  $55 \cdot 10^{-3}$  м; 0,33 м), інтенсивність утворення бульбашок у флотаційній зоні становить:

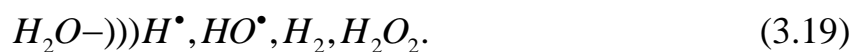
$$C_6 = \frac{3 \cdot 0,89 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14^2 \cdot (0,83 \cdot 10^{-3})^3 \cdot (55 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,33 \cdot 30 \cdot 60} \approx 66000 \text{ од./}(с \cdot м^3). \quad (3.18)$$

Це означає, що впродовж однієї секунди в 1-у м<sup>3</sup> флотаційної зони одночасно перебуває близько 66·10<sup>3</sup> флотаційних бульбашок із середнім радіусом ~ 0,83·10<sup>-3</sup> м, тобто сформований шар є щільним, містить велику кількість дрібнодисперсних бульбашок. Середня газонаповненість цього шару дорівнює 0,05 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

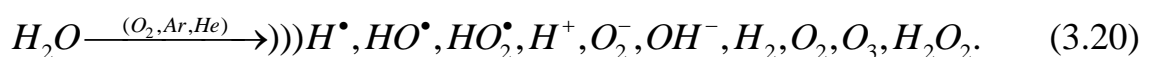
### 3.6. Дослідження процесу утворення сполук окисного характеру під час кавітації

Під час гідродинамічної кавітації відбувається руйнування водневих зв'язків, що призводить до деструктування каркасу води і клатратних комплексів навіть до однієї молекули води [272]. У кавітаційних полях мономолекули води розкладаються з утворенням високоактивних частинок (радикалів, атомів, сполук окисного та відновного характерів тощо) – відбувається процес сонолізу молекул води.

Відповідно до гіпотези Маргуліса-Мальцева розкладання молекул води з утворенням первинних продуктів відбувається за такою схемою [273]:



Вода належить до відкритих систем, тобто може обмінюватись із зовнішнім середовищем енергією і речовиною. За наявності в атмосфері кисню та інертних газів сумарний процес сонолізу описують такою схемою [274]:



Важливе значення під час розділення водних гетерогенних середовищ мають продукти сонолізу молекул води, що виявляють властивості окисників (O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> тощо). Газоподібні сполуки окисного характеру, насамперед

кисень, абсорбуються водою. Під час кавітації встановлюється динамічна рівновага між процесами абсорбції і десорбції сполук окисного характеру. Позитивними аспектами генерування сполук окисного характеру у кавітаційних полях внаслідок сонолізу молекул води є підвищення ймовірності деструкції органічних забруднювачів та ефективності процесу флотації внаслідок їх десорбції з рідкої фази.

З огляду на вищесказане, доцільно дослідити процеси утворення сполук окисного характеру (кисню, гідрогену пероксиду тощо), які утворюються під час кавітаційного оброблення деоксигенованої води.

Встановлено, що значення ступенів насичення попередньо деоксигенованої води киснем за ізотермічних та адіабатичних умов відрізняються незначно ( $\pm 0,5\%$ ) і не залежать від величини тиску на вході у кавітатор. Це пов'язано з тим, що первинні продукти сонолізу генеруються всередині кавітаційних бульбашок, де значення тиску коливаються в межах  $10^8 \dots 10^9$  Па, і дифундують у воду тільки після їх сплескування. Тому далі зміну ступеня насичення деоксигенованої води киснем внаслідок перебігу кавітаційних явищ характеризуватимемо на прикладі адіабатичних умов, притаманних для промислового здійснення процесів флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ.

Залежності ступеня насичення води киснем ( $\theta$ , % від максимально можливого за відповідних умов (температури води, атмосферного тиску та солевмісту (іонної сили))), утвореним внаслідок сонолізу молекул води під час кавітації, від тривалості кавітаційного оброблення ( $t$ , с) за різного вмісту введеного у воду повітря наведені на рис. 3.27.

Із рис. 3.27 видно, що ступінь насичення води киснем за рахунок сонолізу її молекул у кавітаційних полях впродовж 1800 с становить 72,69% від максимально можливого. Збільшення об'ємної витрати повітря, введеного у воду, від 0 до  $6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с (від 0 до 2% об.) зумовлює зростання ступеня насичення на 11,24% (від 72,69 до 83,93%). Подальше збільшення вмісту



повітря не спричиняє істотного зростання ступеня насичення – зростає всього на 1,24% (від 83,93 до 85,17%). Це пов'язано із встановленням абсорбційно-десорбційної рівноваги у системі “рідина – газ” за відповідної температури рідини (рис. 3.28). Тому доцільно вводити повітря у кількості 2% щодо об'єму водного середовища.

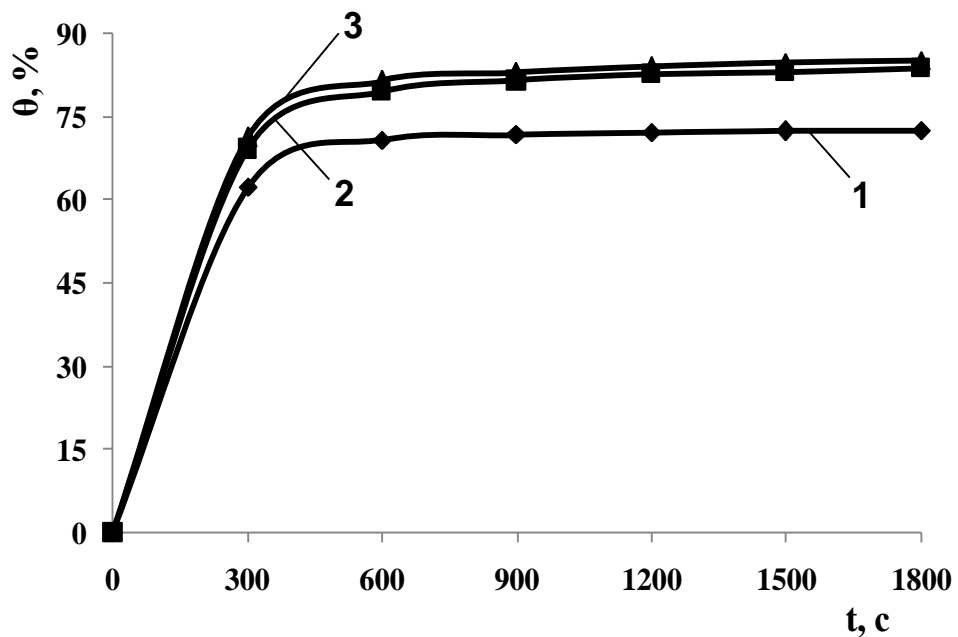


Рис. 3.27. Залежності ступеня насичення води киснем ( $\theta$ ) від тривалості кавітаційного оброблення ( $t$ );  
вміст введеного у воду повітря (% об.): 1 – 0; 2 – 2; 3 – 3

Для керування ефективністю процесів окиснення дисперсних частинок органічної природи та флотації різного роду забруднювачів (як неорганічних, так і органічних) під час їх здійснення у промисловому масштабі велике значення має визначення аналітичного вигляду функційної залежності впливу кількості введеного у воду повітря та кратності кавітаційного оброблення на ступінь її насичення киснем. Тому необхідно побудувати статистичну модель, яка б пов'язувала результативну величину (ступінь насичення води киснем) з параметрами процесу (кількістю введеного у воду повітря та кратністю

кавітаційного оброблення). Оскільки на основі попередньо виконаних досліджень встановлено, що збільшення вмісту введеного у воду повітря понад 2% об. не спричиняє істотного зростання ступеня насичення, то область варіювання вмісту повітря знаходитиметься в межах 0...2% об.

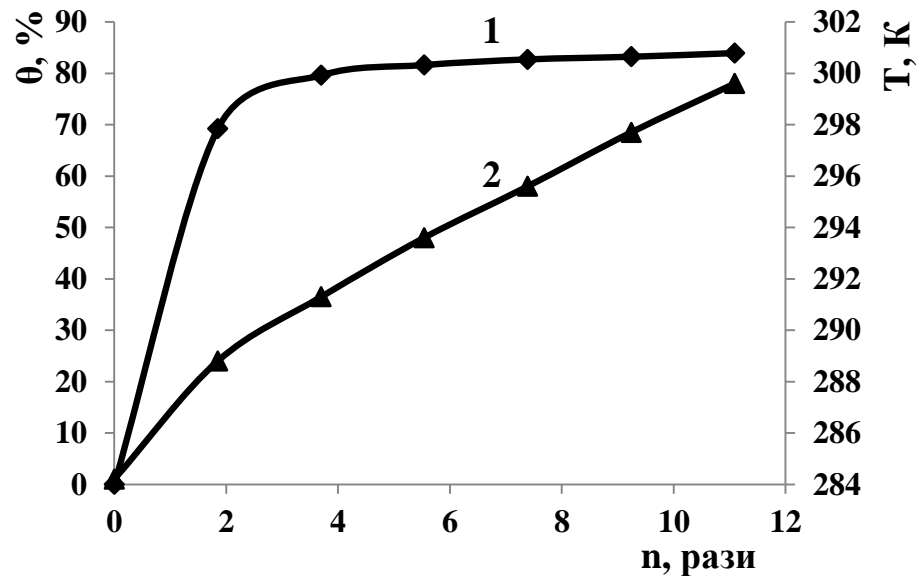


Рис. 3.28. Залежність ступеня насичення води киснем ( $\theta$ ) (1) і температури води ( $T$ ) (2) від кратності кавітаційного оброблення ( $n$ );  
вміст введеного у воду повітря (% об.): 2

Пошук оптимальних параметрів процесу насичення деоксигенованої води киснем здійснювали за схемою повнофакторного експерименту (ПФЕ). План-матриця ПФЕ типу  $2^2$  у натуральному та кодованому вигляді (кількість паралельних дослідів – 2) представлена у таблицях 3.5 і 3.6 відповідно.

Таблиця 3.5 – План-матриця ПФЕ типу  $2^2$  у натуральному вигляді

Рівні факторів та інтервали варіювання	$x_1$ ( $C_{нов}$ , % об.)	$x_2$ ( $n$ , рази)
Нульовий рівень ( $x_i = 0$ )	1	6,47
Інтервал варіювання ( $\Delta x_i$ )	1	4,62
Нижній рівень ( $x_i = -1$ )	0	1,85
Верхній рівень ( $x_i = +1$ )	2	11,09

Таблиця 3.6 – План матриця ПФЕ типу  $2^2$  у кодованому вигляді

№ досліджу	$x_0$	Фактори		Член парної взаємодії ( $x_1x_2$ )	Функція відгуку		
		$x_1$	$x_2$		$y_1$	$y_2$	$y_{сер}$
1	+1	-1	-1	+1	60,57	64,09	62,33
2	+1	-1	+1	-1	70,25	75,13	72,69
3	+1	+1	-1	-1	67,09	71,33	69,21
4	+1	+1	+1	+1	82,87	84,99	83,93

Для 4-ох дослідів і двох дублів (кількість паралельних дослідів) за вибраних величин довірчої ймовірності  $p = 0,95$ , кількостей дослідів  $k = 4$  і ступенів свободи  $\nu = m-1 = 2-1 = 1 - G_T = 0,9065$ . Розрахункове значення критерію Кохрена

$$G = \frac{5,9536}{14,6692} = 0,4059. \quad (3.21)$$

Оскільки  $G < G_T = 0,4059 < 0,9065$ , то дисперсії однорідні.

Обчисливши коефіцієнти рівняння регресії, отримали статистичну модель у кодованому вигляді

$$y = 72,04 + 4,53x_1 + 6,27x_2 + 1,09x_1x_2. \quad (3.22)$$

Величина довірчого інтервалу становить

$$\Delta b = \pm \left| 3,182 \cdot \sqrt{\frac{3,6673}{4 \cdot 2}} \right| = \pm 2,154, \quad (3.23)$$

де 3,182 – табличне значення t-критерію Стьюдента за вибраних величин довірчої ймовірності  $p = 0,95$  і кількості ступенів свободи  $\nu = N - 1 = 4 - 1 = 3$ ; 3,6673 – дисперсія відтворюваності.

Порівнявши коефіцієнти рівняння регресії (3.22) з величиною довірчого інтервалу (3.23), відкидаємо ті з них, які за модулем менші, ніж величина

довірчого інтервалу. Остаточний вигляд рівняння регресії у кодованих значеннях змінних

$$y = 72,04 + 4,53x_1 + 6,27x_2. \quad (3.24)$$

Здійснивши перехід від кодованих значень змінних до натуральних і звівши подібні члени, отримали регресійне рівняння, що описує статистичну модель процесу кавітаційного насичення деоксигенованої води киснем

$$\theta = 58,73 + 4,53C_{нов} + 1,36n. \quad (3.25)$$

Адекватність рівняння регресії (3.25) перевіряли за критерієм Фішера. Розрахункове значення критерію Фішера

$$F = \frac{9,5092}{3,6673} = 2,59. \quad (3.26)$$

Табличне значення критерію Фішера для вибраного рівня значущості  $\alpha = 0,05$ , кількості значущих коефіцієнтів ( $l = 3$ ) і чисел ступенів свободи  $f_1 = N - 1 = 4 - 3 = 1$  і  $f_2 = N(m-1) = 4(2-1) = 4$  становить 7,71 [253].  $F < F_T = 2,59 < 7,71$  – отже, рівняння регресії (3.25) адекватно відтворює результати експерименту.

У таблиці 3.7 подано результати серії дослідів згідно з матрицею планування ПФЕ і обчислені відхилення експериментальних значень функції відгуку від розрахованих за отриманим рівнянням регресії (3.25).

**Таблиця 3.7 – Розширена матриця планування ПФЕ типу  $2^2$  процесу кавітаційного насичення киснем деоксигенованої води**

№ дослідів	Фактори		Ступінь насичення, % від макс.		Відхилення, %
	$C_{пов}$ , % об.	n, рази	$\theta_{експ}$	$\theta_{розр}$	
1	0	1,85	62,33	61,25	1,73
2	0	11,09	72,69	73,81	1,54
3	2	1,85	69,21	70,31	1,59
4	2	11,09	83,93	82,87	1,26

Для успішного перебігу процесів окиснення органічних сполук та флотації дисперсних частинок необхідно досягнути якнайбільшого ступеня насичення води киснем. У зв'язку з цим, необхідно встановити область максимуму функції відгуку (3.25). На рис. 3.29 наведена тривимірна діаграма залежності ступеня кавітаційного насичення деоксигенованої води киснем ( $\theta$ , % від максимально можливого за відповідних умов (температури води, атмосферного тиску та солевмісту (іонної сили))) від кількості введеного у воду повітря ( $C_{\text{пов}}$ , % об.) та кратності кавітаційного оброблення ( $n$ , рази).

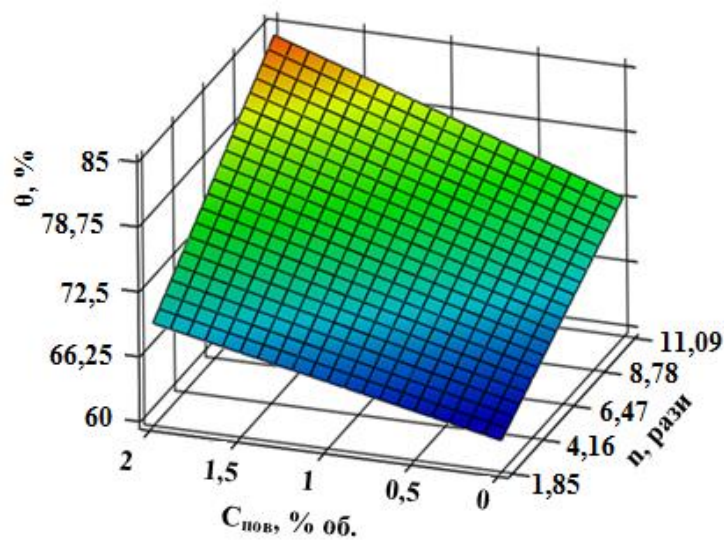


Рис. 3.29. Тривимірна діаграма залежності  $\theta = f(C_{\text{пов}}, n)$

Із рис. 3.29 видно, що оптимальні умови процесу кавітаційного насичення деоксигенованої води киснем знаходяться в площині значень кількості введеного у воду повітря – 1,6...2% об., кратності кавітаційного оброблення – 9...11.

Окрім кисню, під час кавітації генеруються інші сполуки окисного характеру ( $HO^\bullet, HO_2^\bullet, O_2^-, O_3, H_2O_2$  тощо), сумарний вміст яких можна визначити як різницю між ступенем насичення води киснем та іншими сполуками окисного характеру, визначеним методом йодометричного титрування за Вінклером ( $\theta_{\text{Вінкл}}$ , % від макс.), і ступенем насичення води киснем, виміряним за допомогою киснеміра EZODO 7031 ( $\theta_{O_2}$ , % від макс.) (табл. 3.8).

Необхідно зазначити, що наведені в табл. 3.8 ступені насичення води є рівноважними, оскільки разом з утворенням сполук окисного характеру відбувається як їх часткова десорбція (як у випадку  $O_2$ ), так і деструкція (наприклад,  $O_3$  і  $H_2O_2$ ).

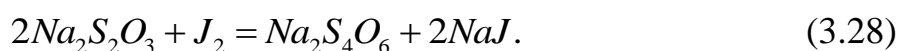
Таблиця 3.8 – Значення ступеня насичення води сполуками окисного характеру залежно від тривалості кавітаційного оброблення

Тривалість кавітаційного оброблення, с	Ступінь насичення води:			Масова частка:	
	сполуками окисного характеру ( $\theta_{Вінкл}$ ), % від макс.	киснем ( $\theta_{O_2}$ ), % від макс.	іншими сполуками окисного характеру ( $\theta_{ін.сн} = \theta_{Вінкл} - \theta_{O_2}$ ), % від макс.	кисню ( $\omega_{O_2}$ ), %	інших сполук окисного характеру ( $\omega_{ін.сн}$ ), %
300	39,48	39,48	0	100,00	0
600	66,13	66,13	0	100,00	0
900	71,65	71,65	0	100,00	0
1200	74,49	72,17	2,32	96,89	3,11
1500	80,76	72,37	8,39	89,61	10,39
1800	87,28	72,69	14,59	83,28	16,72

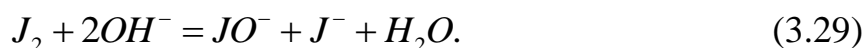
Із таблиці 3.8 видно, що зі збільшенням тривалості кавітаційного оброблення від 900 до 1800 с частка кисню ( $\omega_{O_2}$ ) зменшується на 16,72% (від 100 до 83,28%). Одночасно зростає частка інших сполук окисного характеру ( $\omega_{ін.сн}$ ). Відсутність інших сполук окисного характеру впродовж початкових 900 с оброблення можна пояснити низькою чутливістю методу Вінклера (дає змогу визначати наявність кисню та інших сполук окисного характеру за їх вмісту не менше 0,2 мг/дм<sup>3</sup>) [275].

Типовим продуктом рекомбінації радикалів, що утворюються внаслідок сонолізу молекул води, є гідрогену пероксид. У наявних джерелах інформації [193, 194, 273, 276] містяться суперечливі дані щодо утворення гідрогену пероксиду за різних умов (в атмосфері кисню, інертних газів тощо). Крім того, можуть суттєво відрізнитись результати різних методів визначення вмісту гідрогену пероксиду у воді. Як правило, для визначення вмісту гідрогену

пероксиду у воді застосовують метод зворотнього йодометричного титрування (титрант – натрію тіосульфат) [276], який ґрунтується на взаємодії окисника з калію йодидом у кислому середовищі та титриметричному визначенні утвореного йоду:



Недоліками методу є: низька швидкість взаємодії окисника з калію йодидом, що збільшує тривалість визначення; леткість  $J_2$ , що призводить до втрат під час визначення; можливість перебігу у лужному середовищі побічних реакцій, що спотворюють результати визначення. Останній фактор є найважливішим, оскільки внаслідок кавітації величина рН середовища зростає, що зумовлює перебіг побічної реакції з утворенням йодиду та гіпойодиту



Тому необхідно дослідити генерування гідрогену пероксиду в кавітаційних полях і визначити його вміст методом, який є надійнішим і точнішим, порівняно з методом зворотнього йодометричного титрування.

Ймовірний механізм синтезу гідрогену пероксиду включає такі стадії:

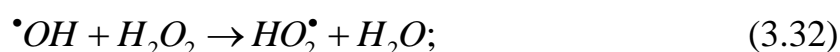
1) соноліз (розкладання) молекул води у кавітаційних полях з утворенням гідроксильних радикалів та атомарного Гідрогену:



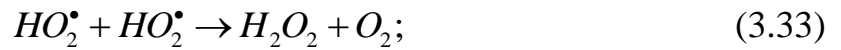
2) рекомбінацію гідроксильних радикалів з утворенням гідрогену пероксиду:



3) взаємодію гідроксильних радикалів з гідрогену пероксидом з утворенням пероксидних радикалів та води:



4) рекомбінацію пероксидних радикалів з утворенням гідрогену пероксиду та молекулярного кисню:



5) взаємодію атомарного Гідрогену з пероксидними радикалами з утворенням гідрогену пероксиду:



Залежності концентрації гідрогену пероксиду ( $C_{H_2O_2}$ ) в обробленій воді від тривалості кавітаційного оброблення ( $t$ ) для УЗ-випромінювача та ГДСК наведено на рис. 3.30.

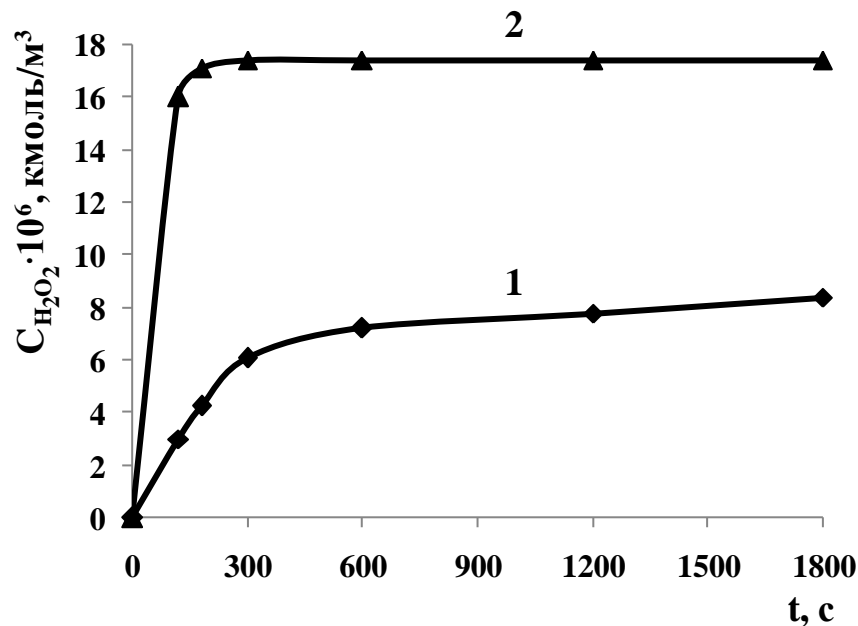


Рис. 3.30. Залежності концентрації гідрогену пероксиду ( $C_{H_2O_2}$ ) від тривалості кавітаційного оброблення проб води ( $t$ ):

1 – УЗ-випромінювачем; 2 – у ГДСК

Як видно з рис. 3.30, накопичення гідрогену пероксиду у пробах води, оброблених УЗ-випромінювачем та у ГДСК, є різним. Впродовж перших 300 с вміст гідрогену пероксиду у пробі, обробленій УЗ-випромінювачем, зростає від 0 до  $6,09 \cdot 10^{-6}$  кмоль/м<sup>3</sup>. За аналогічний проміжок часу вміст гідрогену пероксиду у пробі, обробленій у ГДСК, становить  $17,41 \cdot 10^{-6}$  кмоль/м<sup>3</sup>, що у 2,86 рази більше, ніж в УЗ-випромінювачі. Впродовж наступних 1500 с (період –



300...1800 с кавітаційного оброблення) вміст  $\text{H}_2\text{O}_2$  у пробі, обробленій у ГДСК, не змінюється, а в пробі, обробленій УЗ-випромінювачем, зростає на  $2,32 \cdot 10^{-6}$  кмоль/м<sup>3</sup> (на 38%) (від  $6,09 \cdot 10^{-6}$  до  $8,41 \cdot 10^{-6}$  кмоль/м<sup>3</sup>). Це зумовлено більшими швидкістю руйнування водневих зв'язків між молекулами води у кластерах та інтенсивністю процесу сонолізу в ГДСК.

Порівняння вмісту  $\text{H}_2\text{O}_2$  у пробах після 1800 с кавітаційного оброблення свідчить про те, що інтенсивність процесу сонолізу в ГДСК є в 2 рази більшою, ніж за використання УЗ-випромінювача.

### **3.7. Дослідження електрокінетичних характеристик дисперсних частинок кальцію гідроксиду, оброблених у гідродинамічному струменевому кавітаторі**

Серед характеристик, що визначають властивості дисперсних систем, зокрема їх стабільність, найважливішими є електрокінетичні характеристики частинок дисперсної фази [277, 278]. Найчастіше седиментаційну стійкість частинок дисперсної фази оцінюють за величиною електрокінетичного потенціалу. Для розуміння процесів, якими супроводжується кавітаційно-флотаційне розділення водних гетерогенних середовищ, необхідно дослідити зміну електрокінетичного потенціалу дисперсних частинок під час їх оброблення у ГДСК як за введення повітря у водне середовище, так і без нього.

Вплив кавітаційного оброблення на седиментаційну стійкість частинок дисперсної фази вивчали на прикладі суспензії кальцію гідроксиду. Залежності величини електрокінетичного потенціалу ( $\zeta$ ) на межі розділу фаз “флотаційні бульбашки – частинки  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ” від тривалості кавітаційного оброблення ( $t$ ) за введення повітря у водне середовище і без нього наведено на рис. 3.31.

Встановлено, що введення повітря у водне середовище спричиняє зростання величини  $\zeta$ -потенціалу. Максимальне значення  $\zeta$ -потенціалу на межі розділу фаз “бульбашки – частинки  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ” як за введення повітря у

середовище (72 мВ), так і без нього (48 мВ), відповідало тривалості кавітаційного оброблення 900 с. Збільшення тривалості оброблення до 1800 с призводило до зменшення величини  $\zeta$ -потенціалу до 24 мВ у двох випадках. Такий характер залежності електрокінетичного потенціалу від тривалості кавітаційного оброблення можна пояснити диспергуванням частинок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  впродовж перших 900 с оброблення. Як наслідок, величина  $\zeta$ -потенціалу зростала від 12 до 72 мВ (об'ємна витрата повітря –  $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ) і від 12 до 48 мВ (без введення повітря). Це відповідало максимальній седиментаційній стійкості (стабільності) суспензії кальцію гідроксиду.

