

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

**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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі хімії і технології неорганічних речовин Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Знак Зеновій Орестович,**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
в.о. завідувача кафедри хімії і технології неорганічних речовин

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Вітенько Тетяна Миколаївна,**  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя,  
завідувач кафедри обладнання харчових технологій

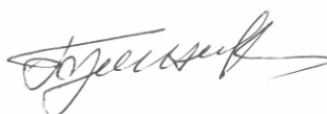
доктор технічних наук, професор  
**Єрмаков Петро Петрович,**  
ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний  
університет”,  
професор кафедри обладнання і технології харчових  
виробництв

Захист відбудеться “05” травня 2017 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.09 у Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, пл. Св. Юра, 9, корпус № 9, аудиторія 214.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “30” березня 2017 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.09,  
доктор технічних наук, професор



Гумницький Я.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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 доквілля.

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, ресурсоощадних технологій мінеральних добрив, солей, спеціальних видів сірки, металів та їх сполук, металевих порошків та інших продуктів”, яку виконували відповідно до тематик науково-дослідних робіт “Технології очищення висококонцентрованих органомісних 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 струменовому);
- дослідити вплив повітря (об'ємна витрата повітря –  $(1,5 \dots 9) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ),

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 даних 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). 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  $SO_2$ ; 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 “Сумхімпром”, 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.

**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 (APSTOS2)” (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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначені її мета і завдання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети, перераховано теоретичні положення та закономірності, одержані автором, що мають наукове та практичне значення.

У **першому розділі** наведено критичний аналіз процесів розділення водних гетерогенних середовищ. Показано, що флотаційні методи розділення мають низку переваг, порівняно з іншими, зокрема вони забезпечують безперервність процесу, селективність вилучення забруднювачів, характеризуються невеликими капітальними та експлуатаційними витратами тощо. Наголошено, що для цілеспрямованого впливу на властивості компонентів водних гетерогенних середовищ (дисперсної фази та дисперсійного середовища) доцільно застосовувати

принцип дискретно-імпульсного введення енергії: створення короткотривалих високоамплітудних енергетичних імпульсів та концентрування їх енергії у дискретних локальних зонах малих розмірів. Саме на цьому принципі й базується механізм дії кавітаційних явищ.

Розглянуто застосування кавітації для інтенсифікації різноманітних технологічних процесів, принципи роботи та конструктивні особливості основних типів кавітаторів, зокрема струменевого типу. Показано, що поєднання традиційних фізико-хімічних методів розділення із комплексними енергетичними впливами, зокрема кавітацією, дає змогу інтенсифікувати процеси тепло- і масообміну та швидкість хімічної взаємодії і, відповідно, скорочує тривалість процесу. Унаслідок викладеного вище, дійшли висновку, що суміщення послідовних стадій кавітації і флотації в одному апараті дасть змогу використовувати генеровані кавітаційні бульбашки для ефективного флотаційного відділення дисперсної фази від водних середовищ.

**Другий розділ** присвячений опису лабораторних установок та методик виконання експериментальних досліджень. Дослідження виконували на двох установках з принципово різними способами генерування кавітаційних полів.

Перша установка (непротічного типу) складалась із термостатованої реакційної ємності з електродами для вимірювання рН і ОВП, комутованими з рН-метрами, магнітної мішалки, системи пристроїв для сонохімічного аналізу (гідрофона, аналогово-цифрового перетворювача і портативного комп'ютера). Потужність генератора УЗ-коливачів – 8,0...12,5 Вт, частота випромінювання –  $22 \cdot 10^3$  Гц.

До складу другої установки (протічного типу) входили СКФА із системою для сонохімічного аналізу, циркуляційна ємність, відцентровий насос з потужністю приводу  $1,1 \cdot 10^3$  Вт, компресор. У нижній частині СКФА розташовано кавітатор – ГДСК. Корпус кавітатора (діаметр – 0,11; висота – 1 м) виконаний із прозорого оргскла. Тиск на вході у ГДСК (у межах  $(3...6) \cdot 10^5$  Па) регулювали байпасом. Кавітувальний елемент – система профільованих сопел змінного діаметра, розміщених під певним кутом, який у межах 30...180 град. регулювали шарнірним механізмом. Циркуляційну ємність оснащено контуром охолодження та штуцером для відбору проб для визначення вмісту завислих частинок, рН, ОВП тощо.

Ефективність кавітаційних явищ оцінювали калориметрично (за величиною виділеної теплової енергії) та методом сонохімічного аналізу (за величиною та характеристикою акустичного сигналу кавітаційних полів). Останній також використовували для порівняння розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів (магнітострикційному та ГДСК). 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 коректно порівнювати інтенсивності розвитку кавітаційних явищ у цих апаратах. Результати сонохімічного аналізу (осцилограми акустичних сигналів, спектри частот та інтенсивностей) отримували обробленням сигналів програмою для запису та редагування аудіофайлів Adobe Audition 1.5.

Вплив кавітації на генерування кисню та інших сполук-окисників, зміну електрокінетичного потенціалу частинок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  тощо визначали за стандартними методиками. Оптимальні технологічні параметри кавітаційного насичення води



киснем визначали за схемою ПФЕ. Ефективність кавітаційно-флотаційного відділення дисперсної фази оцінювали: вихід флотоконцентрату – гравіметрично, а вміст сірки у ньому – сульфитним методом; ступінь розділення водних гетерогенних середовищ – нефелометрично.

У **третьому розділі** наведено результати досліджень розвитку кавітаційних полів у генераторах різних типів (ультразвуковому магнітострикційному та ГДСК).

Оскільки під час кавітації усі види фізико-механічних впливів (ерозія та диспергування твердої фази, ударні хвилі, пульсації бульбашок тощо) та фізико-хімічної взаємодії (деструкція, дегазація, хемосорбція, рекомбінація радикалів тощо) у значній мірі трансформуються у теплову енергію, то її величину оцінено калориметрично.

У середовищі MathCad будували енергетичні поверхні (рис. 1), на основі яких здійснювали аналіз багатofакторної залежності величини теплової енергії від технологічного (тиск на вході у кавітатор) та конструктивних (діаметр сопла, кут атаки струменів) параметрів ГДСК для різної кількості сопел.