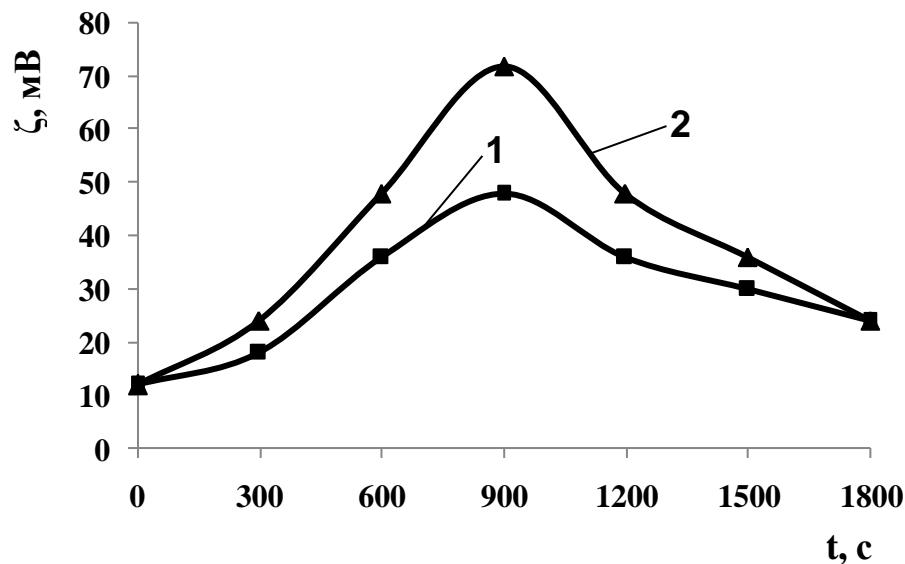


Рис. 3.31. Залежності електрокінетичного потенціалу ( $\zeta$ ) на межі розділу фаз “флотаційні бульбашки – частинки  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ” від тривалості кавітаційного оброблення у ГДСК (t) за об’ємної витрати повітря ( $V \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$ ): 1 – 0; 2 – 6

Додатковий приріст величини  $\zeta$ -потенціалу ( $72 - 48 = 24 \text{ мВ}$ ) за введення повітря у середовище зумовлений дією спрямованих кумулятивних мікроструминок, що виникають внаслідок сплескування бульбашок повітря біля поверхонь частинок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  під впливом градієнтів тиску. Однак, зростання седиментаційної стійкості суспензії можливе лише за диспергування частинок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  до певної межі, що відповідає тривалості оброблення 900 с.

За подальшого оброблення за величин  $\zeta$ -потенціалу частинок дисперсної фази понад 40 мВ може виникати так зване “шламове покриття”, під яким доцільно розуміти дуже дрібні частинки  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , що блокують поверхню бульбашок. На користь утворення “шламового покриття” свідчить той факт, що лише 1/30 частка молекул води, що володіють дипольним моментом  $6 \cdot 10^{-30}$  Кл·м, у поверхневому мономолекулярному шарі орієнтуються негативним полюсом до поверхні бульбашки, що заряджена позитивно [194]. Решта молекул “вільним негативним полюсом” орієнтуються в бік рідкої фази і взаємодіють з позитивно зарядженими частинками  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  внаслідок дії сил електростатичного притягування.

Вищезазначене призводить до накопичення на поверхні бульбашок дрібнодисперсних частинок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і, як наслідок, – до осідання утворених агрегатів. Тобто момент утворення “шламового покриття” можна розглядати як момент досягнення “порогу коагуляції”.

Отже, для досягнення високого ступеня розділення водних гетерогенних середовищ тривалість оброблення слід обмежити у діапазоні 600...1200 с (так званий “оптимальний час оброблення”).

### Висновки до розділу

На підставі виконаних досліджень можна сформулювати такі висновки:

1) оптимальні умови для здійснення процесу кавітаційного оброблення води знаходяться в площині значень тиску на вході у кавітатор –  $(0,54 \dots 0,6) \cdot 10^6$  Па, діаметра сопла –  $(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$  м, кількості сопел – 4...5, кута атаки струменів – 144...170 град. За таких умов величина теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, є більшою  $2,5 \cdot 10^6$  Дж;

2) структура кавітаційних полів, сформованих за допомогою УЗ-випромінювача та у ГДСК, відрізняється. Кавітаційні поля, збуджені за допомогою УЗ-випромінювача, містять бульбашки, які під дією сил Бьєркнеса

об'єднуються в агрегати (бульбашки II-го покоління), що локалізовані лише під поверхнею магнітостриктора. У ГДСК спостерігали формування 3-ох зон – кавітаційної (з радіусом бульбашок близько  $1,87 \cdot 10^{-3}$  м), перехідної, для якої характерна наявність вихрових потоків, та флотаційної, яка містила велику кількість дрібнодисперсних бульбашок з радіусом  $0,83 \cdot 10^{-3}$  м. Тому для реалізації процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ кавітаційні поля доцільно генерувати у ГДСК;

3) для інтенсифікації кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації дисперсних частинок у водні середовища необхідно вводити незначні кількості повітря (об'ємна витрата повітря –  $6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с);

4) у кавітаційних полях внаслідок сонолізу молекул води утворюються кисень та інші сполуки окисного характеру, що підвищують ймовірність деструкції дисперсних частинок органічної природи та ефективність процесу флотації внаслідок їх десорбції з рідкої фази;

5) існує оптимальна, експериментально визначена, тривалість кавітаційного оброблення, яка становить 600...1200 с від початку оброблення;

6) основні результати експериментальних досліджень, наведені у даному розділі, опубліковано у [7-21], [24-28].

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КАВІТАЦІЙНО-ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ ВОДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ

Наведені у попередньому розділі дані, що відображають основні фізико-хімічні закономірності процесів, що відбуваються під час кавітаційного оброблення водних середовищ (оптимальний енергетичний режим оброблення; структуру кавітаційних полів, сформованих за допомогою генераторів різних типів – УЗ-випромінювача та ГДСК; інтенсифікувальний вплив незначних кількостей повітря на розвиток кавітаційних явищ та супутній їм ефект флоатації дисперсних частинок; особливості процесів генерування кисню та інших сполук окисного характеру), є підставою для апробації кавітаційно-флоатаційного процесу під час розділення дисперсних систем з водним дисперсійним середовищем.

Об'єми водних гетерогенних середовищ, типових відходів різноманітних промислових процесів (збагачення руд, діяльності підприємств харчової, переробної галузей тощо), є значними. Крім того, полікомпонентність та нестационарність складу таких середовищ утруднює дослідження процесів відділення дисперсної фази від дисперсійного середовища. Тому дослідження процесів кавітаційно-флоатаційного розділення водних гетерогенних середовищ виконували на прикладах систем, дисперсна фаза яких містила лише один компонент, – пульп сірчаної і лангбейнітової руд, суспензій нерозчинного залишку і каоліну, рідких відходів шкіряних виробництв, що містили натрію оксалат. З метою інтенсифікації кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флоатації дисперсних частинок у водні середовища перед кавітатором вводили повітря (об'ємна витрата повітря –  $6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с). Для досягнення високого ступеня кавітаційно-флоатаційного розділення у кожному випадку підбирали реагентний режим.

#### 4.1. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного розділення пульпи під час збагачення сірчаної руди

Флотаційне збагачення є типовим процесом у різних галузях промисловості (металургійній, паливній, переробній тощо). Тому апробація запропонованого процесу кавітаційно-флотаційного розділення на прикладі збагачення сірчаної руди дає можливість оцінити його ефективність загалом і спрогнозувати доцільність його застосування в інших технологіях.

Флотацію сірчаних руд застосовують для перероблення (збагачення) сировини родовищ, для яких не підходить метод Фраша [279]. Текстура руд таких родовищ є дисперсною, а вміст сірки, як правило, не перевищує 10...20% мас.

Стадія підготовки руди до флотації передбачала тонке подрібнення сірчаної руди у кульовому млині, оскільки розкриття основної маси пустої породи відбувається внаслідок подрібнення руди до  $-3 \cdot 10^{-4}$  м. Фракційний склад розмеленої руди з Роздольського родовища наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Фракційний склад розмеленої руди Роздольського родовища

Клас, м	Вміст, %
$> 1 \cdot 10^{-3}$	14,4
$(1 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$	22,6
$(0,5 \dots 0,25) \cdot 10^{-3}$	33,9
$< 0,25 \cdot 10^{-3}$	29,1
Всього	100,0

Як відомо, ефективність процесу флотаційного збагачення руд і, відповідно, розділення водних гетерогенних середовищ залежить від масового співвідношення твердої та рідкої фаз [280]. Чим більша густина пульпи, тим більший вміст основного продукту у флотоконцентраті. У праці [279] зазначено, що під час флотації сірки із руд масова частка твердої фази у пульпі становить зазвичай 16...25%, а під час здійснення перечисних операцій – знаходиться в межах 6...10 або 10...15%. Під час дослідження збагачення

сірчаної руди із використанням запропонованого кавітаційно-флотаційного процесу масове співвідношення твердої та рідкої фаз у пульпі сірчаної руди становило  $T:P = 1:5$ .

Для створення ефективного режиму флотації у пульпу вводили флотореагенти. Особливості реагентного режиму флотації сірчаної руди наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Реагентний режим процесу флотації сірчаної руди

Флотореагенти	Призначення	Витрата, кг/кг руди
Гас	колектор	$3 \cdot 10^{-4}$
Соснова олія	піноутворювач	$7,5 \cdot 10^{-5}$
Крохмаль (1 %-ий розчин)	пригнічувач	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Силікатний клей	пригнічувач	$10^{-3}$
Кальцинована сода	регулятор рН	$10^{-3}$

Вміст сірки у вихідній руді становив 19,8% мас. Залежність вмісту сірки у флотоконцентраті ( $C_S$ ) від об'ємної витрати повітря ( $V$ ), введеного у водне середовище, наведено на рис. 4.1.

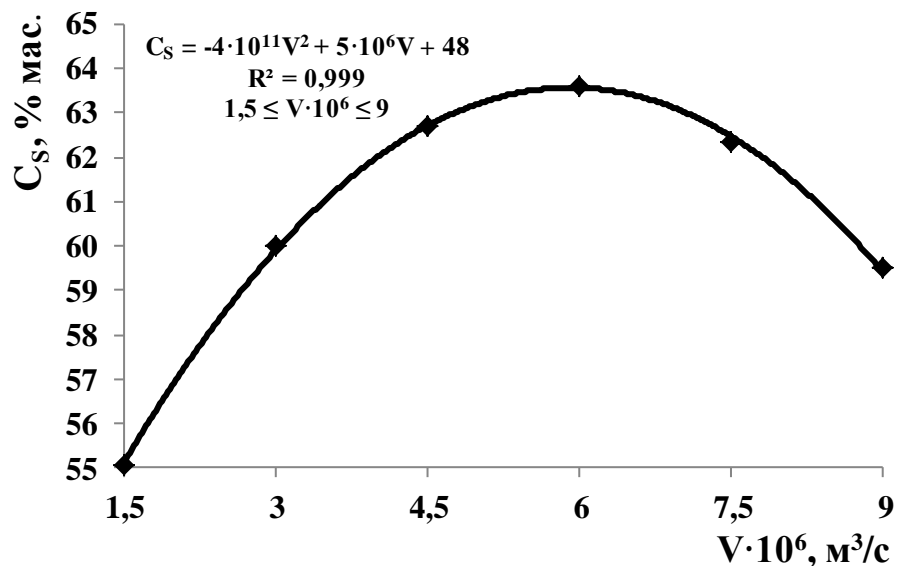


Рис. 4.1. Залежність вмісту сірки у флотоконцентраті ( $C_S$ ) від об'ємної витрати повітря ( $V$ )

Максимального коефіцієнта збагачення сірчаної руди (відношення вмісту сірки у флотоконцентраті до її вмісту у вихідній руді), що дорівнював 3,21, досягали у випадку кавітаційного оброблення за тиску на вході у кавітатор  $5,7 \cdot 10^5$  Па та об'ємної витрати введеного у водне середовище повітря  $6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с. Саме за такої витрати повітря інтенсивність ерозійної дії кумулятивних струменів, що утворюються внаслідок сплескування кавітаційних бульбашок, на ступінь розкриття зерен руди і, відповідно, подрібнення частинок пустої породи є максимальною. Без введення повітря утворення флотоконцентрату практично не спостерігали.

З метою порівняння ефективності запропонованого кавітаційно-флотаційного процесу з традиційним флотаційним збагаченням здійснювали флотацію сірчаної руди у пневмомеханічній флотомашині “Механобр” за аналогічних умов. Порівняльну характеристику ефективності двох методів збагачення сірчаної руди (кавітаційної та пневматичної флотації) наведено у таблиці 4.3.

**Таблиця 4.3 – Показники ефективності кавітаційно-флотаційного та пневматичного методів збагачення сірчаної руди**

Метод збагачення сірчаної руди	Вміст сірки у флотоконцентраті, % мас.	Коефіцієнт збагачення сірчаної руди
Кавітаційна флотація	63,6	3,21
Пневматична флотація	38,4	1,94

Із таблиці 4.3 видно, що ефективність збагачення сірчаної руди кавітаційно-флотаційним методом є в 1,65 рази більшою, ніж за використання пневматичної флотації.

Отримані результати дають підстави очікувати, що застосування процесу кавітаційно-флотаційного розділення буде ефективним у разі збагачення руд металів, в яких корисний компонент є закапсульованим в об'ємі пустої породи.



#### **4.2. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії, що утворюється при очищенні відхідних газів печей прожарювання пасти метатитанової кислоти від SO<sub>2</sub>**

Під час прожарювання пасти метатитанової кислоти у виробництві пігментного титану(IV) оксиду утворюються відхідні гази, які, крім пилоподібних частинок TiO<sub>2</sub>, містять шкідливі компоненти (сульфуру(IV) оксид, туман сульфатної кислоти, нітрогену оксиди, гідрогену хлорид), а тому потребують очищення.

Для очищення відхідних газів від кислих компонентів, зокрема SO<sub>2</sub>, використовують розчин кальцинованої соди. Відпрацьований поглинальний розчин містить переважно Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>. Під час його регенерації суспензією Ca(OH)<sub>2</sub> на частинках кальцію гідроксиду утворюється малорозчинний кальцію сульфід, який блокує їх поверхню, що зменшує ступінь використання реагенту. Окрім того, утворена суспензія характеризується високою седиментаційною стійкістю. Для збільшення ступенів використання Ca(OH)<sub>2</sub> і окиснення CaSO<sub>3</sub>, а також підвищення ефективності розділення суспензії процес регенерації запропоновано здійснювати у кавітаційному полі.

Регенерацію відпрацьованого поглинального розчину, що містив Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> (концентрація – 10 кг/м<sup>3</sup>), здійснювали з використанням стехіометричної кількості Ca(OH)<sub>2</sub> у ГДСК. Концентрацію утвореного кальцію сульфід у перерахунку на іони SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> у реакційному середовищі визначали йодометричним методом. З метою порівняння ефективності окиснення у різних апаратах аналогічний процес здійснювали у реакторі з лопатевою мішалкою (Re<sub>m</sub> ≥ 10<sup>4</sup>). Результати дослідження регенерації відпрацьованого поглинального розчину наведені на рис. 4.2.

Із рис. 4.2 а видно, що процес окиснення іонів SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> до SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> відбувається інтенсивніше у ГДСК. Так, концентрація іонів SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> у ГДСК впродовж 600 с кавітаційного оброблення знижується від 5,88 до 4,96 кг/м<sup>3</sup>, а у реакторі з

мішалкою – від 5,88 до 5,8 кг/м<sup>3</sup>. Це відповідає досягненню ступенів окиснення 15,65% у ГДСК та 1,36% у реакторі з мішалкою (рис. 4.2 б).

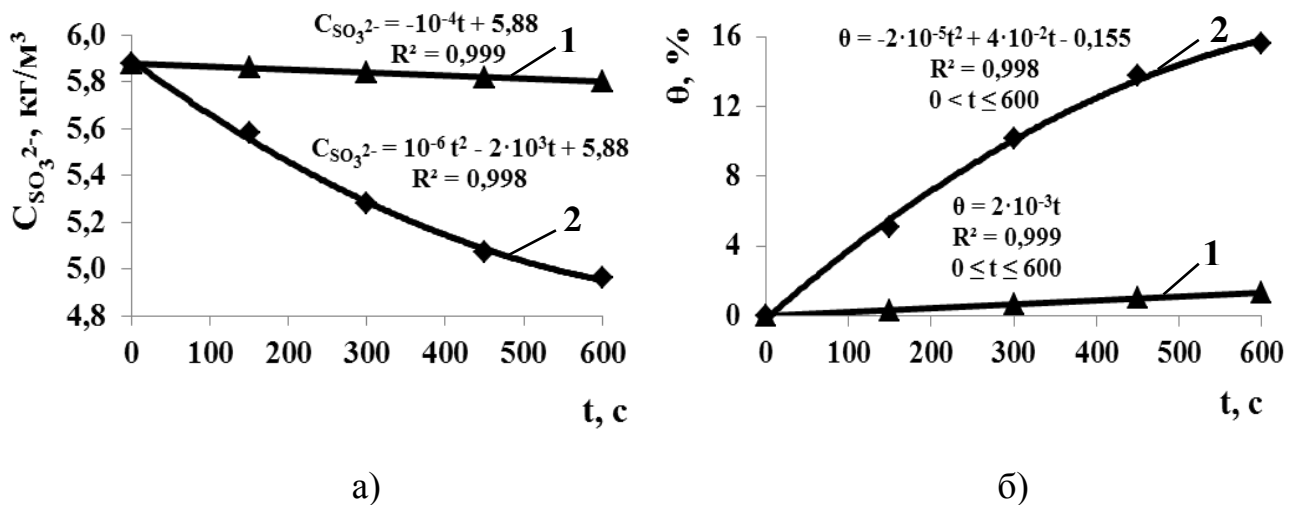


Рис. 4.2. Залежності концентрації кальцію сульфіту у перерахунку на іони  $\text{SO}_3^{2-}$  ( $C_{\text{SO}_3^{2-}}$ ) (а) та ступеня їх окиснення до  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $\theta$ ) (б)

від тривалості процесу окиснення ( $t$ ) у:

1 – реакторі з мішалкою; 2 – ГДСК

Розраховані у початковий період часу (0...300 с) швидкості процесів окиснення у реакторі з мішалкою ( $1,33 \cdot 10^{-2}$  кмоль/(м<sup>3</sup>·с)) та у ГДСК ( $19,94 \cdot 10^{-2}$  кмоль/(м<sup>3</sup>·с)) свідчать, що ефективність окиснення іонів  $\text{SO}_3^{2-}$  до  $\text{SO}_4^{2-}$  у кавітаційних полях у 15 разів вища, ніж у випадку механічного перемішування реакційного середовища.

У ГДСК утворюється осад, який осідає в 4 рази швидше, ніж осад у реакторі з мішалкою (1800 с проти 7200 с). Це зумовлено окисненням кальцію сульфіту, що утворюється внаслідок взаємодії натрію сульфіту з кальцієм гідроксидом, у кавітаційних полях до гіпсу, заряджені дрібнодисперсні частинки якого після усунення дії кавітаційних явищ формують агрегати (злипаються) й осідають. Утворений гіпс можна застосовувати як будівельний матеріал. Крім того, у кавітаційних полях внаслідок конденсації водяної пари, що виникає всередині кавітаційних бульбашок і переходить у розчин у

результаті їх сплескування, інтенсифікуються процеси масоперенесення, зокрема абсорбція кислих компонентів. Інтенсивна диспергувальна дія кумулятивних мікроструминок, що виникають внаслідок сплескування кавітаційних бульбашок, забезпечує збільшення сумарної площі контакту фаз у гетерогенній системі та сприяє активному оновленню поверхні малорозчинних реагентів, зокрема кальцію гідроксиду. У реакторі з мішалкою інтенсивність процесів окиснення є значно нижчою, а тому утворюється тільки малорозчинний кальцію сульфід, здатний утворювати седиментаційно стійкі системи.

Отже, застосування ГДСК дає змогу значно інтенсифікувати гетерогенний процес регенерації поглинального розчину, що утворюється в результаті абсорбції кислих компонентів відхідних газів печей прожарювання пасти метатитанової кислоти виробництва пігментного титану(IV) оксиду лужними реагентами – натрію карбонатом чи натрію гідроксидом.

#### **4.3. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного відділення тонких шламових частинок**

Однією із наймасштабніших проблем гірничо-збагачувальних виробництв є утворення тонкодисперсних шламів, що формують седиментаційно стійкі гетерогенні системи (глинисто-сольові шлами, рідиннофазні відходи збагачення каолінової сировини, графітових руд, кам'яного та бурого вугілля тощо) [280-283]. Використання коагуляційних методів для розділення таких систем не ефективно, оскільки малі розміри дисперсних частинок (від декількох мкм до  $10^{-3}$  м) призводять до перевитрат реагентів – коагулянтів та флокулянтів. Тому актуальним є пошук нових методів та обладнання для флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ, що містять дрібнодисперсні шламові частинки.

### 4.3.1. Дослідження процесів розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку в суміщеному кавітаційно-флотаційному апараті

Відомі способи перероблення калійних руд для одержання високоякісних калійно-магнієвих добрив неминуче пов'язані або зі стадією розчинення руди (галургійний), або зі селективною флотацією різних мінералів і нерозчинного залишку (флотаційний), або з обома стадіями (комбінований). Для кожної зі стадій характерне власне обладнання (розчинники та флотомашини) й оптимальний режим його роботи. З метою спрощення процесу перероблення калійних руд запропонували здійснювати розчинення калійної руди та флотацію нерозчинного залишку в суміщеному кавітаційно-флотаційному апараті – СКФА.

Для досліджень використовували лангбейнітову руду. Мінеральний склад лангбейнітової руди наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Мінеральний склад лангбейнітової руди

Компоненти	Вміст, % мас.
Лангбейніт	38
Галіт	39
Полігаліт	8
Сильвін	3
Нерозчинний залишок	12
Всього	100

Підготовка руди до розчинення передбачала її тонке подрібнення у кульовому млині. Фракційний склад розмеленої лангбейнітової руди наведено у таблиці 4.5. Максимальний розмір частинок руди лише дещо перевищував  $10^{-3}$  м. Це пов'язано з конструктивними особливостями ГДСК (оптимальне значення діаметра сопла –  $(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$  м). Порція руди, яку подавали на розчинення, містила частинки тільки двох фракцій:  $(1 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$  м (38,2% мас.) і  $(0,5 \dots 0,25) \cdot 10^{-3}$  м (61,8% мас.). Масове співвідношення твердої та рідкої фаз у

пульпі становило  $T:P = 1:20$ . Тривалість кавітаційного оброблення пульпи – 1800 с.

Таблиця 4.5 – Фракційний склад розмеленої лангбейнітової руди

Клас, м	Вміст, % мас.
$> 1 \cdot 10^{-3}$	62,7
$(1 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$	7,0
$(0,5 \dots 0,25) \cdot 10^{-3}$	9,9
$< 0,25 \cdot 10^{-3}$	20,4
Всього	100,0

У ГДСК реалізується так зване “холодне” розчинення лангбейнітової руди, оскільки впродовж оброблення температура пульпи зростала всього від 297 до 306 К. За вищезазначеними традиційними способами розчинення руди здійснюють за прямотечійно-протитечійною схемою у трьох розчинниках. Оптимальна температура розчинення у першому розчиннику – 340...343 К, у другому – 343...348 К і в третьому – 348...353 К [283]. Тобто використання традиційних способів перероблення калійних руд передбачає так зване “гаряче” розчинення руди.

Під час розчинення лангбейнітової руди утворювався нерозчинний залишок, що містив глинисті домішки руди та дрібнодисперсні частинки солей. З рідкою фазою (водою) нерозчинний залишок може утворювати дуже стійкі дисперсні системи (суспензії), які не завжди можна розділити навіть з додаванням 0,25 %-го розчину поліакриламід (ПАА) як коагулянта. Оскільки частинки нерозчинного залишку дуже дрібні (розміри не перевищують декількох мкм), то для флотації їх необхідно укрупнити. Як флокулянт використовували 1 %-ий розчин ПАА (витрата –  $0,3 \text{ кг/м}^3$  суспензії), як піноутворювач – неіоногенні ПАР (витрата –  $0,01 \text{ кг/м}^3$  суспензії).

Під час флотації утворювалась піна агрегатної структури [281], яка легко руйнувалась. Вихід флотоконцентрату (нерозчинного залишку) становив 18% мас. Низький вихід флотоконцентрату зумовлений неспівпадінням розмірів частинок глини та флотаційних бульбашок. Вологість флотоконцентрату

становила 31% мас. Відстоювання обробленої у ГДСК пульпи лангбейнітової руди впродовж  $8,64 \cdot 10^4$  с дає змогу досягнути нормативних показників вмісту завислих частинок ( $1,5 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>).

Однак, необхідно зазначити, що більшу практичну цінність мають результати кавітаційного розчинення лангбейніту. Лангбейніт належить до кінетично розчинних мінералів, тобто швидкість процесу його розчинення у воді визначається фізико-хімічними факторами, передусім взаємодією з молекулами води [284]. Зважаючи на те, що руда містила лише два калійно-магнієві мінерали (лангбейніт і полігаліт) і, враховуючи важкорозчинність останнього, оцінювали ефективність розчинення лангбейніту в кавітаційних полях. Визначали методом комплексонометричного титрування (титрант – розчин трилону Б) вміст іонів  $Mg^{2+}$  у пульпі і перераховували його на концентрацію лангбейніту, що розчинивсь у рідкій фазі. Залежність концентрації лангбейніту (С), розчиненого у воді, від тривалості кавітаційного оброблення (t) наведена на рис. 4.3.

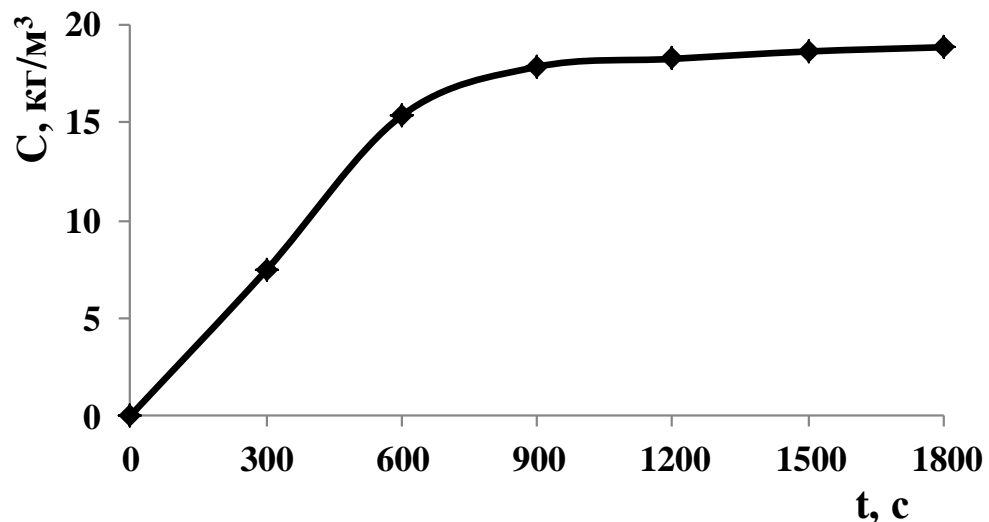


Рис. 4.3. Залежність концентрації лангбейніту (С), розчиненого у воді, від тривалості кавітаційного оброблення (t)

Впродовж перших 900 с кавітаційного оброблення (діапазон тривалості оброблення 0...900 с) концентрація лангбейніту в розчині досягає значення

17,85 кг/м<sup>3</sup>, що відповідає ступеню розчинення лангбейніту 93,95%. Збільшення тривалості оброблення до 1800 с зумовлює незначне зростання концентрації лангбейніту в розчині до 18,86 кг/м<sup>3</sup>, що відповідає ступеню розчинення лангбейніту 99,26%. Застосування механічної мішалки ( $Re_m \geq 10^4$ ) дало змогу отримати результати, аналогічні до результатів кавітаційного розчинення лангбейніту. У випадку використання традиційного галургійного способу перероблення руди ступінь розчинення лангбейніту не перевищує 30%. Вищезазначене свідчить про те, що кавітаційні явища суттєво інтенсифікують гетерогенний процес розчинення лангбейніту.

Як зазначають у праці [284], інтенсифікація процесу розчинення лангбейніту у кавітаційних полях зумовлена зростанням величини дипольного моменту молекул води внаслідок їх взаємодії з утвореними під час кавітації радикалами (передусім, радикалом Гідрогену), що призводить до втрати водою власної геометричної структури (відбувається руйнування кластерів молекул води). Диполі обробленої у кавітаційних полях води, активовані вільними радикалами, активно гідратують іони  $K^+$  і  $Mg^{2+}$  у вузлах кристалічної ґратки мінералу лангбейніту, що значно прискорює його розчинення.

Отже, застосування суміщеного кавітаційно-флотаційного апарата (СКФА) дає змогу здійснювати одночасно два процеси – розчинення важкорозчинних калійно-магнієвих мінералів руди та флотаційне відділення нерозчинного залишку.

#### **4.3.2. Дослідження процесу флотації нерозчинного залишку з**

#### **Домбровського кар'єру у суміщеному кавітаційно-флотаційному апараті**

Домбровський кар'єр Калуш-Голинського родовища калійних солей – екологічна загроза транскордонного характеру. Це зумовлено накопиченням у ньому величезних обсягів розсолів, що містять, крім солей, завислі частинки

піску, глини, карбонатних порід тощо, тобто дрібнодисперсні частинки нерозчинного залишку. Такі системи є седиментаційно стійкими, а використання традиційних коагуляційних методів їх розділення є неефективним. Тому процес відділення нерозчинного залишку від рідкої фази здійснювали у СКФА.

Концентрація нерозчинного залишку у вихідній суспензії (дисперсійне середовище – розчин), яку піддавали кавітаційному обробленню, становила 5 кг/м<sup>3</sup>. Фракційний склад нерозчинного залишку, який використовували для приготування суспензії, наведено у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Фракційний склад нерозчинного залишку

Клас, м	Вміст, % мас.
$> 1 \cdot 10^{-3}$	36,4
$(1 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$	18,3
$(0,5 \dots 0,25) \cdot 10^{-3}$	16,7
$< 0,25 \cdot 10^{-3}$	28,6
Всього	100,0

Особливості реагентного режиму процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії нерозчинного залишку наведено у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Реагентний режим процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії нерозчинного залишку

Флотореагенти	Призначення	Витрата, кг/м <sup>3</sup> суспензії
Карбоксиметилцелюлоза (1 %-ий розчин)	флокулянт	4
Неіоногенні ПАР	піноутворювач, колектор	0,01

З метою уникнення седиментації дрібнодисперсних частинок нерозчинного залишку застосовували механічне перемішування ( $Re_m \geq 10^4$ ).

Під час флотації нерозчинного залишку у циркуляційній ємності утворювалась піна агрегатної структури [281], яка повністю руйнувалась після 1500 с кавітаційного оброблення. Вихід флотоконцентрату, який оцінювали за



масою дисперсних частинок нерозчинного залишку, що осіли у сепараторі твердої фази, становив 23,2% мас.

Оскільки частинки нерозчинного залишку під час кавітаційного оброблення набували електричних зарядів, що призводило до їх коагуляції з подальшою седиментацією, то для збільшення ступеня розділення суспензії її відстоювали впродовж  $8,64 \cdot 10^4$  с. Після цього за допомогою фотоколориметра КФК-3, який працював у режимі нефелометра, вимірювали значення оптичної густини суспензії (довжина хвилі – 390 нм). За попередньо побудованим калібрувальним графіком визначали концентрацію нерозчинного залишку у суспензії. Сумарний ступінь розділення після кавітаційної флотації, коагуляції та відстоювання дорівнював 99,7%, що відповідало вмісту завислих частинок нерозчинного залишку  $1,5 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>, тобто вимогам чинних нормативних документів.

Отже, поєднання процесів кавітаційної флотації, безреагентної коагуляції та відстоювання дає змогу ефективно відділити дисперсні частинки нерозчинного залишку від рідкої фази.

#### **4.3.3. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії каоліну**

Приготування стабільної суспензії каоліну з концентрацією дисперсної фази 1 кг/м<sup>3</sup> включало дві стадії:

1) створення лужного середовища (рН = 10,6) додаванням до води натрію гідроксиду;

2) сумісне введення розчину кальцію хлориду та дисперсних частинок каоліну з метою стабілізації утвореної суспензії [285].

Фракційний склад каоліну, який використовували для приготування суспензії, наведено у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Фракційний склад каоліну

Клас, м	Вміст, % мас.
$> 1 \cdot 10^{-3}$	32,1
$(1 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$	13,5
$(0,5 \dots 0,25) \cdot 10^{-3}$	15,1
$< 0,25 \cdot 10^{-3}$	39,3
Всього	100,0

Перед початком флотації у циркуляційну ємність додавали розчин крохмалю, який відіграє роль селективного флокулянта для тонких шламових частинок [285], та неіоногенні ПАР (НПАР), які зумовлюють утворення піни [286]. Істотною перевагою використання НПАР, порівняно з іоногенними (аніоноактивними, катіоноактивними, амфолітними) ПАР, є можливість їх повного біологічного розкладання. Для запобігання агрегації дрібних частинок каоліну та їх можливій седиментації застосовували механічне перемішування ( $Re_m \geq 10^4$ ). Особливості реагентного режиму процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії каоліну наведено у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Реагентний режим процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії каоліну

Флотореагенти	Призначення	Витрата, кг/м <sup>3</sup> суспензії
Натрію гідроксид (5 %-ий розчин)	регулятор рН	1
Кальцію хлорид (5 %-ий розчин)	стабілізатор суспензії, активатор SiO <sub>2</sub>	0,2
Крохмаль (5 %-ий розчин)	селективний флокулянт, пригнічувач залізо- вмісних домішок	0,3
Неіоногенні ПАР	піноутворювач, колектор	0,01

Залежність ступеня розділення ( $x_{розд}$ ) суспензії каоліну від тривалості кавітаційного оброблення (t) наведена на рис. 4.4. Впродовж перших 600 с оброблення ступінь розділення суспензії каоліну зростає від 0 до 25,09%. Це

зумовлено утворенням на поверхні дисперсних частинок каоліну подвійного електричного шару, набуттям зарядів (виникненням електрокінетичного потенціалу), адгезією частинок до бульбашок повітря і, як наслідок, їх винесенням з об'єму рідкої фази.

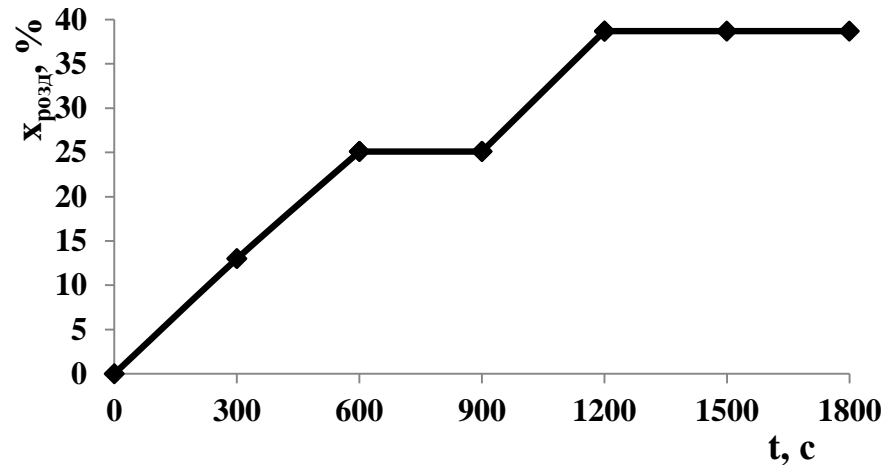


Рис. 4.4. Залежність ступеня розділення ( $x_{розд}$ ) суспензії каоліну від тривалості кавітаційного оброблення ( $t$ )

Застосування неіоногенних ПАР як піноутворювачів спричиняє формування за значення тиску на вході у кавітатор  $5,7 \cdot 10^5$  Па флотаційної піни агрегатної структури у циркуляційній ємності (рис. 4.5).

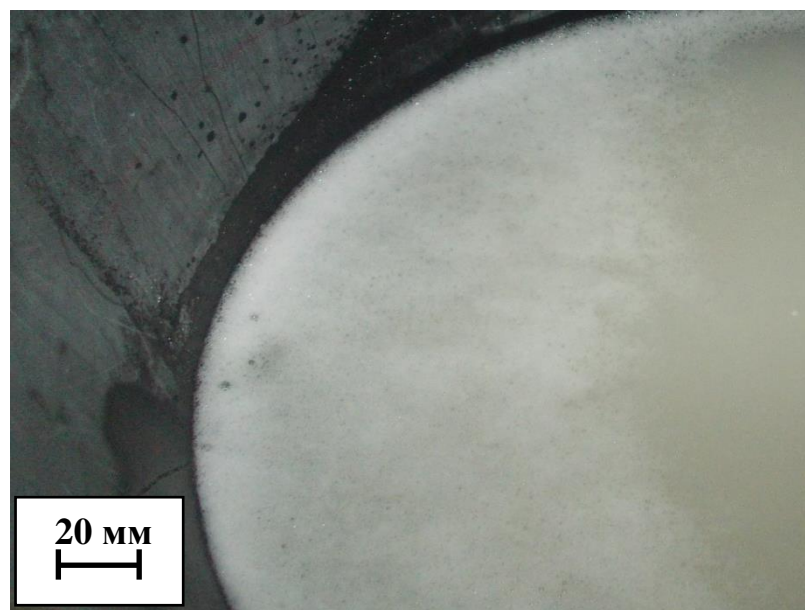


Рис. 4.5. Фотографія флотаційної піни у циркуляційній ємності

У верхній частині флотаційної колони – сепараторі твердої фази – утворення піни не спостерігали. Це зумовлено низькою міцністю флокул, що формуються під час знешламлення. Крім того, комплекс фізичних факторів (звукові коливання, інтенсивне перемішування, виділення великої кількості теплової енергії внаслідок кавітації та диспергувальний вплив останньої) призводить до руйнування водневих зв'язків, що виникають між поверхнею каоліну, що містить гідроксильні групи, та полярними групами флотореагентів (зокрема, крохмалю), що ускладнює закріплення неіоногенних ПАР на поверхні дисперсних частинок каоліну. Однак, необхідно зазначити, що повного руйнування комплексу “частинка-реагент” не відбувається внаслідок великої гнучкості карбонових ланцюгів молекул органічних полімерів [282]. Насамперед, це стосується компонента крохмалю – амілопектину, що складається з розгалужених ланцюгів молекул глюкози. Тому одночасно з руйнуванням флокул і в зонах з послабленою інтенсивністю механічних впливів вільні фрагменти макромолекул адсорбуються на тих самих частинках, знову огортаючи їх. Про це свідчить накопичення у сепараторі твердої фази дисперсних частинок каоліну (рис. 4.6).

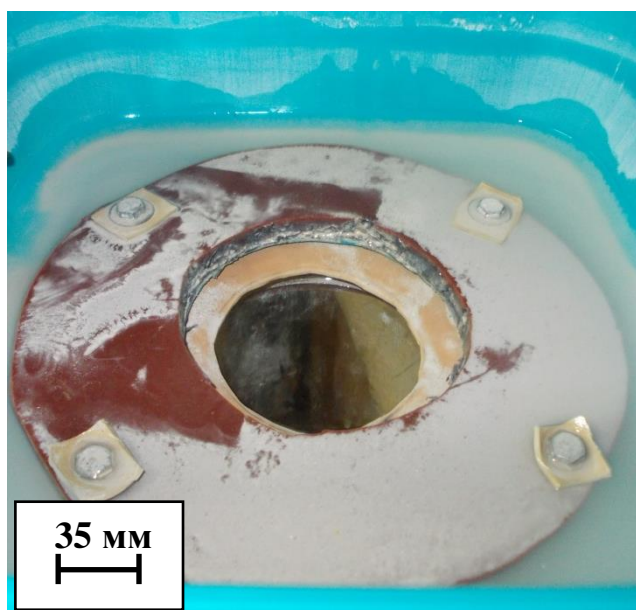


Рис. 4.6. Флотоконцентрат каоліну у сепараторі твердої фази

Подальше кавітаційне оброблення (діапазон тривалості оброблення – 600...900 с) суспензії каоліну не сприяє зростанню ступеня її розділення. Це можна пояснити утворенням вторинних шламових частинок з розмірами кілька мкм внаслідок інтенсивного подрібнення первинних частинок, що містяться у вихідному каоліні. Вторинні шламкові частинки неможливо відділити за тиску на вході у кавітатор  $5,7 \cdot 10^5$  Па, оскільки їх розміри не співмірні з розмірами флотаційних бульбашок (усереднене значення радіуса флотаційної бульбашки становить  $8,3 \cdot 10^{-4}$  м). Для їх ефективного відділення необхідно створити режим мікрофлотації, що потребує зростання тиску на вході у кавітатор до  $10^6$  Па (розрахункове значення радіуса бульбашок за такого тиску –  $1,8 \cdot 10^{-4}$  м). Цього можна досягнути лише використанням насосів із більшою потужністю приводу, що економічно недоцільно. Тому вирішили збільшити тривалість кавітаційного оброблення для з'ясування можливості перебігу інших процесів, які б сприяли ефективному відділенню дисперсних частинок каоліну чи погіршували цей процес.

Зростання величини електрокінетичного потенціалу частинок дисперсної фази (на прикладі кальцію гідроксиду) впродовж перших 900 с кавітаційного оброблення та її зменшення за подальшого збільшення тривалості оброблення, яке було встановлено попередніми дослідженнями, притаманне і для дисперсних частинок каоліну. Згідно з дослідженнями стійкості золів, виконаними Дерягіним, за зменшення електрокінетичного потенціалу до значень, нижчих 30 мВ, відбувається зменшення товщини дифузійної частини подвійного електричного шару біля поверхні частинок, тобто товщина гідратної оболонки навколо дисперсних частинок каоліну мінімальна [287]. Це зумовлює агрегування частинок внаслідок наявності на їх поверхні некомпенсованих сил, тобто їх коагуляцію. Величину електрокінетичного потенціалу частинок дисперсної фази, що приблизно дорівнює 30 мВ, вважають “порогом коагуляції” кінетично стійких систем. В основному, коагуляція частинок каоліну зумовлена кавітаційним усуненням дії адсорбційно-сольватного та

електростатичного факторів стійкості суспензії. Кавітаційне оброблення суспензії каоліну в інтервалі 900...1200 с супроводжується коагуляцією певної частини тонких шламів, внаслідок чого ступінь розділення суспензії зростає від 25,09 до 38,70%.

Збільшення тривалості оброблення до 1800 с не спричиняло зростання ступеня розділення суспензії, оскільки були наявні ентропійний, структурно-механічний та гідродинамічний фактори стійкості, зумовлені розвитком кавітаційних полів та механічним перемішуванням. Для їх усунення застосовували відстоювання суспензії впродовж  $1,08 \cdot 10^4$  с. Вміст дисперсних частинок у суспензії зменшувався до  $7 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>, що відповідало ступеню розділення 93,30%. Подальше зростання тривалості відстоювання до  $8,64 \cdot 10^4$  с зумовлювало зростання ступеня розділення до 98,54%, що відповідало вмісту завислих частинок  $1,5 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>, тобто вимогам чинних нормативних документів.

Отже, відділення дисперсних частинок каоліну передбачатиме різні стадії залежно від необхідної тривалості процесу розділення водного гетерогенного середовища. Для швидкого відділення дисперсних частинок (тривалість процесу становитиме  $\sim 3,6 \cdot 10^3$  с) ефективною є комбінація кавітаційної та мікрофлотації, однак це пов'язано зі значними енерговитратами. Тому доцільніше застосовувати комбінацію кавітаційної флотації та відстоювання, однак тривалість процесу розділення істотно зросте (до  $8,64 \cdot 10^4$  с).

#### **4.4. Дослідження процесу кавітаційно-флотаційного розділення рідких відходів легкої промисловості**

Діяльність підприємств легкої промисловості (текстильних, шкіряних, хутряних фабрик тощо) супроводжується утворенням значних обсягів висококонцентрованих рідких відходів, що містять емульговані частинки жирів, солюбілізовані СПАР (синтетичні поверхнево-активні речовини),

високомолекулярні колоїдно-розчинені органічні (білки, полісахариди, барвники, дубильні речовини) та неорганічні (поліфосфати) речовини. Наявність таких речовин обумовлює формування стійких колоїдних систем. Використання біологічних методів для вилучення колоїдно-розчинених речовин із висококонцентрованих рідких відходів потребує великої тривалості процесу, оскільки вони важко розкладаються біологічно. Про це свідчить у 3,6 рази вищий показник ХСК, порівняно з БСК, – на прикладі шкіряних заводів [288]. Тому актуальність застосування фізико-хімічних процесів, зокрема реагентної флотації, для відділення дрібнодисперсних частинок лише зростає.

Вміст завислих речовин у рідких відходах різноманітних підприємств легкої промисловості коливається в широких межах (таблиця 4.10).

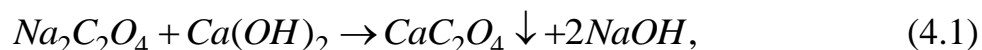
**Таблиця 4.10 – Вміст завислих речовин у рідких відходах підприємств легкої промисловості**

Вид підприємства	Вміст завислих речовин, кг/м <sup>3</sup>
Тонкосуконні фабрики [289]	0,085-0,225
Шкіряні заводи [288]	2-12
Хутряні фабрики [288]	0,5-2,5

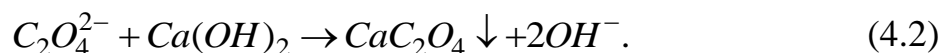
Складність досліджень процесів розділення рідких відходів підприємств легкої промисловості пов'язана з їх багатоконпонентністю. Тому доцільними є дослідження, що спрямовані на вивчення процесів розділення рідких відходів, дисперсна фаза яких містить лише один компонент.

Для приготування рідких відходів шкіряних виробництв використовували натрію оксалат, який є протравою в процесах дублення шкіри й утворює з водою стійку колоїдну систему. Концентрація натрію оксалату у воді становила 1 кг/м<sup>3</sup>. Для відділення дисперсних частинок натрію оксалату застосовували реагентне оброблення: до рідких відходів додавали стехіометричну кількість освітленої частини вапняного молока. Не дуже високий вміст натрію оксалату в рідких відходах зумовлений низькою розчинністю Ca(OH)<sub>2</sub> у воді – лише 1,5

кг/м<sup>3</sup>. Взаємодія натрію оксалату з кальцію гідроксидом описується таким рівнянням реакції



або в іонному вигляді



Флотацію малорозчинного продукту взаємодії натрію оксалату з кальцію гідроксидом здійснювали у суміщеному апараті колонного типу, що складався з двох частин: нижньої – струменевого кавітатора з системою профільованих сопел та верхньої – флотаційної. Встановлено, що оптимальний тиск на вході у кавітатор під час флотації кальцію оксалату становить  $3,5 \cdot 10^5$  Па. За більших значень тиску відбувалось зростання швидкості потоку середовища, що негативно впливало на прилипання дисперсних частинок до поверхні бульбашок і, як наслідок, ефективність процесу флотації значно знижувалась.

Вміст кальцію оксалату у рідких відходах оцінювали за значенням оптичної густини, вимірної за допомогою фотоколориметра КФК-3, який працював у режимі нефелометра (довжина хвилі – 340 нм). Перед вимірюванням оптичної густини проби водного гетерогенного середовища фільтрували через поліамідний фільтр (ТУ-6-06-И143-86) з діаметром отворів  $2 \cdot 10^{-7}$  м для відділення подрібнених у кавітаційних полях частинок кальцію гідроксиду.

Залежність ступеня розділення ( $x_{\text{розд}}$ ) водного гетерогенного середовища від кратності кавітаційного оброблення (n) наведена на рис. 4.7.

Зростання ступеня розділення середовища за кратності кавітаційного оброблення 1,85 (300 с оброблення) порівняно із необробленим середовищем на 9,75% (від 84,71 до 94,46%) зумовлене гомогенізуванням системи “натрію оксалат – кальцію гідроксид” та хімічною взаємодією її компонентів. Подальше зменшення ступеня розділення на 6,14% (від 94,46 до 88,32%), що відповідає



кратності оброблення 3,7 (600 с), можна пояснити утворенням у лужному середовищі (рН = 12) [290] кристалогідрату – дигідрату кальцію оксалату, який швидко трансформується в моногідрат. Впродовж наступних 600 с (до 1200 с), що відповідає кратності оброблення 7,39, ступінь розділення зростає на 6,31% (від 88,32 до 94,63%), що зумовлено розкладом у кавітаційних полях моногідрату до кальцію оксалату і флотацією останнього. Далі ступінь розділення зменшується внаслідок утворення на поверхні бульбашок “шламового покриття” із дрібнодисперсних частинок кальцію гідроксиду. За збільшення тривалості оброблення понад 1500 с, тобто за кратності циркуляції, що перевищує значення 9,24 (рис. 4.7), можливий навіть зворотний щодо флотації процес – седиментація кальцію оксалату внаслідок налипання на його поверхні дрібнодисперсних частинок кальцію гідроксиду.

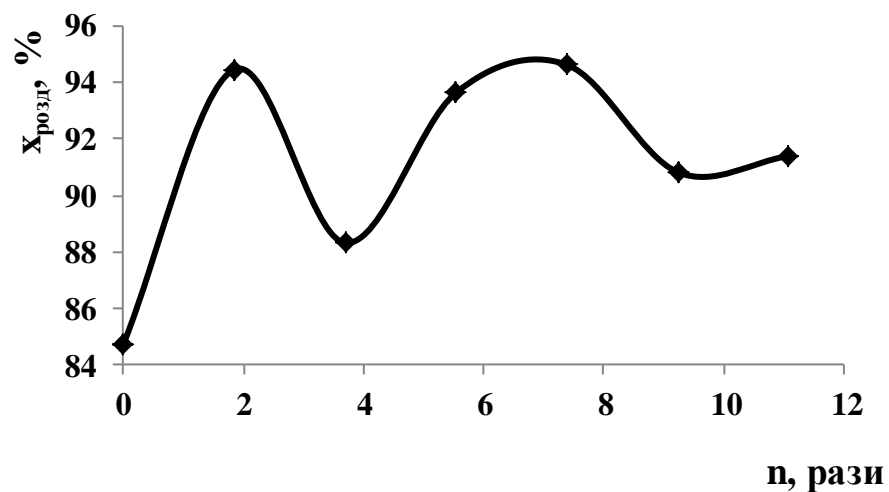


Рис. 4.7. Залежність ступеня розділення ( $x_{розд}$ ) водного гетерогенного середовища від кратності кавітаційного оброблення ( $n$ )

Для порівняння ефективності різних способів розділення рідких відходів шкіряних виробництв (відділення натрію оксалату) визначали також величину ХСК фільтрату. Порівняльну характеристику реагентного та комбінованого (реагентна кавітаційна флотація) способів наведено в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Порівняння ефективності різних способів розділення рідких відходів шкіряних виробництв ( $XCK_0 = 120 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ )

Способи розділення	Величина ХСК, мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	Ступінь розділення, %
Реагентний із застосуванням Са(ОН) <sub>2</sub>	18	85
Комбінований (реагентна кавітаційна флоатація)	6	95

Із таблиці 4.11 видно, що ступінь розділення рідких відходів шкіряних виробництв (відділення натрію оксалату) з використанням реагентної кавітаційної флоатації на 10% більший, ніж за використання реагентного способу. Це зумовлено інтенсивнішою фізико-хімічною взаємодією кавітаційно оброблених частинок кальцію гідроксиду із натрію оксалатом, порівняно з необробленими. Згідно з “Правилами охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами” нормується величина ХСК під час скидання забруднювачів у водні об’єкти. Вона не повинна перевищувати 80 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Величини ХСК фільтрату для двох способів (18 і 6 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> відповідно) свідчать про те, що рідкі відходи шкіряних виробництв, що містять натрію оксалат, після їх розділення реагентним або комбінованим (реагентним та фізико-хімічним) способом можна безпосередньо скидати у водойми, оминаючи стадію біологічного очищення. Але у разі застосування процесу кавітаційно-флоатаційного розділення близько 35% утвореного кальцію оксалату виводили із водного середовища у вигляді флотопіни, тоді як під час реагентного розділення продукт переважно залишався у середовищі у вигляді седиментаційно стійких високодисперсних частинок.

Ефективність флоатації залежить від структури флоатаційної піни [281]. Так, за тиску на вході у кавітатор, що дорівнював  $3,5 \cdot 10^5$  Па, спостерігали утворення плівково-структурної піни. Для структури такої піни притаманна низка особливостей: розмір бульбашок повітря у верхніх шарах піни більший, ніж у

нижніх; товщина прошарків води, що розділяють бульбашки повітря у піні, зменшується з наближенням до поверхні води; шар піни має відносно невелику висоту (0,05...0,20 м; у нашому випадку – 0,05 м); крупні бульбашки є сильно деформованими (рис. 4.8 а). Плівково-структурна піна містить велику кількість води (вологість піни > 95% мас.), особливо у нижніх шарах. Ознакою ефективної флотації була наявність на поверхні піни бульбашок розміром 0,01...0,03 м, які частково вкриті плівкою мінеральних частинок так, що на їх поверхні залишились вільні ділянки (рис. 4.8 а).

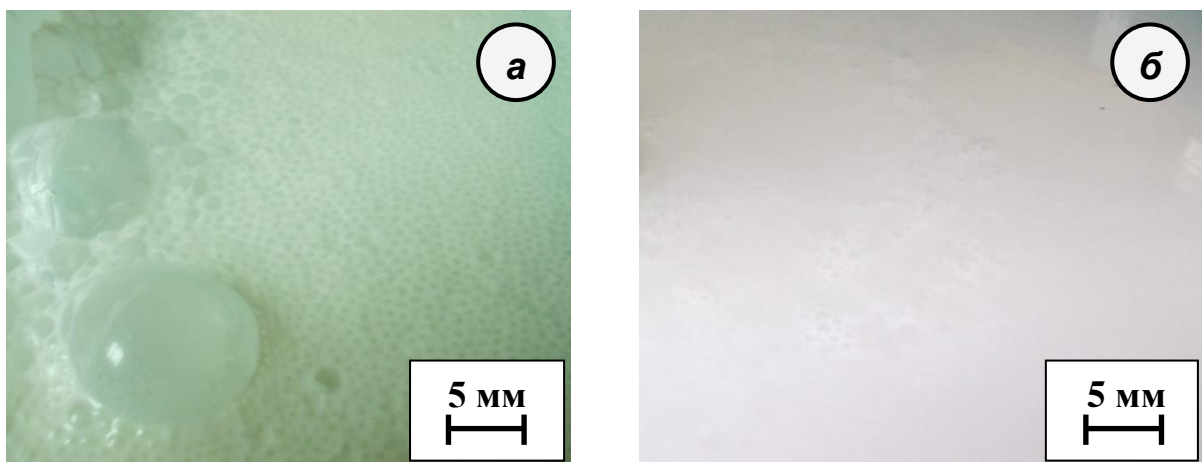


Рис. 4.8. Фотографія флотаційної піни:

а – плівково-структурна піна; б – агрегатна піна

За тиску на вході у кавітатор, що дорівнював  $5,7 \cdot 10^5$  Па, формувалась піна агрегатної структури (рис. 4.8 б). Для такої піни характерна наявність бульбашок повітря з розмірами, меншими, ніж у плівково-структурної піни, хоча й аналогічним їх розподілом за висотою шару піни. Агрегатна піна містила незначну кількість води і легко руйнувалась, що суттєво знижувало ефективність флотації.

Під час флотації реакційна система набувала інтенсивного молочного забарвлення, зумовленого накопиченням дрібнодисперсних бульбашок повітря (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Фотографія флотаційної колони

Максимальне винесення малорозчинного продукту реакції (4.1) у пінний шар відповідало режиму флотації, для якого характерне утворення плівково-структурної піни. Залежність маси висушеного за 378 К флотоконцентрату (кальцію оксалату) ( $m$ ) від тривалості кавітаційного оброблення ( $t$ ) наведено на рис. 4.10.

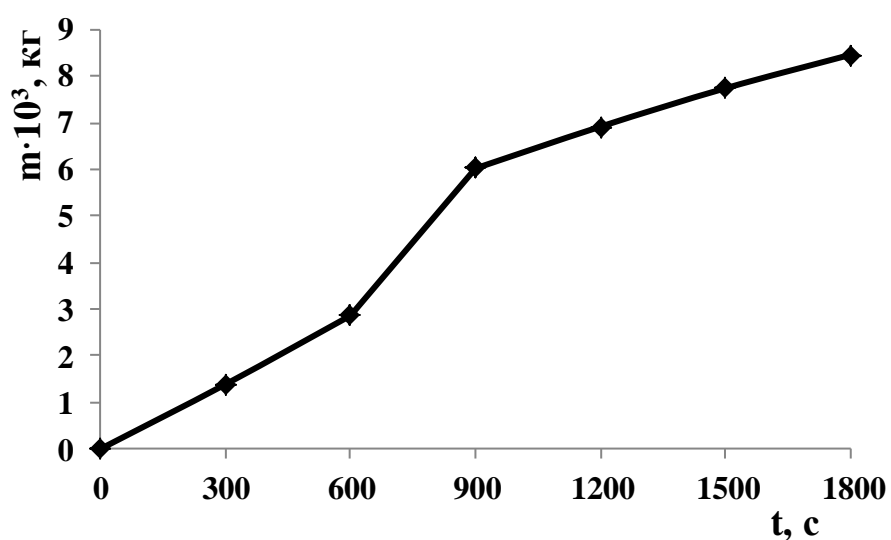


Рис. 4.10. Залежність маси висушеного за 378 К флотоконцентрату (кальцію оксалату) ( $m$ ) від тривалості кавітаційного оброблення ( $t$ )

Різке зростання маси флотоконцентрату в діапазоні тривалості оброблення 600...900 с (на  $3,162 \cdot 10^{-3}$  кг – від  $2,863 \cdot 10^{-3}$  до  $6,025 \cdot 10^{-3}$  кг), порівняно з діапазонами 0...300 с (на  $1,387 \cdot 10^{-3}$  кг – від 0 до  $1,387 \cdot 10^{-3}$  кг) та 300...600 с (на  $1,476 \cdot 10^{-3}$  кг – від  $1,387 \cdot 10^{-3}$  до  $2,863 \cdot 10^{-3}$  кг) зумовлено особливостями фізико-хімічної взаємодії, що розглянуті вище.

Отже, змінюючи технологічний параметр (значення тиску на вході у кавітатор), можна цілеспрямовано впливати на структуру флотаційної піни під час флотації кальцію оксалату і, відповідно, на ефективність запропонованого процесу кавітаційно-флотаційного розділення.

### Висновки до розділу

На підставі виконаних досліджень можна сформулювати такі висновки:

1) використання кавітаційної флотації дає змогу отримувати флотоконцентрат зі значно більшим вмістом сірки (63,6% мас.), ніж у випадку традиційного флотаційного збагачення сірчаної руди у пневмомеханічних машинах (38,4% мас.);

2) застосування ГДСК дає змогу значно підвищити ефективність розділення суспензії, що утворюється під час гетерогенного процесу регенерації поглинального розчину, за рахунок збільшення ступенів використання  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і окиснення  $\text{CaSO}_3$ . Встановлено, що ефективність окиснення іонів  $\text{SO}_3^{2-}$  до  $\text{SO}_4^{2-}$  у кавітаційних полях у 15 разів вища, ніж у випадку механічного перемішування реакційного середовища, а тривалість процесу седиментації утвореного осаду – в 4 рази менша (1800 с проти 7200 с);

3) застосування ГДСК дає змогу ефективно сумістити в одному апараті кавітаційне розчинення лангбейнітової руди та флотаційне відділення нерозчинного залишку від насиченого розчину;

4) поєднання процесів кавітаційної флотації, безреагентної коагуляції та відстоювання дає змогу значно підвищити ефективність відділення дисперсних частинок нерозчинного залишку від рідкої фази (ступінь розділення – 99,7%);

5) кавітаційне оброблення стабілізованої суспензії каоліну в ГДСК дає змогу відділити дисперсні частинки каоліну від рідкої фази як за рахунок флотації (ступінь розділення суспензії – 25,09%), так і за рахунок коагуляції тонких шламових частинок (ступінь розділення – 13,61%). Сумарний ступінь флотаційно-коагуляційного відділення дрібнодисперсних частинок каоліну становить 38,70%;

6) застосування кавітаційних полів для активації поверхні дисперсних частинок кальцію гідроксиду дає змогу збільшити ступінь розділення рідких відходів шкіряних виробництв (відділення натрію оксалату) на 10% (від 85 до 95%), порівняно із традиційним реагентним осадженням;

7) основні результати експериментальних досліджень, наведені у даному розділі, опубліковано у [23], [27].

## РОЗДІЛ 5

### ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ КАВІТАЦІЙНО-ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ ВОДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ

На підставі результатів, отриманих під час експериментальних досліджень інтенсивності розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів, процесів кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ, а також аналізу джерел інформації розроблено конструкцію ГДСК, яка дає змогу, змінюючи технологічний (тиск на вході у кавітатор) та конструктивні (діаметр сопла, кількість сопел, кут атаки струменів) параметри, забезпечувати оптимальні умови перебігу технологічних процесів у кавітаційних полях, навіть за зміни температури і, відповідно, реологічних властивостей цих середовищ. Позитивною особливістю розробленої конструкції ГДСК є можливість управління ефективністю процесу кавітаційно-флотаційного розділення безпосередньо під час його здійснення, що забезпечує безперервність та гнучкість процесу. Запропоновано технологічні схеми процесів: кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди; кавітаційно-флотаційного розділення суспензії, що утворюється під час регенерації відпрацьованого поглинального розчину у виробництві пігментного титану(IV) оксиду; розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку.

#### 5.1. Гідродинамічний струменевий кавітатор

Суттєвим недоліком більшості конструкцій кавітаторів є неможливість забезпечення оптимальних умов перебігу різних технологічних процесів (фізико-хімічних, тепло- та масообмінних) безпосередньо під час кавітаційного оброблення водних гетерогенних середовищ. Розроблена конструкція ГДСК, у якій введення нових елементів (гідрофона, мікропроцесора, реверсивного двигуна, шарнірного та зворотно-поступального механізмів) дає змогу

змінювати просторове розташування кавітувальних елементів (сопел) і в автоматичному режимі регулювати кут між осями суміжних сопел і поздовжньою віссю корпусу, забезпечуючи оптимальні умови перебігу технологічних процесів у кавітаційних полях навіть за зміни температури і, відповідно, реологічних властивостей (в'язкості, густини тощо) водних гетерогенних середовищ, у яких ці поля генерують. Позитивна особливість розробленої конструкції ГДСК – можливість управління ефективністю кавітаційного оброблення безпосередньо під час здійснення певного технологічного процесу, що забезпечує його безперервність і гнучкість.

Принципову схему конструкції ГДСК (поздовжній переріз), розроблену під час експериментальних досліджень розвитку кавітаційних полів у водних гетерогенних середовищах, наведено на рис. 5.1.

ГДСК складається з циліндричного корпусу 13 з патрубками подачі 4 та відведення 16 водного середовища. В середині корпусу 13 змонтовано шарнірний механізм 10, до якого за допомогою кріплень 11 прикріплено сопла 12 зі шлангами 6, а також зворотно-поступальний механізм 8. Шарнірний механізм 10 прикріплено до зворотно-поступального механізму через рухому 9 і нерухому 14 гайки. Нерухома гайка 14 споряджена опорним підшипником 15 для з'єднання зі зворотно-поступальним механізмом 8, виконаним у вигляді валу з різьбовою ділянкою. Поступальне переміщення рухомої гайки 9 досягається за допомогою направляючих 7, які проходять через отвори, виконані у рухомій гайці 9, і нерухомо прикріплені до корпусу кавітатора 13 та нерухомої гайки 14. Герметизація ГДСК у місці виходу зворотно-поступального механізму 8 досягається за допомогою ущільнення 3. Для підведення водного гетерогенного середовища до сопел 12 кавітатор споряджено колектором 5 і шлангами 6. Для приведення в дію зворотно-поступальний механізм 8 споряджений муфтою 2 та реверсивним двигуном 1. Приведення в дію реверсивного двигуна 1 в автоматичному режимі досягається



за допомогою мікропроцесора 18, з'єднаного з гідрофоном 17, що вмонтований у корпус кавітатора 13.

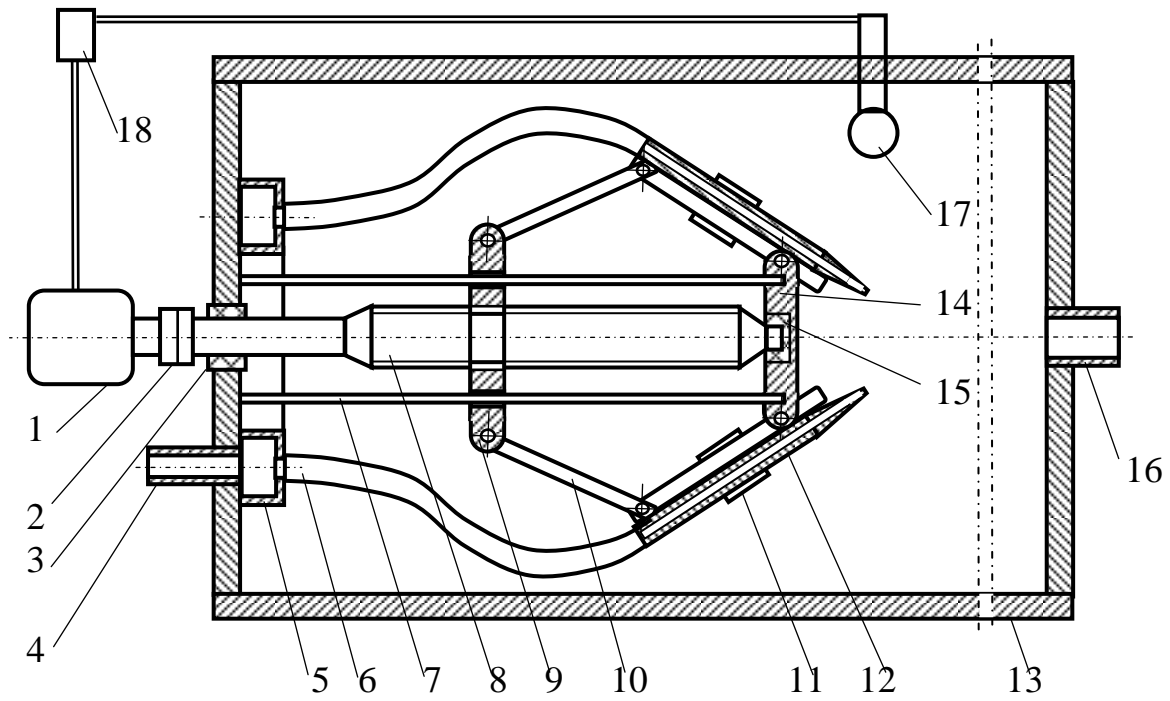


Рис. 5.1. Принципова схема конструкції ГДСК (поздовжній переріз):  
 1 – реверсивний двигун; 2 – муфта; 3 – ущільнення; 4 – патрубок подачі;  
 5 – колектор; 6 – шланг; 7 – направляюча; 8 – зворотно-поступальний механізм;  
 9 – рухома гайка; 10 – шарнірний механізм; 11 – кріплення сопла;  
 12 – сопло; 13 – корпус; 14 – нерухома гайка; 15 – опорний підшипник;  
 16 – патрубок відведення; 17 – гідрофон; 18 – мікропроцесор

ГДСК працює так. Водне гетерогенне середовище, яке піддають кавітаційному обробленню, під тиском подають через патрубок подачі 4 у колектор 5, а з нього за допомогою шлангів 6 у сопла 12. На виході із кожного сопла 12 формується струмінь з високою кінетичною енергією. Під час зіткнення струменів на деякій відстані від соплел 12 у водному середовищі

збуджується кавітація й формується область кавітації всередині корпусу 13. За рахунок руху потоку ця область поширюється вздовж осі кавітатора на весь корпус 13. Компоненти водного гетерогенного середовища піддаються інтенсивному обробленню в області існування кавітації, внаслідок чого інтенсифікуються хімічні процеси, масо- і теплоперенесення, генерування теплової енергії. Кут між осями сопел 12 і повздовжньою віссю корпусу 13 кавітатора змінюють за рахунок реверсивного двигуна 1, вал якого через муфту 2 з'єднаний зі зворотно-поступальним механізмом 8. Під час обертання валу двигуна 1 відбувається переміщення рухомої гайки 9 по різьбовій ділянці зворотно-поступального механізму 8. При цьому відбувається переміщення елементів шарнірного механізму 10, до якого прикріплені сопла 12, і, як наслідок, зміна кута між їх осями і віссю кавітатора.

Після оброблення у кавітаційному полі водне гетерогенне середовище через патрубок відведення 16 виводиться з кавітатора.

Для автоматичного регулювання кута між осями сопел 12 і віссю корпусу кавітатора 13 гідрофоном 17 фіксують величину акустичного сигналу генерованих кавітаційних полів. Сигнал перетворюють за допомогою мікропроцесора 18, який приводить у дію реверсивний двигун 1. Реверсивний двигун 1 за допомогою зворотно-поступального 8 і шарнірного 10 механізмів змінює просторове розташування сопел 12 доти, доки не буде досягнуто максимуму значень амплітуди акустичного сигналу.

## **5.2. Технологічний процес кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди**

Розроблена технологічна схема процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди зображена на рис. 5.2. Вона призначена для отримання флотоконцентрату з високим вмістом сірки (55...64% мас.).

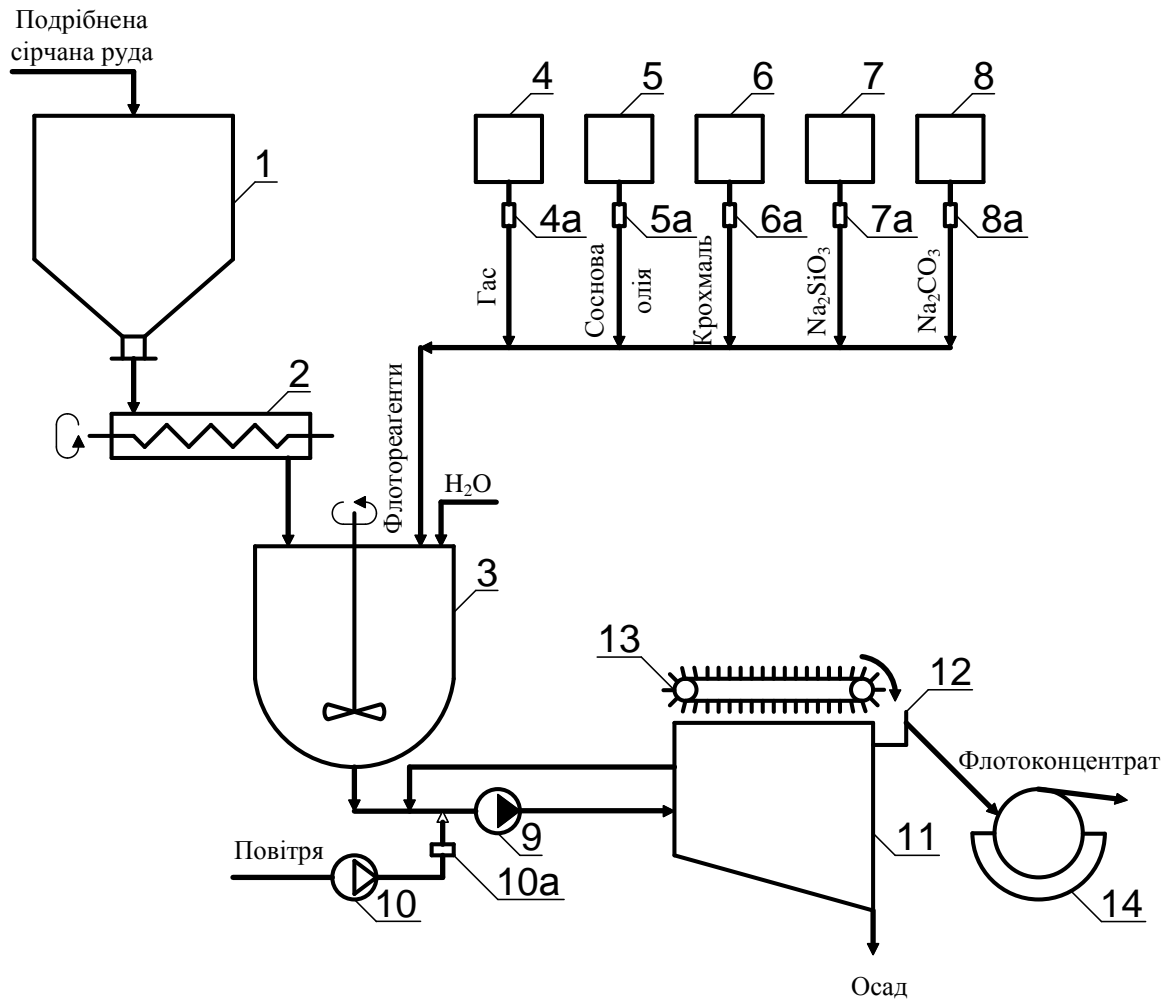


Рис. 5.2. Технологічна схема процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди: 1 – бункер; 2 – шнековий дозатор; 3 – реактор з мішалкою; 4, 5, 6, 7, 8 – напірні ємності; 4а, 5а, 6а, 7а, 8а – дозатори; 9 – циркуляційний насос; 10 – компресор; 10а – витратомір; 11 – суміщений кавітаційно-флотаційний апарат (СКФА); 12 – збірник флотоконцентрату; 13 – скребковий стрічковий транспортер; 14 – барабанний вакуум-фільтр

Подрібнену у кульовому млині до розмірів  $-10^{-3}$  м сірчану руду подають із бункера 1 шнековим дозатором 2 у реактор з мішалкою 3, в якому готують пульпу сірчаної руди для її подальшого флотаційного збагачення. Необхідне масове співвідношення твердої та рідкої фаз у пульпі сірчаної руди ( $T:P \approx 1:5$ ) забезпечують додаванням у реактор води. Оптимальний реагентний режим

процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди створюють послідовним дозуванням у реактор 3 флотореагентів (гасу – збирач; соснової олії – піноутворювач; крохмалю (1 %-ий розчин) – пригнічувач пустої породи та флокулянт дрібних частинок сірки; розчину натрію силікату ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) – пригнічувач пустої породи; кальцинованої соди ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) – регулятор величини рН) із напірних ємностей 4, 5, 6, 7, 8 відповідно. У реакторі за інтенсивного перемішування ( $\text{Re}_m \geq 10^4$ ) відбуваються усереднення та гомогенізування водного гетерогенного середовища – пульпи сірчаної руди.

Із реактора 3 пульпу подають циркуляційним насосом 9, яким створюють необхідний тиск, у СКФА 11, у якому суміщено обидві стадії процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ. Кратність циркуляції водного гетерогенного середовища (пульпи сірчаної руди) через СКФА дорівнює 10...12. Інтенсивна диспергувальна дія кавітаційних полів, сформованих у нижній частині СКФА – ГДСК, сприяє остаточному розкриванню пустої породи, а утворені у флотаційній зоні дрібнодисперсні бульбашки забезпечують флотацію дисперсних частинок сірки. З метою інтенсифікації кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації дисперсних частинок сірки у водне середовище перед СКФА компресором 10 через витратомір 10а вводять попередньо стиснуте циркуляційним насосом 9 повітря (об'ємна витрата повітря –  $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Флотоконцентрат, який утворюється у верхній частині СКФА, збирають скребковим механізмом і подають стрічковим транспортером 13 у збірник 12. Зі збірника вологий флотоконцентрат надходить на зневоднення на барабанний вакуум-фільтр 14, а потім на стадію перероблення (автоклавне виплавлення сірки, метод фазового обміну тощо).

Дрібні частинки пустої породи внаслідок кавітаційного оброблення у ГДСК набувають зарядів і укрупнюються – відбувається їх коагуляція з подальшою седиментацією. Утворений осад виводять із СКФА.

### **5.3. Технологічний процес кавітаційно-флотаційного розділення суспензії, що утворюється під час регенерації відпрацьованого поглинального розчину у виробництві пігментного титану(IV) оксиду**

Технологічну схему процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії, що утворюється під час регенерації відпрацьованого поглинального розчину у виробництві пігментного титану(IV) оксиду наведено на рис. 5.3. На підставі результатів досліджень, спрямованих на інтенсифікацію стадії регенерації відпрацьованого поглинального розчину, цю схему доповнили новим технологічним елементом – суміщеним кавітаційно-флотаційним апаратом (СКФА) 7.

Відхідні гази з печей прожарювання пасти метатитанової кислоти надходять у вискоєфективний масообмінний апарат – горизонтальний абсорбер з ковшоподібними диспергаторами (ГАКД) 1, у якому внаслідок розбрикування поглинального розчину, що містить  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (або  $\text{NaOH}$ ), створюється дрібнодисперсна крапельна завіса. Завдяки цьому суттєво зростає площа контакту двох фаз (рідкої та газоподібної), що зумовлює збільшення швидкості гетерогенного процесу.

Для регенерації відпрацьований поглинальний розчин після стадії абсорбції подають у ємність з мішалкою 4. Сюди ж дозують лужний реагент ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). У ємності 4 за інтенсивного перемішування ( $\text{Re}_m \geq 10^4$ ) відбуваються усереднення та гомогенізування гетерогенного середовища.

Із ємності з мішалкою 4 поглинальний розчин циркуляційним насосом 5 подають у СКФА 7. Тут внаслідок кавітаційного насичення киснем рідиннофазного середовища відбувається окиснення іонів  $\text{SO}_3^{2-}$  до  $\text{SO}_4^{2-}$ . Для досягнення вищого ступеня окиснення у СКФА компресором 6 подають повітря (об'ємна витрата –  $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ). Крім того, додавання повітря сприяє флотації частини утворених малорозчинних сполук – кальцію сульфіту та гіпсу. Утворений флотоконцентрат збирають скребковим механізмом і подають

стрічковим транспортером 9 у збірник 8, а потім на зневоднення на барабанний вакуум-фільтр 10. Решта малорозчинних сполук осідають у СКФА впродовж 1800 с після вимкнення установки і виводяться з нижньої його частини у вигляді осаду, який можна використовувати як будівельний матеріал.

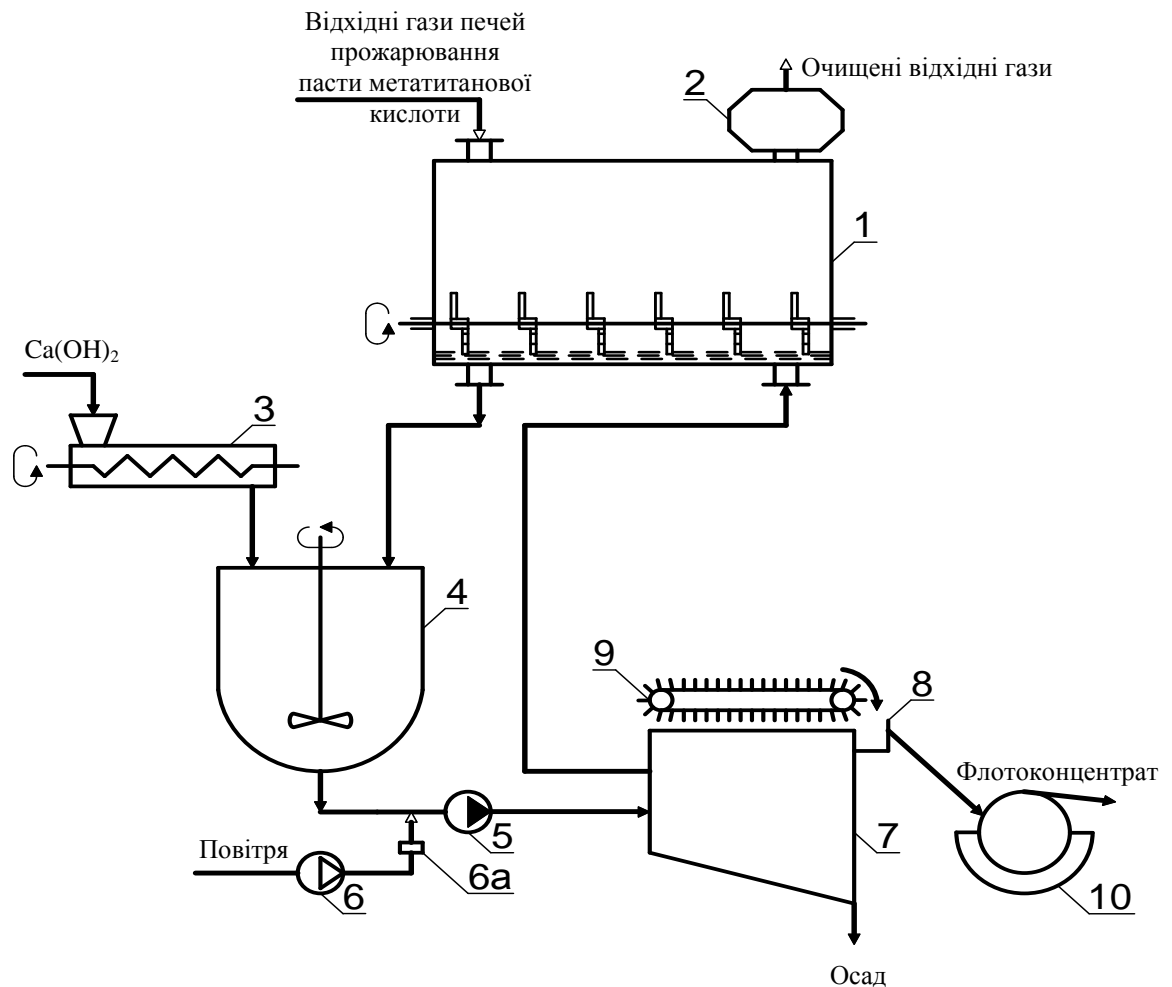


Рис. 5.3. Технологічна схема процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії, що утворюється під час регенерації відпрацьованого поглинального розчину у виробництві пігментного титану(IV) оксиду: 1 – горизонтальний абсорбер з ковшоподібними диспергаторами (ГАНД); 2 – краплевловлювач; 3 – шнековий дозатор; 4 – ємність з мішалкою; 5 – циркуляційний насос; 6 – компресор; 6а – витратомір; 7 – суміщений кавітаційно-флотаційний апарат (СКФА); 8 – збірник флотоконцентрату; 9 – скребковий стрічковий транспортер; 10 – барабанний вакуум-фільтр

Регенований поглинальний розчин подають у ГАКД. Очищені відхідні гази, позбавлені рідкої фази у краплевлловлювачі 2, скидають в атмосферу.

#### 5.4. Технологічні процеси розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку у суміщеному кавітаційно-флотаційному апараті

Технологічну схему процесів розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку (НЗ) у СКФА зображено на рис. 5.4.

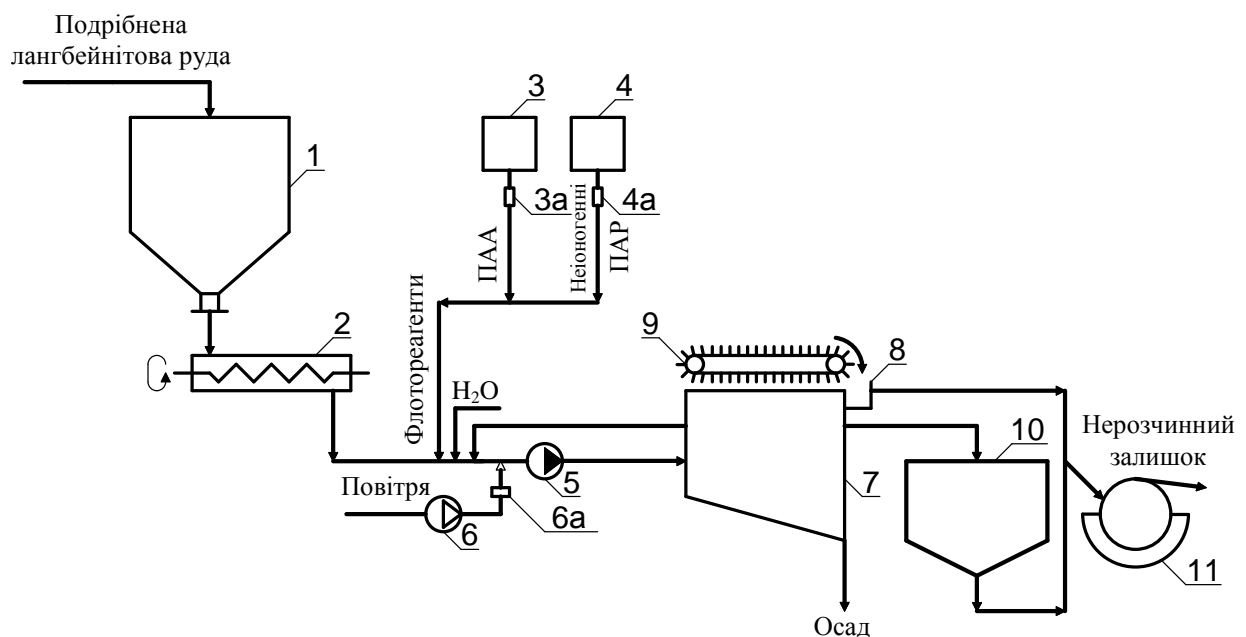


Рис. 5.4. Технологічна схема процесів розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку у суміщеному кавітаційно-флотаційному апараті (СКФА): 1 – бункер; 2 – шнековий дозатор; 3, 4 – напірні ємності; 3а, 4а – дозатори; 5 – циркуляційний насос; 6 – компресор; 6а – витратомір; 7 – СКФА; 8 – збірник флотоконцентрату; 9 – скребковий стрічковий транспортер; 10 – відстійник; 11 – барабанний вакуум-фільтр

Основні стадії цих процесів (приготування флотаційної пульпи, введення повітря, кавітаційне оброблення водного гетерогенного середовища, флотація дисперсних частинок НЗ та його зневоднення) є аналогічними, як і у

технологічній схемі процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди. Однак поєднання двох технологічних процесів (розчинення лангбейнітової руди та флотації НЗ) в одному апараті (СКФА) зумовило особливості цієї технологічної схеми.

Вихрові утворення перехідної зони у СКФА 7, що забезпечують інтенсивне перемішування лангбейнітової руди, води та флотореагентів, і висока ерозійна активність, а, отже, і гомогенізувальна дія кумулятивних мікроструминок, що утворюються внаслідок сплескування кавітаційних бульбашок і володіють значним запасом кінетичної енергії, зумовлюють не тільки швидке розчинення легкорозчинних мінералів лангбейнітової руди (галіту, сильвіну), але й практично повне розчинення (ступінь розчинення за 1800 с кавітаційного оброблення в холодному режимі становить 99,26%) важкорозчинного мінералу лангбейніту.

Запропонована технологічна схема процесів розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку у СКФА має низку переваг, порівняно зі схемами традиційних способів перероблення калійних руд. По-перше, різке зменшення енерговитрат на нагрівання технологічних розчинів (до 306 К у ГДСК проти 353 К за традиційною технологією). По-друге, зменшення капітальних витрат, оскільки необхідність застосування реактора з мішалкою для гомогенізації водного середовища, що містить завислі частинки, відпадає, а об'єм відстійника для осадження дисперсної фази (НЗ) значно зменшується.

Флотоконцентрат НЗ зі збірника 8 та осаджені частинки НЗ із відстійника 10 подають на вакуум-фільтр 11 для зневоднення. Зневоднений НЗ використовують як будівельний матеріал.

Істотною перевагою запропонованої схеми є можливість регулювання ступеня розділення водного гетерогенного середовища шляхом цілеспрямованих змін розподілу потоків, що надходять у СКФА (використання байпасу) та відстійник, а також технологічного (тиск на вході у ГДСК) та конструктивних (діаметр сопла, кількість сопел, кут атаки струменів)



параметрів ГДСК. Це свідчить про те, що запропонований процес кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ є гнучким.

### 5.5. Техніко-економічний аналіз запропонованого процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди

Економічний ефект від впровадження розробленого процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди розраховано на підставі технологічної схеми, зображеної на рис. 5.2. За прототип прийняли типовий технологічний процес флотаційного збагачення сірчаної руди у пневмомеханічній машині системи “Механобр” (лабораторна установка). Вихідні дані для розрахунку наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку техніко-економічного ефекту від впровадження процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди

Процес	Пневматична флотація	Кавітаційна флотація
Об’єм пульпи ( $V \cdot 10^3$ ), м <sup>3</sup>	0,75	25
Потужність приводу установки ( $N$ ), кВт·год	0,4	1,555
Тривалість флотації ( $\tau$ ), год.	0,3 [279]	0,5
Вміст сірки у вихідній руді ( $C_{S(p)}$ ), % мас.	19,8	19,8
Вміст сірки у флотоконцентраті ( $C_{S(\phi n)}$ ), % мас.	38,4	63,6

Економічний ефект від впровадження процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди досягатиметься внаслідок зменшення річних енерговитрат на оброблення 350 000 м<sup>3</sup> пульпи сірчаної руди для отримання флотоконцентрату (продуктивність камери промислової пневмомеханічної флотомашини “Механобр” прийняли рівною 40 м<sup>3</sup> пульпи/год. [279]). Вміст твердої фази у пульпі становив 20% мас. Витрати електроенергії на живлення компресорів у двох процесах є сумірними, а тому їх різницею можна знехтувати. Результати узагальненого техніко-економічного оцінювання двох

різновидів процесу флотаційного збагачення сірчаної руди наведено у таблиці 5.2.

Із таблиці 5.2 видно, що річний економічний ефект від впровадження процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди становить 64,57 млн. грн., а питома вартість вилучення сірки за розробленим процесом є у 8,5 разів меншою, ніж у випадку використання пневматичної флотації.

**Таблиця 5.2 – Узагальнене техніко-економічне оцінювання двох різновидів процесу флотаційного збагачення сірчаної руди**

Процес	Пневматична флотація	Кавітаційна флотація
Продуктивність флотокамери за пульпою, м <sup>3</sup> /рік	350 000	350 000
Витрати електроенергії, (кВт·год)/рік	$56 \cdot 10^6$	$15,59 \cdot 10^6$
Вартість одиниці електроенергії, грн./(кВт·год)	1,4314	1,4314
Вартість електроенергії, грн./рік	$80,16 \cdot 10^6$	$15,59 \cdot 10^6$
Економічний ефект, грн./рік	$64,57 \cdot 10^6$	
Продуктивність флотокамери за сіркою, кг S/рік	$26,88 \cdot 10^6$	$44,52 \cdot 10^6$
Питома вартість вилучення сірки, грн./кг S	2,98	0,35
Співвідношення питомих вартостей вилучення сірки з руди, рази	$2,98/0,35 = 8,5$	

Крім того, варто зазначити, що процес збагачення сірчаної руди у пневмомеханічній машині системи “Механобр” є періодичним, а у СКФА – безперервним. Це означає, що продуктивність розробленого процесу кавітаційно-флотаційного збагачення є більшою, ніж традиційної пневматичної флотації.

Необхідно також врахувати, що економічні витрати на реалізацію наступних стадій виробництва сірки, зокрема виплавлення сірки, також будуть меншими за рахунок вищих концентрацій сірки у флотоконцентраті.

## Висновки до розділу

1. Розроблена конструкція ГДСК, у якій введення нових елементів (гідрофона, мікропроцесора, реверсивного двигуна, шарнірного та зворотно-поступального механізмів) дає змогу змінювати просторове розташування кавітувальних елементів (сопел) і в автоматичному режимі регулювати кут між осями суміжних сопел і повздовжньою віссю корпусу. Це забезпечує оптимальні умови перебігу технологічних процесів у кавітаційних полях навіть за зміни температури і, відповідно, реологічних властивостей (в'язкості, густини тощо) водних гетерогенних середовищ, у яких ці поля генерують.

2. Розроблені технологічні схеми процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ дають змогу досягати нормативних показників, зокрема вмісту завислих частинок, та регулювати вміст основного продукту у флотоконцентраті (процес збагачення сірчаної руди).

3. Розроблена технологічна схема процесу кавітаційно-флотаційного розділення суспензії, що утворюється під час регенерації відпрацьованого поглинального розчину у виробництві пігментного титану(IV) оксиду, доповнена СКФА, що забезпечує інтенсифікацію процесів окиснення іонів  $SO_3^{2-}$  до  $SO_4^{2-}$ . Це сприяє утворенню гіпсу, який можна використати як будівельний матеріал.

4. Застосування суміщеного кавітаційно-флотаційного апарату (СКФА), компонентом якого є гідродинамічний струменевий кавітатор (ГДСК), дає змогу реалізувати процеси розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку в одному апараті. Завдяки цьому зменшуються сумарні матеріально-енергетичні витрати на здійснення двох процесів.

5. Результати техніко-економічного оцінювання двох різновидів процесу флотаційного збагачення сірчаної руди свідчать, що питома вартість вилучення сірки за розробленим кавітаційно-флотаційним процесом є у 8,5 разів меншою, ніж у випадку використання традиційної пневматичної флотації.

6. Результати, наведені у даному розділі, опубліковано у [22].

## ВИСНОВКИ

Унаслідок виконання дисертаційної роботи вирішено важливе науково-технічне завдання, яке полягає у розробленні конструкції гідродинамічного кавітатора і гнучкого, ефективного та енергоощадного процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ.

1. На основі аналізу джерел інформації щодо існуючих способів розділення водних гетерогенних середовищ, застосування кавітації як методу інтенсифікації різноманітних технологічних процесів, принципів дії і конструкційного оформлення основних типів генераторів кавітації, а також в аспекті реалізації сучасних концепцій синтезу різних процесів запропоновано суміщення процесів кавітації та флотації в одному апараті, ГДСК, з метою підвищення ефективності розділення седиментаційно стійких систем.

2. На підставі експериментальної залежності кількості виділеної теплової енергії від параметрів роботи ГДСК з використанням методу Брандона побудовано 4-факторну мультиплікативну статистичну модель кавітаційного оброблення води. Аналіз графічної інтерпретації цієї моделі дав змогу встановити оптимальні як конструктивні (діаметр сопла –  $(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$  м, кількість сопел – 4...5 од., кут атаки струменів – 144...170 град.), так і параметри процесу (тиск –  $(5,4 \dots 6,0) \cdot 10^5$  Па), за яких досягається максимальний енергетичний коефіцієнт корисної дії ГДСК, що дорівнює 90,7%. Розроблену статистичну модель з певними уточненнями можна використати для масштабування процесів кавітаційного оброблення водних гетерогенних середовищ.

3. Спосіб збудження кавітаційних явищ впливає на структуру утворених кавітаційних полів і на перебіг подальшої флотації. У ГДСК, на відміну від УЗ-випромінювача, дисперсність бульбашок є більшою і вона зростає зі збільшенням потужності. Внаслідок цього у ГДСК формується, окрім

кавітаційної, зона флотації, утворення якої під дією УЗ-випромінювань не зафіксовано.

4. Оброблення даних результатів сонохімічного аналізу розвитку кавітаційних полів дає змогу цілеспрямовано змінювати параметри роботи ГДСК з метою підвищення ефективності як кавітаційного оброблення середовища, так і здійснення флотації у реальному масштабі часу, що забезпечує гнучкість технологічного процесу та його високу керованість.

5. Введення повітря (об'ємна витрата –  $(6 \pm 0,75) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ), яке виконує роль зародків кавітації, у водні середовища дає змогу інтенсифікувати кавітаційні явища з утворенням сполук окисного характеру – кисню, гідрогену пероксиду тощо – та супутній їм ефект флотації дисперсних частинок.

6. Зміна тривалості кавітаційного оброблення суспензій у ГДСК, як показано на прикладі кальцію гідроксиду, дає змогу цілеспрямовано регулювати внесок процесів флотації та коагуляції у загальний ступінь розділення водного гетерогенного середовища. Впродовж перших 900 с зростає седиментаційна стійкість частинок внаслідок збільшення величини їх електрокінетичного потенціалу до 48...72 мВ й збільшується ефект флотації; зі збільшенням часу оброблення внаслідок формування на поверхнях бульбашок “шламового покриття” відбувається коагуляція дисперсних частинок та їх седиментація.

7. Використання кавітаційно-флотаційного процесу дає змогу отримувати флотоконцентрат зі значно більшим вмістом сірки (63,6% мас.), ніж у випадку традиційного флотаційного збагачення сірчаної руди у пневмомеханічних машинах (38,4% мас.).

8. Розраховані у початковий період часу швидкості процесів окиснення кальцію сульфїту до кальцію сульфату у реакторі з мішалкою ( $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ кмоль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ) та у ГДСК ( $19,94 \cdot 10^{-2} \text{ кмоль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ) свідчать, що ефективність окиснення у кавітаційних полях у 15 разів вища, ніж за механічного

перемішування реакційного середовища. Утворений у ГДСК гіпс осідає в 4 рази швидше, ніж осад у реакторі з мішалкою (1800 с проти 7200 с).

9. Розроблені на підставі виконаних досліджень процесів кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ технологічні схеми процесів збагачення сірчаної руди, розділення суспензії, що утворюється під час регенерації відпрацьованого поглинального розчину у виробництві пігментного титану(IV) оксиду, розчинення лангбейнітової руди та флотації нерозчинного залишку дають змогу забезпечити ефективне розділення та очищення вказаних систем до нормативних показників.

10. Виконані узагальнені техніко-економічні розрахунки процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди як типового у технології неорганічних речовин свідчать про його високу ефективність: питома вартість вилучення сірки із руди за використання розробленого процесу є у 8,5 разів меншою, ніж у разі традиційної пневматичної флотації, а річний економічний ефект становить 64,57 млн. грн.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Інтенсифікація процесів реагентного водоочищення акустичними випромінюваннями / З.О. Знак, Л.В. Савчук, Р.В. Мних, Ю.В. Сухацький // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, Ч. III. (Харків, 01-03 червня 2011 р.). – Харків: НТУ “ХПІ”, 2011. – с. 219.

2. До питання акустичної інтенсифікації процесів очищення стічних вод / З.О. Знак, Л.В. Савчук, Р.В. Мних, Ю.В. Сухацький // КАЗАНТИП-ЭКО-2011. Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения: Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции, 6-10 июня 2011 г., г. Щелкино, АР Крым: в 3 т., Т. 3 / УкрГНТЦ “Енергосталь”. – Харьков: ПП Шаповалова Т.М., 2011. – с. 299-300. – ISBN 978-617-578-054-1.

3. Мних Р.В. Гідродинамічна кавітація в технологіях реагентного очищення стічних вод м'ясопереробної галузі / Р.В. Мних, Ю.В. Сухацький, З.О. Знак // Регіональні екологічні проблеми: Матеріали V Міжнародної наукової конференції студентів, магістрантів і аспірантів, (Одеса, 21-23 березня 2012 р.). – Одеса: ОДЕКУ, 2012. – с. 211-213.

4. Мних Р.В. Про вилучення зі стічних вод м'ясопереробних підприємств окремих компонентів під дією акустичних випромінювань / Р.В. Мних, Ю.В. Сухацький // IV Всеукраїнська науково-практична конференція “Вода в харчовій промисловості”: Збірник матеріалів IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, (Одеса, 28-29 березня 2013 р.). – Одеса: ОНАХТ, 2013. – с. 135-137.

5. Сухацький Ю.В. Дослідження активації кальцію гідроксиду в кавітаційних полях / Ю.В. Сухацький // 71-ша студентська науково-технічна конференція: Збірник тез доповідей, (Львів, жовтень-листопад 2013 р.). – Львів:

Видавництво Львівської політехніки, 2013. – с. 236-238. – ISBN 978-617-607-531-8.

6. Пат. 79180 Україна, МПК C02F 1/58. Спосіб очищення стічних вод / З.О. Знак, В.Т. Яворський, Р.В. Мних, Л.В. Савчук, Ю.В. Сухацький; заявник і патентовласник Національний університет “Львівська політехніка”. – № 2012 12818; заявл. 12.11.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7.

7. Знак З.О. Розроблення процесу кавітаційно-флотаційного очищення стічних вод / З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // V Всеукраїнська науково-практична конференція “Вода в харчовій промисловості”: Збірник матеріалів V Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, (Одеса, 27-28 березня 2014 р.). – Одеса: ОНАХТ, 2014. – с. 130.

8. Дослідження системи фізико-хімічних процесів у гідродинамічному кавітаторі / В.Т. Яворський, З.О. Знак, Р.В. Мних, Ю.В. Сухацький // Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання: Матеріали Тринадцятої Міжнародної науково-практичної конференції: збірник наукових статей, (Львів, 29-30 травня 2014 р.). – Львів: ЛьДЦНП, 2014. – с. 88-89.

9. Знак З.О. Дослідження впливу конструктивних параметрів гідродинамічного струменевого кавітатора на ефективність генерування парогазових бульбашок / З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // Актуальні задачі сучасних технологій: Зб. тез доповідей III Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 19-20 листопада 2014 р.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ТНТУ, 2014. – с. 13-14.

10. Знак З.О. Розроблення кавітаційно-флотаційного процесу очищення стічних вод в аспекті реалізації сучасних концепцій синтезу хіміко-технологічних систем / З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2014. – № 787. – с. 75-79.



11. Знак З.О. Дослідження залежності ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора від конструктивних параметрів кавітувального елемента / З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // Вібрації в техніці та технологіях. – 2015. – № 2 (78). – с. 18-26. – ISSN 2306-8744.

12. Яворський В.Т. Енергоощадні процеси у технологіях кондиціонування природних і стічних вод / В.Т. Яворський, З.О. Знак, Р.В. Мних, Н.М. Гнатишин, Г.Ф. Винявська, Ю.В. Сухацький // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали Восьмої Міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 2-3 квітня 2015 р.): Зб. наук. статей. – Львів: ЛВДЦНП, 2015. – с. 286-288.

13. Сухацький Ю.В. Дослідження ефективності кавітаційного оброблення водного середовища / Ю.В. Сухацький, З.О. Знак, О.Г. Курилець, Р.В. Мних // VI Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів “Вода в харчовій промисловості”: Збірник матеріалів VI Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, (Одеса, 9 квітня 2015 р.). – Одеса: ОНАХТ, 2015. – с. 79.

14. Сухацький Ю.В. Енергетичні аспекти роботи гідродинамічного струменевого кавітатора / Ю.В. Сухацький, З.О. Знак, Л.В. Савчук, Р.В. Мних // VII Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Хімія та сучасні технології”: Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Дніпропетровськ, 27-29 квітня 2015 р.): в 9 т., Т. 2. – Дніпропетровськ: Видавничо-поліграфічний комплекс ДВНЗ УДХТУ, 2015. – с. 43-44.

15. Сухацький Ю.В. Використання кавітаційної флотації для очищення стічних вод підприємств харчової та переробної галузей промисловості / Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // XIII Всеукраїнська конференція молодих вчених та студентів з актуальних питань сучасної хімії з міжнародною участю: Матеріали конференції, (Дніпропетровськ, 19-21 травня 2015 р.) / Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, Інститут органічної хімії НАН

України. – Дніпропетровськ: Середняк Т.К., 2015. – с. 109. – ISBN 978-617-7257-49-2.

16. Знак З.О. Аераційний ефект гідродинамічної кавітації в кавітаційно-флотаційній технології очищення стічних вод від органічних сполук / З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання: Матеріали Чотирнадцятої Міжнародної науково-практичної конференції: збірник наукових статей, (Львів, 28-29 травня 2015 р.). – Львів: ЛВДЦНП, 2015. – с. 61-63.

17. Знак З.О. Дослідження аерації води під час її кавітаційного оброблення / З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // V-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology – 2015): Збірник наукових праць, (Вінниця, 23-26 вересня 2015 р.). – Вінниця: ТОВ “Нілан-ЛТД”, 2015. – с. 167. – ISBN 978-966-924-065-1.

18. Сухацький Ю.В. Оксигеновмісні радикали у кавітаційно-флотаційній технології очищення стічних вод / Ю.В. Сухацький, З.О. Знак, Р.В. Мних // VII Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні проблеми технології неорганічних речовин та ресурсозбереження”: Збірник матеріалів VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Дніпропетровськ, 30 вересня-2 жовтня 2015 р.). – Дніпропетровськ: Акцент ПП, 2015. – с. 155. – ISBN 978-966-921-031-9.

19. Знак З.О. Розроблення гнучкої кавітаційно-флотаційної технології очищення рідкофазних середовищ / З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин (APCTOS2): Матеріали II Міжнародної наукової конференції, (Львів, 5-7 листопада 2015 р.). – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2015. – с. 107. – ISBN 978-617-607-842-5.

20. Сухацький Ю.В. Дослідження впливу повітря на розвиток кавітаційних явищ у кавітаційно-флотаційній технології очищення рідиннофазових середовищ / Ю.В. Сухацький, З.О. Знак, Р.В. Мних //

Матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції “Сучасні проблеми агроекології”, (Миколаїв, 1 грудня 2015 р.). – Миколаїв: Миколаївська ДСДС ІЗЗ, 2015. – с. 16.

21. Сухацький Ю.В. Енергетичний аналіз роботи гідродинамічного струменевого кавітатора у процесах очищення стічних вод за кавітаційно-флотаційною технологією / Ю.В. Сухацький, З.О. Знак, Р.В. Мних // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2015. – № 812. – с. 354-359. – ISSN 0321-0499.

22. Пат. 101525 Україна, МПК В01F 3/00, В01J 14/00, С02F 1/34. Гідродинамічний струменевий кавітатор / В.Т. Яворський, З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних, Р.Р. Оленич, О.Г. Курилець; заявник і патентовласник Національний університет “Львівська політехніка”. – № 2015 01762; заявл. 27.02.2015; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.

23. Знак З.О. Особливості кавітаційно-флотаційного вилучення натрію оксалату зі стічних вод шкіряних виробництв / З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // VII Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів “Вода в харчовій промисловості”: Збірник матеріалів VII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, (Одеса, 26-27 квітня 2016 р.). – Одеса: ОНАХТ, 2016. – с. 67-70.

24. Знак З.О. Можливість управління ефективністю кавітаційно-флотаційної технології очищення рідкофазних середовищ / З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // П'ятнадцята Міжнародна науково-практична конференція “Ресурси природних вод Карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання”: Матеріали П'ятнадцятої Міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 26-27 травня 2016 р.): Зб. наук. статей. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2016. – с. 87-89.

25. Znak Z. Generation of gas bubbles in relation to the ambient liquid conditions / Z. Znak, Yu. Sukhatskiy, R. Mnykh // 15<sup>th</sup> Meeting of the European

Society of Sonochemistry: Book of abstracts (Istanbul, Turkey, June 27-July 1, 2016). – Istanbul: Boğaziçi University, Institute of Environmental Sciences, 2016. – pp. 152-153.

26. Znak Z. The Brandon method in modelling the cavitation processing of aqueous media / Z. Znak, Yu. Sukhatskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 3/8 (81). – pp. 37-42. – ISSN 1729-3774.

27. Сухацький Ю.В. Дослідження ефективності кавітаційно-флотаційної технології очищення рідкофазних середовищ від дисперсних частинок / Ю.В. Сухацький // Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.4. – с. 295-303.

28. Яворський В.Т. Енергетичні характеристики оброблення агресивних водних середовищ у гідродинамічних кавітаторах / В.Т. Яворський, З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2016. – Т. 52, № 4. – с. 132-136.

29. Gregory J. Particles in water. Properties and processes / John Gregory. – London: Taylor&Francis Group, 2006. – 173 p.

30. Белюченко И.С. Дисперсность отходов и их свойства [Електронний ресурс] / И.С. Белюченко // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 92 (08). – с. 1-22. – Режим доступа до ресурсу: <http://cyberleninka.ru/article/n/dispersnost-othodov-i-ih-svoystva>.

31. Огданський К.М. Екологічна динаміка і метрологічні основи її оцінювання та управління нею / К.М. Огданський // Науковий вісник Херсонського державного університету. – 2014. – Вип. 9, ч. 3. – с. 41-46. – (Серія “Економічні науки”).

32. Drechsel P. Wastewater. Economic asset in an urbanizing world [Електронний ресурс] / P. Drechsel, M. Qadir, D. Wichelns. – 2015. – 282 p. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.springer.com/978-94-017-9544-9>.

33. Jhansi S.Ch. Wastewater treatment and reuse: sustainability options / S.Ch. Jhansi, S.K. Mishra // The Journal of Sustainable Development. – 2013. – Vol. 10, Iss. 1. – pp. 1-15.

34. In control of wastewater to protect people and ecosystems. Efficient solutions for treatment of wastewater / [S.U. Madsen, P. Tårnhøj, O.G. Dalgaard et al.]; Editor in Chief P. Klee // Rethink Water & Danish Water Forum. – Copenhagen: Rethink Water & Danish Water Forum, 2013. – 25 p.

35. Свердлюк І.В. До проблеми забруднення водних ресурсів України / І.В. Свердлюк, С.В. Ус // Природокористування та ресурсозбереження. – 2013. – Вип. XIX, № 1. – с. 271-281.

36. Шандиба О.Б. Ефективність тонкошарового секціонування горизонтальних відстійників / О.Б. Шандиба, М.М. Рубан, О.В. Семерня // Вісник Сумського національного аграрного університету. – 2013. – Вип. 10 (25). – с. 139-142. – (Серія “Механізація та автоматизація виробничих процесів”).

37. Беляев Н.Н. Снижение техногенной нагрузки на водоем при сбросе сточных вод за счет повышения эффективности работы отстойников / Н.Н. Беляев, Л.Ф. Долина, В.А. Козачина // Электромагнитна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2012. – № 3. – с. 92-97.

38. Нагорная Е.К. Оценка эффективности работы вертикальных отстойников систем водоотведения на основе численной модели / Е.К. Нагорная // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 3 (204). – с. 20-27.

39. Смаилова А.А. Методы очистки сточных вод нефтегазового комплекса / А.А. Смаилова // Молодой ученый. – 2014. – № 5. – с. 100-103.

40. Долина Л.Ф. Сточные воды предприятий горной промышленности и методы их очистки: справочное пособие / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск: Молодежная комиссия УЭА “Зелений світ”, 2000. – 42 с.

41. Аленичев Н.В. К вопросу о доочистке бытовых сточных вод на фильтрах компактных сооружений КОБК-25 / Н.В. Аленичев, Н.В. Рыков // 7

Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики “Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики” (Тула-Донецк-Минск, 27-28 окт. 2011 г.): Материалы конференции. – Тула, 2011. – Т. 2. – с. 359-361.

42. Герасимов Г.Н. Технический справочник по обработке воды: в 2 т. / [ред. Г.Н. Герасимов и др.]; пер. с фр. ООО “Новый журнал”. – СПб.: Новый журнал, 2007. – Т. 1. – 1696 с.

43. Tiehm A. Particle size analysis for improved sedimentation and filtration in waste water treatment / A. Tiehm, V. Herwig and U. Neis // *Water Science and Technology*. – 1999. – Vol. 39 (8). – pp. 99-106.

44. Low-cost harvesting of microalgae biomass from water / [E.S. Bejor, C. Mota, N.M. Ogarekpe et al.] // *International Journal of Development and Sustainability*. – 2013. – Vol. 2, No. 1. – pp. 1-11.

45. Пат. 7112272 США, МПК В29С 65/00. Liquid and gas porous plastic filter and methods of use: 3M Innovative Properties Company, St. Paul, MN (US) / D.E. Hughes, R. Buhler; assignee 3M Innovative Properties Company, St. Paul, MN (US). – № 10/216186; заявл. 12.08.02; опубл. 02.09.04. – 22 р.

46. Пат. 17616 Україна, МПК В01D 29/50. Фільтр для очистки води: товариство з обмеженою відповідальністю “Науково-виробниче підприємство Аквілон” / В.Л. Филипчук, В.О. Забродський, Л.В. Филипчук, О.В. Забродський. – № 2006 01073; заявл. 06.02.06; опубл. 16.10.06, Бюл. № 10. – 3 с.

47. Челядин Л.І. Енергозберігаюча технологія попередньої очистки стічних вод вуглецево-мінеральними матеріалами / Л.І. Челядин // *Научно-технический сборник “Коммунальное хозяйство городов”*. – 2003. – № 49. – с. 81-84.

48. Нестер А.А. Масоперенос водних розчинів у двошарових фільтрах / А.А. Нестер, А.П. Білик, С.П. Демчик // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2012. – № 6. – с. 57-60.

49. Гіроль А.М. Дослідження взаємозв'язку коефіцієнтів неоднорідності фракційного складу плаваючого фільтруючого шару водоочисних фільтрів, визначених за масою та об'ємом / А.М. Гіроль // Научно-технический сборник “Коммунальное хозяйство городов”. – 2003. – № 53. – с. 59-66.

50. Application of peat filter media in treating kitchen wastewater / [R. Mohamed, Ch.-M. Chan, H. Ghani et al.] // International Journal of Zero Waste Generation. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – pp. 11-16.

51. Lyko H. Filters, screens and separators in water and wastewater treatment / H. Lyko // F&S International Edition. – 2012. – No. 12. – pp. 28-30.

52. Определение рациональных параметров центрифугирующего устройства для осветления воды / С.М. Эпоян, А.С. Карагяур, А.Л. Скорик, Н.Ю. Гаврилова // Научно-технический сборник “Коммунальное хозяйство городов”. – 2010. – № 93. – с. 339-343.

53. Гуляев В.М. Исследование влияния улучшенной технологии обезвоживания осадков городских сточных вод на экологическую безопасность возвратных вод (на примере очистных сооружений г. Днепродзержинска) / В.М. Гуляев, И.М. Корниенко // Экология ЦЧО РФ. – 2013. – № 1-2 (30-31). – с. 38-44.

54. HAUS. Технологии центрифугирования [Электронный ресурс] / Компания “HAUS”. – 19 с. – Режим доступа до ресурсу: <http://aqua-control.ru/images/files/broshura-haus1.pdf>.

55. Бабенко А.П. Гидравлическая крупность – основная характеристика при расчете отстойников / А.П. Бабенко, И.В. Стрелец // Интернет-журнал “Строительство уникальных зданий и сооружений”. – 2013. – № 6 (11). – с. 34-42.

56. Experimental study on downhole oil-water separation hydrocyclone / [Xu Yan, Yuan Lin, Wang Zunce et al.] // The Open Petroleum Engineering Journal. – 2015. – Vol. 8. – pp. 257-261.

57. Гетманцев С.В. Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами: Научное издание / С.В. Гетманцев, И.А. Нечаев, Л.В. Гандурина. – М.: Издательство АСВ, 2008. – 272 с.

58. Altaher H. Enhancement of quality of secondary industrial wastewater effluent by coagulation process: a case study / H. Altaher, A. Alghambi // *Journal of Environmental Protection*. – 2011. – Vol. 2. – pp. 1250-1256.

59. Leiviskä T. Coagulation and size fractionation studies on pulp and paper mill process and wastewater streams / T. Leiviskä. – Oulu: Faculty of Technology, Department of Process and Environmental Engineering, University of Oulu, Finland, 2009. – 348 p.

60. Ghaly A.E. Effective coagulation technology for treatment of grease filter washwater / A.E. Ghaly, A. Snow, B.E. Faber // *American Journal of Environmental Sciences*. – 2007. – Vol. 3 (1). – pp. 19-29.

61. Study of the coagulation process in wastewater treatment or dairy industries / Mahshid Loloei, Hosein Alidadi, Gholamabbas Nekonom, Yousef Kor // *International Journal of Environmental Health Engineering*. – September-october 2013. – Vol. 2 (5). – pp. 17-21.

62. Tripathy T. Flocculation: a new way to treat the wastewater / T. Tripathy, B.R. De // *Journal of Physical Sciences*. – 2006. – Vol. 10. – pp. 93-127.

63. Polymeric flocculants for wastewater and industrial effluent treatment / W. Brostow, H.E. Hagg Lobland, S. Pal, R.P. Singh // *Journal of Materials Education*. – 2009. – Vol. 31 (3-4). – pp. 157-166.

64. Tzoupanos N.D. Coagulation-flocculation processes in water/wastewater treatment: the application of new generation of chemical reagents / N.D. Tzoupanos, A.I. Zouboulis // 6th IASME/WSEAS International Conference on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT (HTE'08), August 20-22, 2008. – Rhodes, Greece, 2008. – pp. 309-317.



65. Пат. 0316467 США, МПК С 02 F 1/52. Water treatment compositions and processes / Stewart Claude Mac. – № 87116933; заявл. 17.11.87; опубл. 24.05.89. – 13 p.
66. Cosa S. Biofloculant production by a consortium of two bacterial species and its potential application in industrial wastewater and river water treatment / S. Cosa, A. Okoh // Pol. J. Environ. Stud. – 2014. – Vol. 23, No. 3. – pp. 689-696.
67. Characterization of biofloculants produced by bacteria isolated from crude petroleum oil / [S. Zaki, S. Farag, G. Abu Elreesh et al.] // Int. J. Environ. Sci. Tech. – 2011. – Vol. 8 (4). – pp. 831-840.
68. Production and application of a novel biofloculant by multiple-microorganism consortia using brewery wastewater as carbon source / [Z.-Q. Zhang, B. Lin, S.-Q. Xia et al.] // Journal of Environmental Sciences. – 2007. – Vol. 19. – pp. 667-673.
69. Biofloculant production by culture of *Serratia ficaria* and its application in wastewater treatment / [W.-X. Gong, S.-G. Wang, X.-F. Sun et al.] // Bioresource Technology. – 2008. – Vol. 99. – pp. 4668-4674.
70. Chemical and electro-coagulation techniques in coagulation-flocculation in water and wastewater treatment – a review / [L.N. Ukiwe, S.I. Ibeneme, C.E. Duru et al.] // Journal of Advances in Chemistry. – 2014. – Vol. 9, No. 3. – pp. 1988-1999.
71. Electrocoagulation in wastewater treatment / E. Butler, Y.-T. Hung, R.Y.-L. Yeh, M.S. Al Ahmad // Water. – 2011. – Vol. 3. – pp. 495-525.
72. Vepsäläinen M. Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters: thesis for the degree of Doctor of Science (Technology) / M. Vepsäläinen. – Kuopio, Finland, 2012. – 146 p.
73. Naje A.S. Electrocoagulation technology in wastewater treatment: a review of methods and applications / A.S. Naje, S.A. Abbas // Civil and Environmental Research. – 2013. – Vol. 3, No. 11. – pp. 29-42.

74. Tezcan Un U. Electrocoagulation of landfill leachate with monopolar aluminum electrodes / U. Un Tezcan, E. Oduncu // *Journal of Clean Energy Technologies*. – 2014. – Vol. 2, No. 1. – pp. 15-17.

75. Slaughterhouse wastewater treatment by combined chemical coagulation and electrocoagulation process / [E. Bazrafshan, F.K. Mostafapour, M. Farzadkia et al.] // *PLoS ONE*. – 2012. – Vol. 7, Iss. 6. – pp. 1-8.

76. Judd S. Membranes for industrial wastewater recovery and re-use / S. Judd, B. Jefferson. – Oxford: Elsevier Science Ltd, 2003. – 299 p. – ISBN 1856173895.

77. Развитие мембранных технологий и возможность их применения для очистки сточных вод предприятий химии и нефтехимии [Электронный ресурс] / А.Г. Баландина, Р.И. Хангильдин, И.Г. Ибрагимов, В.А. Мартяшева // *Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело”*. – 2015. – № 5. – с. 336-375. – Режим доступа до ресурсу: [http://ogbus.ru/issues/5\\_2015/ogbus\\_5\\_2015\\_p336-375\\_BalandinaAG\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/5_2015/ogbus_5_2015_p336-375_BalandinaAG_ru.pdf).

78. Бойко Н.И. Применение мембранных технологий в очистке воды / Н.И. Бойко, В.А. Одарюк, А.В. Сафонов // *Технологии гражданской безопасности*. – 2014. – Т. 11, № 2 (40). – с. 64-69.

79. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: пер. с англ. / М. Мулдер. – М.: Мир, 1999. – 513 с., ил. – ISBN 5-03-003114-6.

80. Кретов И.Т. Осветление пива в аппарате с тангенциально-поточной микрофльтрацией / И.Т. Кретов, А.И. Ключников, А.И. Потапов // *Известия вузов. Пищевая технология*. – 2006. – № 6. – с. 66-68.

81. Митченко Т.Е. Основные пути повышения эффективности удаления гуминовых веществ из воды методом ультрафльтрации / Т.Е. Митченко, Е.М. Светлейшая // *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*. – 2011. – № 3 (5). – с. 16-31.

82. Дейниченко Г.В. Дослідження фізико-хімічних властивостей ультрафільтраційних мембран типу ПАН [Електронний ресурс] / Г.В. Дейниченко, З.О. Мазняк, О.В. Гафуров // *Прогресивні техніка та технології*

харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2009. – Вип. 2. – с. 263-268. – Режим доступу до ресурсу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt\\_2009\\_2\\_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2009_2_41).

83. Ультрафльтрация смеси сока клубней топинамбура и молочной сыворотки на полимерных мембранах / [С.П. Бабенышев, С.А. Емельянов, В.Е. Жидков и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 1. – с. 97-100. – ISSN 2074-9414.

84. Фазуллин Д.Д. Утилизация водозмульсионных смазочно-охлаждающих жидкостей на основе мембранных методов / Д.Д. Фазуллин, Г.В. Маврин, Р.Г. Мелконян // Вектор науки ТГУ. – 2012. – № 4 (22). – с. 122-125.

85. Drioli E. Membrane operations. Innovative separations and transformations / E. Drioli, L. Giorno. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. – 551 p.

86. Драгинский В.Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод: науч. изд. / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева, Гетманцев С.В. – М.: ППП “Типография “Наука”, 2005. – 576 с. – ISBN 5-9900481-1-4.

87. Сазонов Д.В. Флотационная установка для очистки сточных вод [Электронный ресурс] / Д.В. Сазонов // Молодежный научно-технический вестник. – 2013. – № 1. – Режим доступу до ресурсу: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/534278.html>.

88. Ralston J. Flotation. Bubble-particle capture / J. Ralston // Encyclopedia of Separation Science. – San Diego: Elsevier Science Publishing Co Inc., 2000. – Vol. 4. – pp. 1464-1471.

89. Моркун В.С. Формирование управления распределением газовых пузырьков по размерам в процессе флотации [Электронный ресурс] / В.С. Моркун, А.В. Пикильняк // Качество минерального сырья. – 2014. – с. 26-34. – Режим доступу до ресурсу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/kachmin\\_2014\\_2014\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/kachmin_2014_2014_5).

90. Матинин А.С. Повышение селективности разделения слабоконтрастных руд на основе управления гидродинамическим режимом

флотации: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 25.00.13 “Обогащение полезных ископаемых” / А.С. Матинин. – Москва, 2013. – 25 с.

91. Colic M. The development and application of centrifugal flotation systems in wastewater treatment / M. Colic, W. Morse, J.D. Miller // *Int. J. Environment and Pollution*. – 2007. – Vol. 30, No. 2. – pp. 296-312.

92. Шевченко Т.А. Очистка сточных вод методом флотации / Т.А. Шевченко, Е.К. Жоржوليани // *Комунальне господарство міст: наук.-техн. збірник*. – Х.: ХНАМГ, 2013. – Вип. 107. – с. 226-231. – (Серія “Технічні науки і архітектура”). – ISSN 0869-1231.

93. Клейн М.С. Подготовка пульпы перед флотацией методом масляной аэроагломерации угольных частиц / М.С. Клейн, Т.Е. Вахонина // *Вестник КузГТУ*. – 2012. – № 1 (89). – с. 28-30.

94. Анализ химико-технологических водных систем нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий [Электронный ресурс] / Ю.Р. Абдрахимов, Г.М. Шарафутдинова, Р.И. Хангильдин, А.Р. Хангильдина // *Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело”*. – 2011. – № 6. – с. 222-260. – Режим доступа до ресурсу: [http://ogbus.ru/authors/Abdrakhimov/Abdrakhimov\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Abdrakhimov/Abdrakhimov_1.pdf).

95. Применение пневматической флотационной машины типа “реактор-сепаратор” для очистки промышленных сточных вод от нефтепродуктов и взвешенных веществ / [В.Д. Самыгин, Л.О. Филиппов, В.В. Панин и др.] // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2006. – № 10. – с. 365-376.

96. Алексеев Д.В. Комплексная очистка стоков промышленных предприятий методом струйной флотации / Д.В. Алексеев, Н.А. Николаев, А.Г. Лаптев. – Казань: КГТУ, 2005. – 156 с.

97. Чебакова И.Б. Очистка сточных вод / И.Б. Чебакова. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. – 84 с.

98. Сергеев П.В. Полігонні і промислові випробовування технології селективної флокуляції вугільних шламів / П.В. Сергеев, В.С. Білецький // Збагачення корисних копалин. – 2009. – № 35 (76). – с. 124-131.

99. Микропузырьковая флотация – экологически чистая и эффективная технология глубокой переработки угля / Б.В. Бошнятов, Е.В. Бошнятов, В.И. Косинцев, А.И. Сечин // Научно-технический журнал “Вестник Алматинского института энергетики и связи”. – 2009. – № 1 (4). – с. 13-18. – ISSN 1999-9801.

100. Использование реагентов для интенсификации процесса напорной флотации при очистке стоков / [Л.М. Кочетов, Б.С. Сажин, М.П. Тюрин и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – Т. XXV, № 2 (118). – с. 101-105.

101. Авдохин В.М. Современные технологии обогащения алмазосодержащих кимберлитов / В.М. Авдохин, Е.Н. Чернышева // ГИАБ. – 2010. – № 12. – с. 465-477.

102. Орлин Н.А. Разделение углеродоксидмарганцевой смеси методом флотации / Н.А. Орлин // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 4. – с. 57.

103. Oliveira C. Operating parameters affecting the formation of kaolin aerated flocs in water and wastewater treatment / C. Oliveira, R.T. Rodrigues, J. Rubio // Clean – Soil, Air, Water. – 2014. – № 42 (7). – pp. 909-916.

104. Milledge J.J. A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production / J.J. Milledge, S. Heaven // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. – 2013. – Vol. 12, Iss. 2. – pp. 165-178.

105. Рудник М.И. Фильтрационное и флотационное оборудование ИНСТЭБ для очистки сточных вод / М.И. Рудник, О.В. Кичигин // Водоочистка. – 2010. – № 2. – с. 67-69.

106. Песин С.Д. Разработка технологии очистки сточных вод птицефабрик методом напорной флотации / С.Д. Песин, В.Ф. Моисеев // Інтегровані хімічні технології у хімічній техніці та екології: ІІ Університетська науково-практична

студентська конференція магістрантів: Зб. тез доповідей. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – с. 19-21.

107. Стенин Н.Ю. Разработка флотационной технологии и пневматического аппарата для очистки оборотных и сточных вод: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 25.00.13 “Обогащение полезных ископаемых” / Н.Ю. Стенин. – Москва, 2009. – 21 с.

108. Дубинець К.О. Застосування електрофлотації для очищення стічних вод, які утворюються при виробництві капсульованого риб’ячого жиру / К.О. Дубинець, Н.В. Федак // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск “Хімія, хімічна технологія та екологія”. – 2009. – № 21. – с. 32-37.

109. Review: Removal of oversize & recovery of particles from suspensions in the nano size range: research report [Електронний ресурс] / [M. Meireles, F. Bourgeois, M. Tourbin et al.]. – Toulouse: Université de Toulouse, 2010. – 59 p. – Режим доступу до ресурсу: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01186033>.

110. Comninellis Ch. Electrochemistry for the environment / Ch. Comninellis, G. Chen. – New York: Springer Science+Business Media, 2010. – 563 p.

111. Flotation technology: handbook of environmental engineering / L.K. Wang, N.K. Shamas, W.A. Selke, D.B. Aulenbach. – [Vol. 12]. – New York-Dordrecht-Heidelberg-London: Springer Science & Business Media, 2010. – 680 p.

112. Усовершенствование технологической схемы очистки сточных вод теплоэнергетики / В.А. Гронь, В.В. Коростовенко, Н.М. Капличенко, А.В. Галайко // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 10. – с. 330-333.

113. Угляр Ю.М. Електрофлотокоагуляційне очищення стічних вод підприємства ТОВ “Коломийський м’ясокомбінат” / Ю.М. Угляр, І.Д. Борщишин, У.В. Хром’як // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2/10 (68). – с. 30-34.

114. Mohta A. Electro-chemical treatment of wastewater: a dissertation for the award of the degree of masters of technology (environment science & technology) / A. Mohta. – Patiala, 2007. – 65 p.

115. Simultaneous removal of turbidity and humic acid using electrocoagulation/flotation process in aqua solution [Электронный ресурс] / A. Seid-Mohammadi, Z. Sharifi, A. Shabanlo, G. Asgari // Avicenna Journal of Environmental Health Engineering. – 2015. – Iss. 2 (1). – 5 p. – Режим доступа до ресурсу: <http://cdn.neoscriber.org/cdn/serve/f7/bb/f7bb52dc6b7a39ec51a897f178fac8dfe40934f9/ajehe-02-01-3310.pdf>.

116. Kyzas G.Z. Research activities related to flotation process [Электронный ресурс] / G.Z. Kyzas, E.A. Deliyanni, K.A. Matis // Trends in Green Chemistry. – 2015. – Vol. 1, No. 1 (4). – 8 p. – Режим доступа до ресурсу: <http://green-chemistry.imedpub.com/research-activities-related-toflotation-process.pdf>.

117. Саплин Л.А. Лабораторные исследования процесса электрофлотации сточных вод / Л.А. Саплин, В.В. Старших // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 12. – с. 69-70.

118. Bulatovic S.M. Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice / S.M. Bulatovic. – [Vol. 1: Flotation of sulfide ores]. – Amsterdam: Elsevier, 2007. – 458 p. – ISBN 0444530290.

119. Drankhar P. Homogenization fundamentals [Электронный ресурс] / P. Drankhar // IOSR Journal of Engineering. – 2014. – Vol. 4, Iss. 5. – 8 p. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.iosrjen.org/Papers/vol4\\_issue5%20\(part-4\)/A04540108.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20(part-4)/A04540108.pdf).

120. Effect of impellers blade shape on particles suspension / D. Ceres, T. Jirout, F. Rieger, P. Seichter // Czasopismo Techniczne. – 2008. – No. 2. – pp. 57-65. – ISSN 0011-4561.

121. Experimental characterisation and modelling of homogeneous solid suspension in an industrial stirred tank [Электронный ресурс] / [S. Calvo, A.

Delafosse, M. Collignon et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2013. – 9 p. – Режим доступу до ресурсу: <http://ade.sagepub.com/content/5/329264.full.pdf>.

122. A study of mixing structure in stirred tanks equipped with multiple four-blade Rushton impellers / [Z. Driss, S. Karray, W. Chtourou et al.] // *The Archive of Mechanical Engineering*. – 2012. – Vol. LIX, No. 1. – pp. 53-72.

123. Папченко А.А. Експериментальне дослідження впливу кількості каналів ротора та статора роторно-динамічного агрегата-гомогенізатора на його енергетичні характеристики / А.А. Папченко, М.С. Овчаренко, С.Ф. Ковальов // *Вісник СумДУ*. – 2012. – № 4. – с. 53-56. – (Серія “Технічні науки”).

124. A mechanical blender for homogenization of the pulps of guava / N. Ndjiya, D. Hama, E. Nso, J. Kayem // *Greener Journal of Agricultural Sciences*. – 2012. – Vol. 2 (4). – pp. 152-161. – ISSN 2276-7770.

125. Курманов А.К. Теория дробления ингредиентов взвесей / А.К. Курманов, Т.И. Исинтаев, К.С. Рыспаев // *Известия ОГАУ*. – 2013. – № 1 (39). – с. 48-51.

126. Амирханов К.Ж. Технология получения многокомпонентных белковых комплексов / К.Ж. Амирханов // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2009. – № 1 (51). – с. 59-61.

127. Долінський А.А. Використання механізмів і методів ДІВЕ для керування кінетикою перебігу нанорівневих процесів / А.А. Долінський, А.О. Авраменко, Г.К. Іваницький // *Вісник НАН України*. – 2013. – № 8. – с. 47-57. – ISSN 0372-6436.

128. Исследование возможности применения разрядно-импульсного метода в технологиях очистки промышленных стоков обогатительного производства / [В.В. Коростовенко, М.В. Ворошилова, А.Г. Степанов и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 4. – с. 39-43.

129. Карташов Л.П. Исследование тепломассообменных процессов в жидких биологических средах при импульсной гидродинамической переработке / Л.П. Карташов, А.В. Колпаков // *Труды 14-й Международной*



научно-технической конференции “Научно-технический прогресс в животноводстве – инновационные технологии и модернизация в отрасли”. – М.: ГНУ ВНИИМЖ, 2011. – Т. 22, Ч. 2. – 2011. – с. 105-115.

130. Homogenization of tissues via picosecond-infrared laser (PIRL) ablation: Giving a closer view on the in-vivo composition of protein species as compared to mechanical homogenization / [M. Kwiatkowski, M. Wurlitzer, A. Krutilin et al.] // *Journal of Proteomics*. – 2016. – Vol. 134. – pp. 193-202.

131. Шершенков Б.С. Ультразвуковая подготовка как инструмент для повышения производственных показателей восстановленного обезжиренного молока / Б.С. Шершенков, Е.П. Сучкова, Н.Г. Лаптева // *Вестник Новгородского государственного университета*. – 2015. – № 86, Ч. 1. – с. 37-40.

132. Praxis der industriellen Durchflussmessung / [F. Frenzel, H. Grothey, C. Habersetzer et al.]. – [4. Auflage]. – Göttingen: ABB Automation Products GmbH, 2005. – 251 s.

133. Моргунова А.В. Теоретические и практические аспекты создания инновационных способов получения белково-жировых эмульсий / А.В. Моргунова, Л.А. Борисенко // II Международная конференция “Инновационные разработки молодых ученых – развитию агропромышленного комплекса”, (Ставрополь, 20-21 сентября 2013 г.): сборник научных трудов ГНУ СНИИЖК. – Т. 3. – Вып. 6. – Ставрополь: Бюро новостей, 2013. – с. 193-195.

134. Нагорний О.Ю. Вплив ультразвукової модифікації на реологічні характеристики розчинів полісахаридів в технології капсульованої продукції / О.Ю. Нагорний, О.П. Неклеса, Є.П. Пивоваров // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2013. – № 5/10 (65). – с. 26-29.

135. Effects of high pressure homogenization on the physicochemical properties of corn starch [Электронный ресурс] / [M. Majzoobi, M. Shahbazi, A. Farahnaky et al.] // *Inside Food Symposium, 9-12 April 2013, Leuven, Belgium*. – Leuven, 2013. – 4 p. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.insidefood.eu/INSIDEFOOD\\_WEB/UK/WORD/proceedings/103P.pdf](http://www.insidefood.eu/INSIDEFOOD_WEB/UK/WORD/proceedings/103P.pdf).

136. Xu J. Effects of solvent treatment and high-pressure homogenization process on dispersion properties of palygorskite / J. Xu, W. Wang, A. Wang // Powder Technology. – 2013. – No. 235. – pp. 652-660.

137. Effects of pressure homogenization on particle size and the functional properties of citrus juices / E. Betoret, N. Betoret, J.V. Carbonell, P. Fito // Journal of Food Engineering. – 2009. – No. 92. – pp. 18-23.

138. Спиридонов Е.К. Экспериментальные исследования рабочего процесса кавитационного смесителя / Е.К. Спиридонов, А.А. Пантюхин // Вестник ЮУрГУ. – 2007. – № 25. – с. 89-97. – (Серия “Машиностроение”). – Вып. 10.

139. Хафизов И.Ф. Разработка модели прямоочного смесителя для двухфазных систем [Электронный ресурс] / И.Ф. Хафизов, Н.А. Абдуллин, И.А. Мухин // Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело”. – 2012. – № 6. – с. 425-434. – Режим доступа до ресурсу: [http://ogbus.ru/authors/KhafizovIF/KhafizovIF\\_2.pdf](http://ogbus.ru/authors/KhafizovIF/KhafizovIF_2.pdf).

140. Анісімов В.В. Гідродинамічні кавітатори для інтенсифікації процесів гомогенізації в рідинних середовищах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 “Процеси та обладнання хімічної технології” / В.В. Анісімов. – Дніпропетровськ, 2014. – 20 с.

141. Пат. 58980 Україна, МПК В01F 5/00. Кавітаційний змішувач / О.А. Литвиненко, О.І. Некоз, А.О. Чагайда; заявник і патентовласник Національний університет харчових технологій. – № 2002129607; заявл. 02.12.2002; опубл. 15.08.2003, Бюл. № 18. – 3 с.

142. Пат. 400960 США, МПК А23L 3/015. Method and device for sterilization and homogenization of liquid products: Henny Penny Corporation, Eaton (US) / Burkett, Douglas A., Shirali, Manouchehr; assignee Henny Penny Corporation, Eaton (US). – № 20150237909; заявл. 24.04.2014; опубл. 27.08.2015.

143. Пат. 7086777 США, МПК ЕР1359997А2. Device for creating hydrodynamic cavitation in fluids: Five Star Technologies Inc., US / Kozyuk O.V.;

assignee Five Star Technologies Inc., US. – № 2001043372; заявл. 20.11.2000; опубл. 08.08.2006.

144. Кавитационные технологии при диспергировании и гомогенизации / П.Г. Думитраш, М.К. Болога, Т.В. Кучук, Т.Д. Шемякова // Электронная обработка материалов. – 2009. – № 4. – с. 102-107.

145. Применение кавитационных технологий для приготовления высокодисперсной суспензии бентонита / П.Г. Думитраш, М.К. Болога, И.С. Панашеску, Т.Д. Шемякова // Виноградарство і виноробство: міжвідомчий тематичний науковий збірник. – Одеса: ННЦ “ІВіВ ім. В.Є. Таїрова, 2013. – Вип. 50. – с. 64-68.

146. Кравченко О.В. Новые гидрокавитационные технологии в процессах эффективного получения и использования углеводородсодержащих энергоносителей / О.В. Кравченко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2007. – № 2. – с. 171-178.

147. Кожевников Ю.А. Разработка и исследование установки приготовления композитного котельного биотоплива из отходов животноводческих ферм и нефтехозяйств: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 05.20.01 “Технологии и средства механизации сельского хозяйства” / Ю.А. Кожевников. – М., 2014. – 188 с.

148. Такаева М.А. Методы активирования углеводородного сырья воздействием ультразвука [Электронный ресурс] / М.А. Такаева, Н.А. Пивоварова // VI Международная научно-практическая конференция “Технические науки – от теории к практике”: Материалы VI Международной научно-практической конференции “Технические науки – от теории к практике”, (Новосибирск, 16 января 2012 г.). – Новосибирск, 2012. – 6 с. – Режим доступа до ресурсу: <http://cyberleninka.ru/article/n/metody-aktivirovaniya-uglevodorodnogo-syrya-vozdeystviem-ultrazvuka>.

149. Ефективність виробництва біодизельного палива з використанням ультразвуку / [О.Є. Колосов, Г.Л. Рябцев, Д.Е. Сідоров та ін.] // Вісник НТУУ

“КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2010. – № 2 (6). – с. 71-75.

150. Савіцький Д.П. Фізико-хімічні аспекти отримання паливних дисперсних систем на основі природного вугілля та рідких органічних відходів / Д.П. Савіцький, А.С. Макаров, Д.Ю. Садовський // Вісник НАН України. – 2015. – № 3. – с. 61-72. – ISSN 0372-6436.

151. Круть О.А. Водовугільне паливо: стан проблеми і перспективи використання / О.А. Круть, В.С. Білецький // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – с. 58-65. – ISSN 0372-6436.

152. Прикладные аспекты технологии приготовления и сжигания водоугольного топлива / Л.И. Мальцев, И.В. Кравченко, А.И. Кравченко, В.Е. Самборский // Сборник научных статей “Современная наука”. – 2011. – № 1 (6). – с. 25-30.

153. Баранова М.П. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий: монография / М.П. Баранова, В.А. Кулагин. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 160 с. – ISBN 978-5-7638-2116-1.

154. Кулагин В.А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации: дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук: спец. 01.04.14 “Теплофизика и теоретическая теплотехника”, 01.02.05 “Механика жидкости, газа и плазмы” / В.А. Кулагин. – Красноярск, 2004. – 378 с.

155. Овчинников Ю.В. Искусственное композиционное жидкое топливо и его приготовление / Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко // Энергетика Татарстана. – 2008. – № 4. – с. 11-15.

156. Мороз Н.А. Гидродинамическая кавитация воды и ее использование в абсорбционных технологиях очистки промышленных газов / Н.А. Мороз // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – № 6. – с. 105-107.

157. Gogate P.R. Cavitation: a technology on the horizon / P.R. Gogate, R.K. Tayal, A.B. Pandit // *Current Science*. – 2006. – Vol. 91, No. 1. – pp. 35-46.

158. De la Cruz J.L.R. Un experimento de enseñanza e investigación sobre el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas / J.L.R. de la Cruz, G.R. Chavarría, S.H. Zapata // *Lat. Am. J. Phys. Educ.* – 2010. – Vol. 4, Suppl. 1. – pp. 915-924.

159. Barth T. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Kavitation in Kreiselpumpen sowie deren numerische Simulation: Diplomarbeit-Nr.: 44/04 / T. Barth. – Leipzig, 2004. – 120 s.

160. Шевчук Л.І. Очищення води від органічних та біологічних забруднень в умовах кавітації: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.17.21 “Технологія водоочищення” / Л.І. Шевчук. – К., 2015. – 40 с.

161. Предзимірска Л.М. Кавітаційне очищення природних і стічних вод від органічних та біологічних забруднень: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.01 “Екологічна безпека” // Л.М. Предзимірска. – Львів, 2015. – 200 с.

162. Мних Р.В. Кавітаційна активація малорозчинних неорганічних реагентів у технологіях очищення стічних вод (на прикладі кальцію гідроксиду): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.21 “Технологія водоочищення” // Р.В. Мних. – К., 2014. – 20 с.

163. Воронкін О.С. Фізико-хімічні перетворення при енергетичних взаємодіях із водою в перспективних технологіях її очищення та знезаражування / О.С. Воронкін, О.Д. Єгізарян // *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. – 2008. – Вип. 5 (52), Ч. 1. – с. 27-31.

164. Попова Н.В. Изучение влияния ультразвукового воздействия на показатели качества воды / Н.В. Попова, С.А. Фатеева // *Вестник ЮУрГУ*. – 2014. – Т. 2, № 1. – с. 30-33. – (Серия “Пищевые и биотехнологии”).

165. Знак З.О. Інтенсифікація очищення стоків ВАТ “Карпатнафтохім” розчинами натрію гіпохлориту в кавітаційних полях / З.О. Знак, Н.М. Гнатишин

// Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2013. – № 761. – с. 12-16.

166. Banduch I. Die Wirkung von Ultraschall auf die mikrobiologische Diversität und Abbauleistung eines biologischen Reaktors zur Abwasserreinigung: genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieurin / I. Banduch. – Hamburg, 2011. – 136 s.

167. Benito Y. Tratamiento de efluentes industriales mediante cavitación hidrodinámica / Y. Benito, S. Arrojo // Tecnologia del agua. – 2006. – Nú. 279. – pp. 38-41.

168. Schüler R. Umweltschonende und kosteneffiziente Wasserentkeimung durch kontrollierte hydrodynamische Kavitation: Kavitationskeimer. Förderbereich 1: Umwelt- und gesundheitsfreundliche Verfahren und Produkte: Abschlussbericht, 15.10.2006 – 14.04.2008 [Електронний ресурс] / R. Schüler, Moarefi. – München: Crenano GmbH, 2008. – 18 s. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.dbu.de/ab/DBU-Abschluss-bericht-AZ-24003.pdf>.

169. Прохасько Л.С. Использование гидродинамической кавитации в пищевой промышленности / Л.С. Прохасько, Д.А. Ярмаркин // Международное научное издание “Сборник научных трудов SWorld”. – 2014. – Т. 7, № 3. – с. 27-31.

170. Цыганова Т.Б. Специализированная водоподготовка в повышении качества хлебобулочных изделий [Електронний ресурс] / Т.Б. Цыганова, О.А. Гакова // Электронное научное издание “Технологии XXI века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности”. – 2013. – № 7. – 11 с. – ISSN 2219-6005. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.mgutm.ru/jurnal/tehnologii\\_21veka/eni7\\_chat1/section2/15.pdf](http://www.mgutm.ru/jurnal/tehnologii_21veka/eni7_chat1/section2/15.pdf).

171. Потороко И.Ю. Системный подход в технологии водоподготовки для пищевых производств / И.Ю. Потороко, Р.И. Фаткуллин, Л.А. Цирульниченко // Вестник ЮУрГУ. – 2013. – Т. 7, № 3. – с. 153-158. – (Серия “Экономика и менеджмент”).

172. Campo Vera Y. Efecto de la termosonicación sobre las propiedades fisicoquímicas del hongo comestible (*Pleurotus ostreatus*) fresco empacado al vacío / Y. Campo Vera, V.M. Gélvez O. // *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*. – 2011. – Vol. 9 (2). – pp. 55-63.

173. Застосування ефектів гідродинамічної і пароконденсаційної кавітації у цукровій промисловості / [О.С. Марценюк, П.М. Немирович, М.М. Жеплінська та ін.] // *Харчова промисловість*. – 2012. – Вип. 12. – с. 28-34.

174. Аналіз сучасних способів підвищення якості вапняного молока у цукровому виробництві / [В.П. Василів, А.М. Матіящук, Д.В. Михайлюк та ін.] // *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. – 2012. – Вип. 170 (1). – с. 118-127. – (Серія “Техніка та енергетика АПК”).

175. Курносов Н.Е. Экспериментальные исследования гидродинамической кавитационной очистки поверхностей деталей от масляных загрязнений / Н.Е. Курносов, К.В. Лебединский // *Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки*. – 2012. – № 2. – с. 117-125.

176. Баранов М.И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности / М.И. Баранов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 1. – с. 42-54.

177. Ершов М.А. Снижение вязкости нефти методом гидродинамической кавитации: автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.17.08 „Процессы и аппараты химических технологий“ / М.А. Ершов. – М., 2011. – 16 с.

178. Повышение эффективности ультразвуковых технологических аппаратов для кавитационной обработки жидких сред высокой вязкости: отчет по НИР [Электронный ресурс] // ООО „Центр ультразвуковых технологий“. – Бийск: ООО „Центр ультразвуковых технологий“, 2008. – 59 с. – Режим доступа: [http://u-sonic.ru/downloads/issled/ultrasonic\\_treatment\\_of\\_high\\_viscosity\\_liquids.pdf](http://u-sonic.ru/downloads/issled/ultrasonic_treatment_of_high_viscosity_liquids.pdf).

179. Ангеловский А.А. Определение гидродинамических параметров устройства для импульсного рыхления угольных пластов / А.А. Ангеловский // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 98. – с. 114-119.

180. Лин Э.Э. О кластерном механизме синтеза алмаза в экстремальных условиях кавитации / Э.Э. Лин // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37, Вып. 13. – с. 9-13.

181. Стеблева О.В. Способ получения наночастиц углеродной фазы в процессе ультразвуковой кавитации / О.В. Стеблева, А.Л. Верещагин, Г.В. Леонов // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1-2. – с. 38-40.

182. Hydrodynamic cavitation – assisted synthesis of nanocalcite [Электронный ресурс] / [Sh.H. Sonawane, S.P. Gumfekar, K.H. Kate et al.] // International Journal of Chemical Engineering. – 2010. – 8 p. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.hindawi.com/journals/ijce/2010/242963/ref/>.

183. Стебелева О.П. Кавитационный синтез наноструктурированного углеродного материала: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.06 „Порошковая металлургия и композиционные материалы“ / О.П. Стебелева. – Красноярск, 2011. – 20 с.

184. Формирование структуры и свойств бетонов, модифицированных дисперсными добавками / [А.А. Лушникова, М.А. Соковикова, И.А. Пудов и др.] // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – Вып. 12, № 16. – с. 30-33. – (Серия “Строительство и архитектура”).

185. Вітенько Т.М. Ресурсозберігаючі аспекти застосування кавітаційних пристроїв у технологічних процесах / Т.М. Вітенько, О.М. Гащин // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 7. – с. 74-78.

186. Кузьминых К.Г. Влияние параметров ультразвуковой обработки на процесс измельчения галургического хлорида калия / К.Г. Кузьминых, В.З. Пойлов, О.К. Косвинцев // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 2. – с. 132-136.



187. Крайнов Ю.Е. Кавитационная деструкция биомассы / Ю.Е. Крайнов, М.С. Вандышева // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 4. – с. 102-108.

188. Nickel K. Was können wir von der Schlammdeintegration mit Ultraschall erwarten / K. Nickel // Ultraschall in der Umwelttechnik III: Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. – Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2005. – s. 123-138.

189. Neis U. Schlammbehandlung mit Ultraschall: Ein aktuelles Leistungsbild [Электронный ресурс] / U. Neis, K. Nickel // ATV-DVWK-Klärschlammstage, Würzburg-Hennef, 2001. – 12 s. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ultrawaves.de/unternehmen/downloads/schlammbehandlung-mit-ultraschall>.

190. Klingspor G. Mit Ultraschalltechnik zur effizienten Kläranlage / G. Klingspor, K. Nickel, U. Neis // WWT. – 2013. – № 10. – s. 26-29.

191. Анісімов В.В. Сучасні уявлення про кавітацію як явище та інтенсифікуючий фактор в хімічній технології / В.В. Анісімов, П.П. Єрмаков // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – № 4. – с. 178-183.

192. Иваницкий Г.К. Численное моделирование поведения пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации / Г.К. Иваницкий // Сборник научных статей “Современная наука”. – 2011. – № 2 (7). – с. 52-58.

193. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія / Т.М. Вітенько. – Тернопіль: видавництво ТДТУ ім. Івана Пулюя, 2009. – 224 с.

194. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция / М.А. Маргулис. – М.: Химия, 1986. – 288 с.

195. Федоткин И.М. Теоретические основы производства дополнительной вращательной и тепловой энергии в энергогенераторе И.М. Федоткина / И.М. Федоткин // Вісник Національного технічного університету України “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2009. – № 2 (4). – с. 71-75.

196. Федоткін І.М. Механізм виникнення надлишкової енергії при кавітації / І.М. Федоткін, О.М. Тимонін, А.В. Копиленко // Харчова промисловість. – 2012. – № 12. – с. 146-151.

197. Федоткин И.М. О возможностях получения избыточной энергии при кавитации / И.М. Федоткин // Вісник Національного технічного університету України “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2009. – № 1 (3). – с. 3-11.

198. Федоткин И.М. Энергетическая, питательная и экологическая концепции / И.М. Федоткин // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 10 (92). – с. 49-61.

199. Нефедов Ю.И. Кавитационный гидроударный генератор тепла / Ю.И. Нефедов, В.А. Стороженко, С.С. Брагин // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 04 (98). – с. 33-39.

200. Нефедов Ю.И. Кавитационный энергосберегающий теплогенератор-гидротаран / Ю.И. Нефедов, В.А. Стороженко, С.С. Брагин // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 5 (87). – с. 9-14.

201. Геллер С.В. Перспективы использования кавитационно-вихревых аппаратов в энергетике и теплоснабжении / С.В. Геллер // Теплоэнергетика. – 2007. – № 2 (14). – с. 19-23.

202. Геллер С.В. Перспективы использования аппаратов БРАВО в теплоснабжении / С.В. Геллер // Теплоэнергетика. – 2007. – № 5 (17). – с. 28-33.

203. Геллер С.В. Гидродинамические источники тепла [Электронный ресурс] / С.В. Геллер, И.В. Мочалин, О.П. Богун // Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело”. – 2006. – № 1. – 14 с. – Режим доступа до ресурсу: [http://ogbus.ru/authors/Geller/Geller\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Geller/Geller_1.pdf).

204. Оболенский Н.В. Вихревой (гидродинамический) источник теплоты / Н.В. Оболенский, Ю.Е. Крайнов, С.Б. Красиков // Вестник НГИЭИ. – 2011. – Т. 2, № 5 (6). – с. 99-108.

205. Оболенский Н.В. Результаты испытаний гидродинамического деструктора / Н.В. Оболенский, Ю.Е. Крайнов // Науковий вісник ТДАТУ. – 2012. – Вип. 2, Т. 4. – с. 59-64.

206. Некоз О.І. Використання кавітації для генерування теплоти / О.І. Некоз, О.А. Литвиненко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 2 (54). – с. 102-104.

207. Скосарь В.Ю. Возможные механизмы энерговыделения в кавитационных устройствах / В.Ю. Скосарь // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 7 (114). – с. 27-33. – ISSN 1727-7337.

208. Абдалиев У.К. Термодинамические основы получения тепла с использованием водо-пузырьковой смеси на основе гидродинамической кавитации / У.К. Абдалиев, Ы. Ташполотов, А.Ы. Ысламидинов // Новости науки Казахстана. – 2014. – № 2 (120). – с. 171-180.

209. Тарнопольский А.В. Повышение эффективности технологических процессов машиностроительных производств и теплотехнического оборудования при использовании вихревых гидравлических теплогенераторов / А.В. Тарнопольский, С.Н. Курносков // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – с. 150-156.

210. Кузьменко А.Г. Исследование центробежных насосов как нагревателей воды. Сообщение 1. Обзор и постановка задачи / А.Г. Кузьменко, С.В. Милягинский // Проблемы трибології. – 2010. – № 2. – с. 94-97.

211. Пат. 2382955 Российская Федерация, МПК F24J 3/00. Способ тепловыделения в жидкости и устройство для его осуществления / С.А. Новиков, А.В. Кузнецов, А.А. Алешин. – № 2008146491; заявл. 26.11.2008; опубл. 27.02.2010.

212. Дудышев В.Д. Методы преобразования энергии электрогидравлического удара и кавитации жидкости в тепло и иные виды энергии / В.Д. Дудышев // Новая Энергетика. – 2005. – № 1 (20). – с. 4-18.

213. Тарасенко Т.В. Дослідження кавітаційних явищ у дросельних пристроях / Т.В. Тарасенко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2013. – № 1 (39). – с. 38-46.

214. Анісімов В.В. Кавітаційна технологія синтезу метилових ефірів жирних кислот з жирів рослинного походження / В.В. Анісімов, В.О. Головенко, П.П. Єрмаков // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – № 6. – с. 125-127.

215. Денисюк Е.А. Оптимизация энергоемкости при регенерации отработанного рассола / Е.А. Денисюк, И.А. Носова // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 12 (19). – с. 47-53.

216. Гришко І.А. Ультразвукові кавітатори високої інтенсивності для обробки рідких середовищ: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.02 “Машинознавство” // І.А. Гришко. – К., 2013. – 23 с.

217. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М.А. Промтов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14, № 4. – с. 861-869. – ISSN 0136-5835.

218. Исследование рабочей зоны высокоамплитудного кавитационного ультразвукового привода / А.Ф. Луговской, А.В. Мовчанюк, В.П. Фесич, И.С. Гришко // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 2 (49), Ч. 2. – с. 81-84.

219. Федоткин И.М. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – К.: Вища школа, 1984. – 68 с.

220. Луговський О.Ф. Ультразвукові кавітаційні апарати для реалізації екологічно безпечної технології вилучення пектину з вторинної рослинної сировини / О.Ф. Луговський, І.М. Берник // Вісник Національного технічного університету. – 2010. – № 58. – с. 82-86. – (Серія “Машинобудування”).

221. Жулай Ю.А. Исследование возможности применения кавитационного гидродинамического вибратора в технологии расширения диаметра обсадных

труб / Ю.А. Жулай, Н.А. Дзоз // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 3. – с. 271-278.

222. Громаковский Д.Г. Разработка низкочастотных кавитационных устройств для мойки поверхностей деталей машин и приборов / Д.Г. Громаковский, А.П. Бураков, Н.А. Карева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1 (3). – с. 562-565.

223. Александров В.А. Гидродинамическая кавитация при распылении жидкости вибрирующим стержнем / В.А. Александров, Г.М. Михеев // Химическая физика и мезоскопия. – 2011. – Т. 13, № 1. – с. 111-116.

224. Назаренко О.А. Гідродинамічні випромінюючі системи з вісесиметричною локалізованою областю кавітаційної природи: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук: спец. 01.04.01 “Фізика приладів, елементів та систем” // О.А. Назаренко. – Одеса, 2006. – 20 с.

225. Шевчук Л.І. Обладнання для активації води пневмо-магнітною кавітаційною обробкою / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2011. – № 43. – с. 12-19.

226. Шевчук Л.І. Вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2011. – Вип. 45. – с. 374-379.

227. Шевчук Л.І. Застосування вібрацій для технологічних процесів водоочищення [Електронний ресурс] / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган // Збірник наукових статей “III-го Всеукраїнського з’їзду екологів з міжнародною участю”. – Вінниця, 2011. – Т. 1. – с. 34-36. – Режим доступу до ресурсу: <http://eco.com.ua/>.

228. Інноваційні технології водопідготовки для інтенсифікації росту сільськогосподарських культур / [Л.І. Шевчук, В.Л. Старчевський, І.С.

Афтаназів та ін.] // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – № 1/2 (9). – с. 3-8. – ISSN 2226-3780.

229. Сілін Р.І. Науково-технічні основи розроблення вібромашин для впливу на властивості води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 4 (56). – с. 141-148.

230. Импульсный барьерный разряд как метод обработки воды: активные частицы-окислители в водо-воздушном потоке / [Н.А. Яворовский, Я.И. Корнев, С.В. Прейс и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 2. – с. 108-113.

231. Тарасенко Т.В. Очищення елементів гідроапаратури за допомогою кавітаційних технологій / Т.В. Тарасенко, Г.Й. Зайончковський // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – № 2/2 (10). – с. 7-11. – ISSN 2226-3780.

232. Колесников В.В. Экспериментальные исследования характеристик насадок / В.В. Колесников, А.В. Лежебоков, А.Е. Пушкарев // Известия ТулГУ. – 2013. – Вып. 4. – с. 211-215. – (Серия “Технические науки”).

233. Высокоскоростная визуализация кавитационных каверн на различных режимах обтекания двумерных гидропрофилей / А.Ю. Кравцова, Д.М. Маркович, К.С. Первунин, М.В. Тимошевский // Сборник научных статей “Современная наука”. – 2012. – № 2 (10). – с. 283-289.

234. Пат. 99234 Україна, МПК В01F 5/00. Гідродинамічний кавітаційний реактор / О.А. Литвиненко, О.І. Некоз, О.Г. Дзюб, О.В. Матяш; заявник і патентовласник Національний університет харчових технологій. – № 2014 13277; заявл. 11.12.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10. – 3 с.

235. Тарасенко Т.В. Возникновение кавитации в объемном насосе / Т.В. Тарасенко, В.Г. Романенко, В.Н. Бадах // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2015. – № 3 (1112). – с. 112-120.

236. Пат. 97718 Україна, МПК F24J 3/00. Пристрій для нагрівання рідини / В.П. Прокоф'єв. – № 2014 13507; заявл. 15.12.2014; опубл. 25.03.2015, Бюл. № 6. – 3 с.

237. Журавлев В. Высокоэффективные машины роторного типа с развитой кавитацией / В. Журавлев, Н. Воронцов, В. Блиничев // *Czasopismo Techniczne*. – 2008. – № 2. – с. 421-427. – ISSN 0011-4561.

238. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение, 2001. – 260 с.

239. Червяков В.М. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах: монография / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев. – М.: “Издательство Машиностроение-1”, 2007. – 128 с. – ISBN 978-5-94275-340-5.

240. Шастун В.Н. Енергозберігаюча технологія теплозабезпечення з використанням гідродинамічних теплогенераторів / В.Н. Шастун, В.В. Коваленко, О.О. Ільченко // *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. – 2010. – № 1. – с. 88-91.

241. Посвятенко Н.И. Физико-химические методы очистки сточных вод от нефтепродуктов / Н.И. Посвятенко, Ю.Е. Демидова, Т.В. Мельник // *Вісник Національного транспортного університету*. – 2014. – № 29 (1). – с. 250-258.

242. Combined magnetic field and electrocoagulation process for suspended solid removal from wastewater [Електронний ресурс] / M.F. Ni'am, F. Othman, J. Sohaili, Z. Fauzia // *Proc. of the 1<sup>st</sup> International Conference on Natural Resources Engineering & Technology (INRET), July 24-25, Putrajaya, Malaysia*. – pp. 384-393. – Режим доступу до ресурсу: <https://core.ac.uk/download/files/392/11777165.pdf>.

243. Krzemińska D. Advanced oxidation processes for food industrial wastewater decontamination / D. Krzemińska, E. Neczaj, G. Borowski // *Journal of Ecological Engineering*. – 2015. – Vol. 16, Iss. 2. – pp. 61-71.

244. Sanz J. Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: nuevos desarrollos y futuras tendencias / J. Sanz, J.I. Lombraña, A. de Luis // *AFINIDAD*. – 2013. – Nú. LXX (561). – pp. 25-33.

245. Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing / A.G. Chakinala, P.R. Gogate, A.E. Burgess, D.H. Bremner // *Chemical Engineering Journal*. – 2009. – Vol. 152, Issues 2-3. – pp. 498-502.

246. Потороко И.Ю. Перспективы использования ультразвукового воздействия в технологии экстракционных процессов / И.Ю. Потороко, И.В. Калинина // *Вестник ЮУрГУ*. – 2014. – Т. 2, № 1. – с. 42-47. – (Серия “Пищевые и биотехнологии”).

247. Blume T. Kombinierte Methoden mit Ultraschall zur Desinfektion von Abwasser / T. Blume // *Ultraschall in der Umwelttechnik III: Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*. – Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2005. – s. 79-90.

248. Демідова Ю.Є. Теоретичні й експериментальні дослідження процесів електрокоагуляції та кавітації при переробці вуглеводневмісних стоків: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 “Процеси та обладнання хімічної технології” // Ю.Є. Демідова. – Харків, 2013. – 20 с.

249. Новая технология очистки нефтесодержащих сточных вод машиностроительного производства / [Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, М.Х. Бикунова и др.] // *Труды Международного симпозиума “Надежность и качество”*. – 2010. – Т. 2. – с. 167-170. – ISSN 22206418.

250. Тарасенков Н.В. Глубокая очистка сточных вод от органических загрязнителей флотационно-кавитационным методом: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. хим. наук: спец. 03.00.16 “Экология (Химические науки)” / Н.В. Тарасенков. – СПб., 2006. – 16 с.

251. Болонов Н.И. Установка для очистки сточных вод мясокомбинатов / Н.И. Болонов, А.И. Барыбин // *Вісник Донецького національного університету*. – 2009. – Вип. 2. – с. 400-401. – (Серія А: Природничі науки).



252. Клеттер В.Ю. Математическое моделирование буровых растворов [Электронный ресурс] / В.Ю. Клеттер, Ю.Б. Линд // VIII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям: материалы VIII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, 27-29 ноября 2007 г. Новосибирск. – Новосибирск, 2007. – Режим доступа до ресурсу: URL: <http://www.ict.nsc.ru/ws/YM2007/12715/kettler.htm>.

253. Мисак В.Ф. Методи ідентифікації статичних характеристик об'єктів керування / В.Ф. Мисак. – К.: НТУ КПІ, 2009. – 62 с.

254. Клименко В.В. Застосування методу Брандона для отримання емпіричного рівняння кінетики процесу гідратоутворення / В.В. Клименко, М.В. Личук, М.В. Босий // Холодильна техніка та технологія. – 2013. – № 5. – с. 59-63.

255. Гетьман Г.К. Аналіз аналітичних функцій для апроксимації універсальної магнітної характеристики тягових двигунів постійного та пульсуючого струму / Г.К. Гетьман, С.Л. Марікуца // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 37. – с. 63-71.

256. Гидрофоны. Модели 8101, 8103, 8104, 8105 [Электронный ресурс]. – 8 с. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.pribor.ru/add/hydrophones.pdf>.

257. Использование методов напорной и безнапорной флотации при очистке сточных вод от нефтепродуктов / [С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, А.С. Нестеров и др.] // Труды Международного симпозиума “Надежность и качество”. – 2011. – Т. 1. – с. 350-353.

258. Мониторинг экологического состояния акваторий с применением акустического зондирования / В.А. Акуличев, В.А. Буланов, И.В. Корсков, А.В. Стороженко // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 2 (14). – с. 42-54.

259. Инженерный справочник. Таблицы TehTab.ru. Децибел, как единица измерения звукового давления. Абсолютная величина [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: URL: <http://tehtab.ru/guide/guideunitsalphabets/guideunitsalphabets/decibel/decibelsoundpressurelevelunits/>.

260. Аналитическая химия. Химические методы анализа / [Е.Г. Власова, А.Ф. Жуков, И.Ф. Колосова и др.]; под ред. О.М. Петрухина. – М.: Химия, 1992. – 400 с. – ISBN 5-7245-0640-8.

261. Jablonska Ja. Multiphase flow and cavitation – comparison of flow in rectangular and circular nozzle [Электронный ресурс] / Ja. Jablonska, M. Wojko // EPJ Web of Conferences. – 2015. – Vol. 92. – 8 p. – Режим доступа: URL: [http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2015/11/epjconf\\_efm2014](http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2015/11/epjconf_efm2014).

262. Structure optimization and numerical simulation of nozzle for high pressure water jetting [Электронный ресурс] / [Sh. Zhang, X. Tao, J. Lu et al.] // Advances in Materials Science and Engineering. – 2015. – 8 p. – Режим доступа: URL: <http://www.hindawi.com/journals/amse/2015/732054/>.

263. Gulyi A. Pumping equipment effectiveness increase by means of ejector application as preliminary stage for high-speed pump units / A. Gulyi, A. Kobyzska // MOTROL. – 2012. – Vol. 14, No. 1. – p. 158-163.

264. New potential of high-speed water jet technology for renovating concrete structures / L. Bodnarova, L. Sitek, R. Hela, J. Foldyna // Slovak Journal of Civil Engineering. – 2011. – Vol. XIX, No. 2. – p. 1-7.

265. Sou A. Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization / A. Sou, S. Hosokawa, A. Tomiyama // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50, Iss. 17-18. – p. 3575-3582.

266. Малафаєв М.Т. Кластери у воді / М.Т. Малафаєв, Ж.В. Воронцова // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2011. – № 43. – с. 3-7.

267. Меттер И. Физическая природа кавитации и механизм кавитационных повреждений / И. Меттер // Успехи физических наук. – 1948. – Т. XXXV, Вып. 1. – с. 52-79.

268. Бобицький Я. Порівняльний аналіз оптичних методів вимірювання розмірів мікрочастинок / Я. Бобицький, Р. Клімкевич // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2007. – № 67. – с. 48-55.

269. Кумченко Я.А. Сила Бьеркнеса-Умова-Лебедева (БУЛ) в резонаторно-резонансном механизме очистки углеводородных и биотоплив от вредных примесей / Я.А. Кумченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 8 (55). – с. 33-35.

270. Adobe Audition 1.5: офиц. учеб. курс / ред. Т. Грищук; пер. с англ. Т. Грищук, А. Климович. – М.: Изд-во ТРИУМФ, 2005. – 272 с.: ил. + [1] CD-ROM. – (Серия “Официальный учебный курс”). – ISBN 5-89392-106-2.

271. Голых Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой: дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 “Процессы и аппараты химических технологий” / Р.Н. Голых. – Бийск, 2014. – 188 с.

272. Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (Теоретические основы производства избыточной энергии, расчет и конструирование кавитационных теплогенераторов) / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – К.: АО “ГЛАЗ”, 2000. – Ч. II. – 898 с.

273. Маргулис М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях) / М.А. Маргулис. – М.: Высшая школа, 1984. – 272 с.

274. Філіпенко Т.А. Антирадикальна активність фітофенолів, отриманих дією ультразвуку на листя мучниці / Т.А. Філіпенко, Н.Ю. Грибова // Лікарське рослинництво: від досвіду минулого до новітніх технологій (Полтава, 2012 р.):

Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. – Полтава: ПГАА, 2012. – с. 100-103.

275. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод / Ю.Ю. Лурье. – М.: Химия, 1984. – 448 с.

276. Зарецька Т.В. Експериментальне обґрунтування параметрів активації екстрагентів методом кавітації / Т.В. Зарецька, Т.М. Вітенько // XVIII наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: Збірник матеріалів XVIII наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 29-30 жовтня 2014 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2014. – с. 180.

277. Чернюшок О.А. Удосконалення технології напоїв із сироватки молочної, обробленої електроіскровими розрядами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.18.04 “Технологія м’ясних, молочних продуктів і продуктів з гідробіонтів” / О.А. Чернюшок. – К., 2015. – 23 с.

278. Борук С.Д. Вплив умов проведення помелу на фізико-хімічні властивості суспензійного вугільного палива / С.Д. Борук, О.І. Егурнов // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: укр. міжвідом. наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 45. – с. 270-274.

279. Менковский М.А. Технология серы / М.А. Менковский, В.Т. Яворский. – М.: Химия, 1985. – 328 с.

280. Олійник Т.А. Розробка комплексної технології збагачення каолінової сировини в Україні / Т.А. Олійник, О.В. Красуля // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 31. – с. 3-5. – (Серія “Технічні науки”).

281. Смирнов В.О. Флотаційні методи збагачення корисних копалин / В.О. Смирнов, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – 492 с. – ISBN 978-966-317-054-1.

282. Бабошко А.Ю. Физико-химические факторы формирования отходов флотации сильвинита / А.Ю. Бабошко, Б.А. Бачурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 6. – с. 120-125.

283. Лунькова Ю.Н. Производство концентрированных калийных удобрений из полиминеральных руд / Ю.Н. Лунькова, Н.В. Хабер. – К.: Техніка, 1980. – 158 с.

284. Вітенько Т.М. Активація води в кавітаційному пристрої. Дослідження впливу на інтенсивність розчинення лангбейніту / Т.М. Вітенько // Хімічна промисловість України: науково-виробничий журнал. – 2005. – № 3. – с. 18-21.

285. Разработка технологии флотационной доводки некондиционных гематитовых концентратов [Электронный ресурс] / [Т.А. Олейник, Л.В. Скляр, Н.В. Кушнирук и др.] // Збагачення корисних копалин: Збірник науково-технічних статей НГУ. – 2014. – Вип. 56 (97). – 10 с. – Режим доступу до ресурсу: <http://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2014-56-97/20.pdf>.

286. Бутенко О. Визначення неіоногенних поверхнево-активних речовин у пральних порошках / О. Бутенко, Є. Костенко // Актуальні проблеми хімії та хімічної технології: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, (Київ, 20-21 листопада 2014 р.). – К.: НУХТ, 2014. – с. 127-128.

287. Матниязова Г.К. Интенсификация процесса очистки мутных вод от взвешенных частиц: дисс. на соискание уч. степени доктора философии (PhD): спец. 6D091100 “Геоэкология и управление природопользованием” / Г.К. Матниязова. – Тараз, 2012. – 151 с.

288. Саблій Л.А. Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод: монографія / Л.А. Саблій. – Рівне: НУВГП, 2013. – 291 с. – ISBN 978-966-327-242-9.

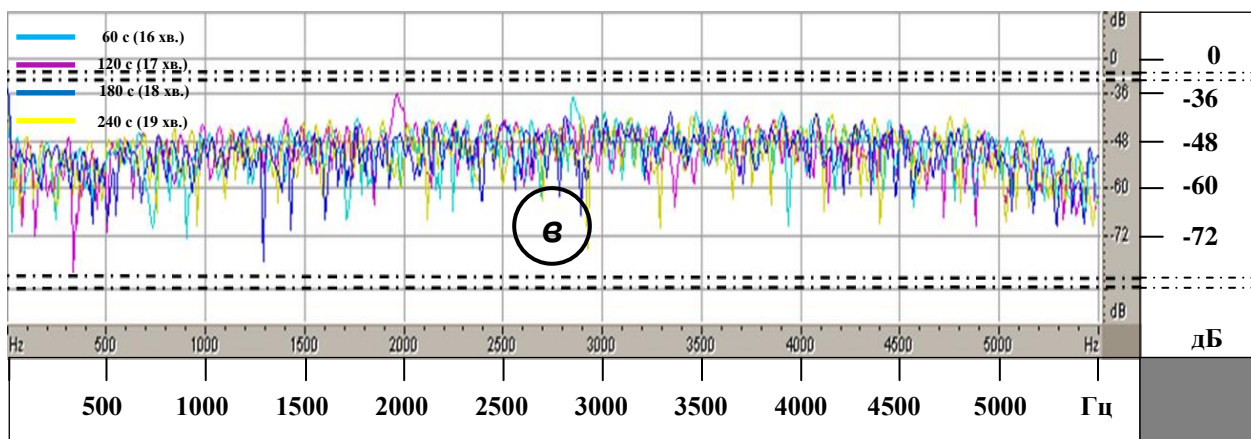
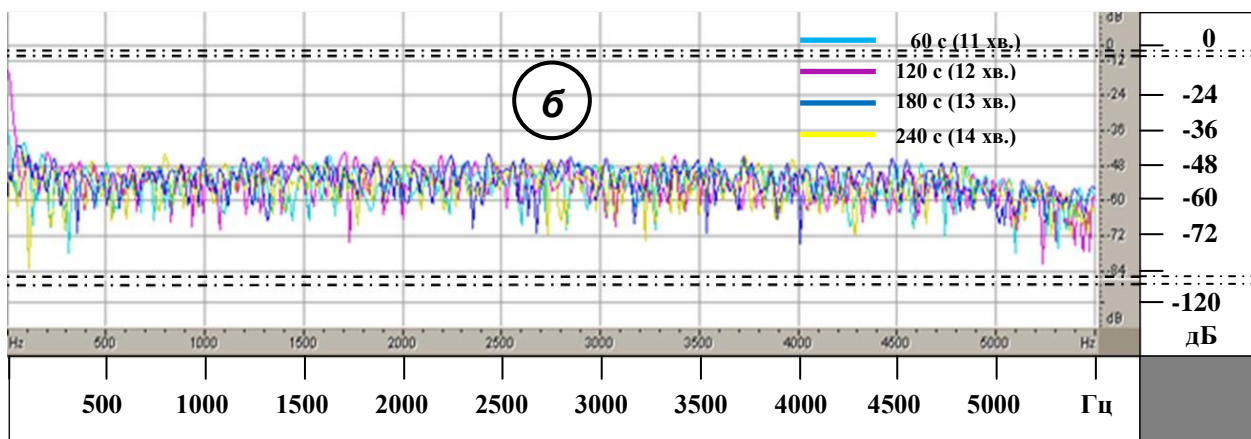
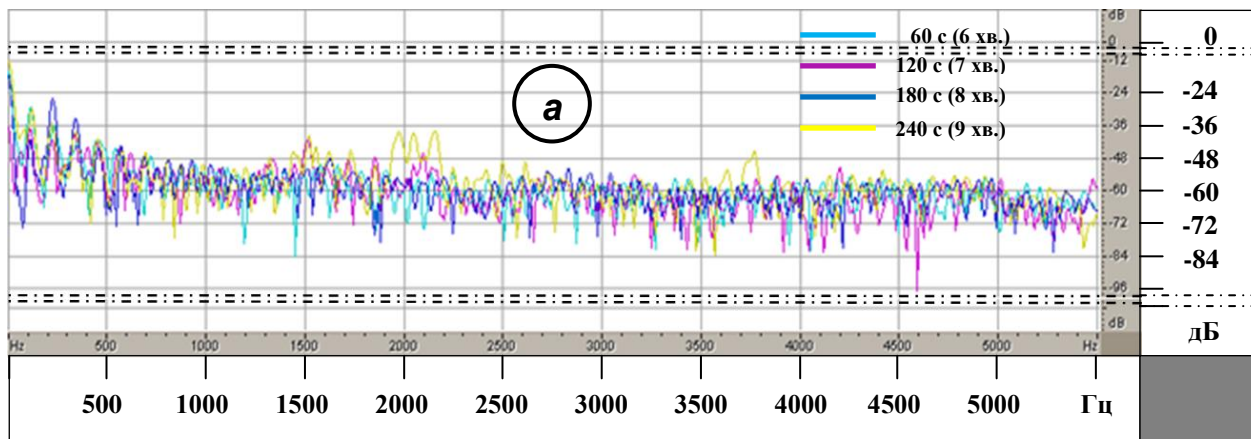
289. Кононцев С.В. Екологічна біотехнологія очищення стічних вод та культивування кормових організмів: монографія / С.В. Кононцев, Л.А. Саблій, Ю.Р. Гроховська. – Рівне: НУВГП, 2011. – 151 с.

290. Ракин В.И. Неравновесная кристаллизация оксалата кальция в водных растворах / В.И. Ракин, В.И. Каткова, Б.А. Макеев // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2005. – № 11. – с. 5-9.

### ДОДАТОК А

Спектри частот за величин потужності генератора УЗ-коливань, Вт:

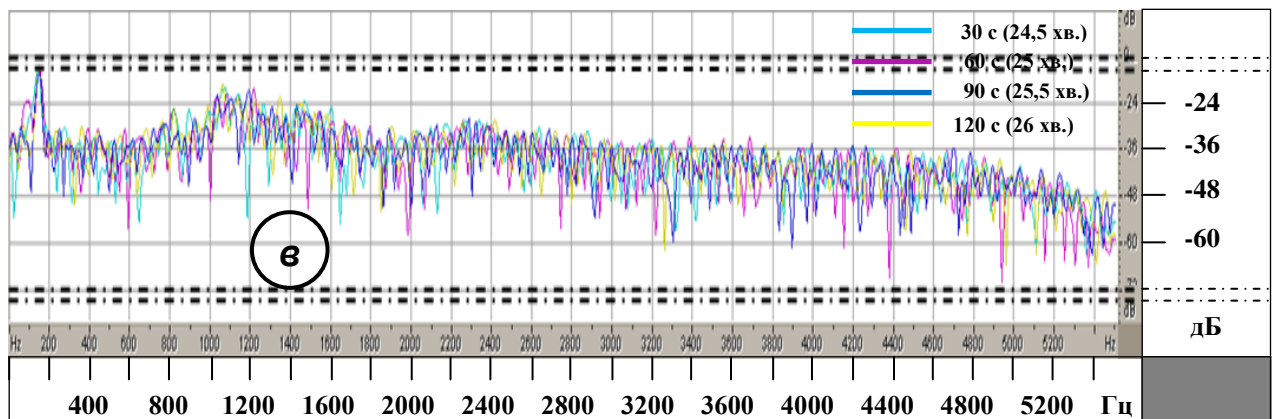
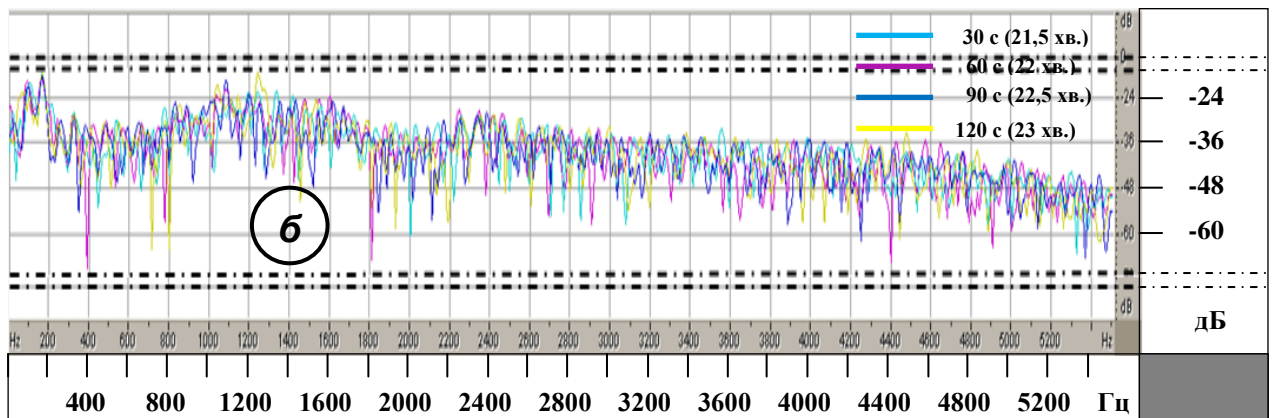
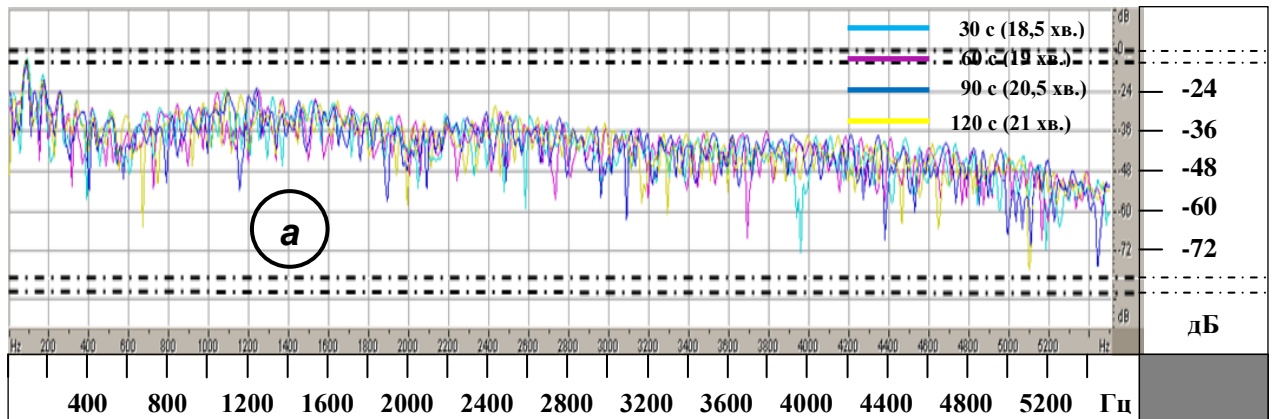
а – 9,2; б – 10,2; в – 11,5



## ДОДАТОК Б

Спектри частот акустичного сигналу кавітаційних полів,  
сформованих за тиску на вході у ГДСК, МПа:

а – 0,41; б – 0,47; в – 0,53





З А Т В Е Р Д Ж У Ю  
 Проректор  
 Національного університету  
 «Львівська політехніка»  
 п. Давидчук О.Р.  
 « 14 » жовтня 2016 р.

ДОДАТОК В

З А Т В Е Р Д Ж У Ю



Президент  
 корпорації  
 «Енергоресурс-інвест»  
 Ніронович І.О.  
 « 14 » жовтня 2016 р.

### ПРОТОКОЛ

результатів досліджень кавітаційно-флотаційного розділення рідких відходів шкіряних виробництв

У корпорації «Енергоресурс-інвест» впродовж 11-12 жовтня 2016 р. з використанням суміщеного кавітаційно-флотаційного апарата (СКФА) з номінальною потужністю приводу насоса 1,1 кВт професором каф. ХТНР НУ «Львівська політехніка» Знаком З.О., асистентом каф. ХТНР НУ «Львівська політехніка» Мнихом Р.В. і аспірантом каф. ХТНР НУ «Львівська політехніка» Сухацьким Ю.В. проведено дослідження кавітаційно-флотаційного розділення рідких відходів шкіряних виробництв, що містили натрію оксалат, який є протравною в процесах дублення шкіри й утворює з водою седиментаційно стійку колоїдну систему.

У нижній частині СКФА, гідродинамічному струменевому кавітаторі (ГДСК), формувалась область кавітації. Рациональні умови здійснення процесу кавітаційно-флотаційного розділення: тиск на вході у ГДСК –  $3,5 \cdot 10^5$  Па; діаметр сопла – 1,6 мм; кількість сопел – 5 од.; кут атаки струменів (кут між осями окремих струменів рідини) – 150 град.; тривалість кавітаційного оброблення – 900...1200 с.

Початкова концентрація натрію оксалату у рідких відходах –  $1 \text{ кг/м}^3$ . Для відділення дисперсних частинок натрію оксалату застосовували реагентне оброблення: до рідких відходів додавали стехіометричну кількість освітленої частини вапняного молока. Утворений кальцію оксалат флотувався у верхній частині СКФА. Вміст кальцію оксалату у рідких відходах оцінювали за значенням оптичної густини, виміряної за допомогою фотокolorиметра КФК-3, який працював у режимі нефелометра (довжина хвилі – 340 нм; товщина кювети – 20 мм; середовище порівняння – дистильована вода). Перед



вимірюванням оптичної густини проби гетерогенного середовища фільтрували через поліамідний фільтр (ТУ-6-06-И143-86) з діаметром отворів 0,2 мкм для відділення подрібнених у кавітаційних полях частинок кальцію гідроксиду. Процес кавітаційно-флотаційного розділення здійснювали за умов, наближених до адіабатичних.

Ступінь розділення рідких відходів ( $X$ , %) визначали за формулою

$$X = \frac{C_0 - C_k}{C_0} \cdot 100,$$

де  $C_0$ ,  $C_k$  – відповідно початкова та кінцева концентрація кальцію оксалату у рідких відходах, кг/м<sup>3</sup>.

Результати досліджень наведено у таблиці.

Таблиця – Результати досліджень процесу кавітаційно-флотаційного розділення рідких відходів шкіряних виробництв

Тривалість кавітаційного оброблення, с	300	600	900	1200	1500	1800
Кратність кавітаційного оброблення, рази	1,85	3,70	5,55	7,40	9,25	11,10
Ступінь розділення, %	94,5	88,3	93,6	94,6	90,8	91,4

У результаті випробувань встановлено, що використання СКФА дає змогу суттєво збільшити ступінь розділення рідких відходів шкіряних виробництв, порівняно із традиційним реагентним осадженням (~ на 10 % – від 84,7 до 94,6 %).

Висновок: запропонований процес кавітаційно-флотаційного розділення можна рекомендувати до впровадження на станціях очищення стічних вод м'ясо- та молокопереробних підприємств.

Від НУ “Львівська політехніка”


Знач З.О.

Мних Р.В.

Сушацький Ю.В.

Від корпорації “Енергоресурс-інвест”

Начальник технологічного відділу

Насадюк В.О.

## ДОДАТОК Г



## ЗАТВЕРДЖУЮ

Професор, Ректор Національного університету  
"Львівська політехніка"

п. Давидчак О.Р.

2017 р.

## АКТ

про впровадження результатів наукових досліджень у навчальний процес

Комісія у складі: голови науково-методичної ради Інституту хімії та хімічних технологій, д.т.н., проф. Атаманюк В.М., секретаря, к.т.н., доц. Ларук М.М., к.т.н., доц. Кіндзери Д.П. склала акт про те, що результати кандидатської дисертації Сухацького Ю.В. "Гідродинамічний кавітатор для кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ" впроваджені у навчальний процес підготовки фахівців за спеціальністю 161 "Хімічні технології та інженерія".

Результати наукової роботи використовуються у лекційних курсах та відображені у навчальних програмах з дисциплін: "Процеси та апарати хімічних виробництв", "Застосування якісно нових процесів у технології неорганічних речовин".

Використання результатів дисертаційної роботи Сухацького Ю.В. сприяє вдосконаленню підготовки фахівців.

Голова науково-методичної  
ради ІХХТ, д.т.н., проф.

Секретар, к.т.н., доц.

Доцент каф. ХІ, к.т.н., доц.

Атаманюк В.М.

Ларук М.М.

Кіндзера Д.П.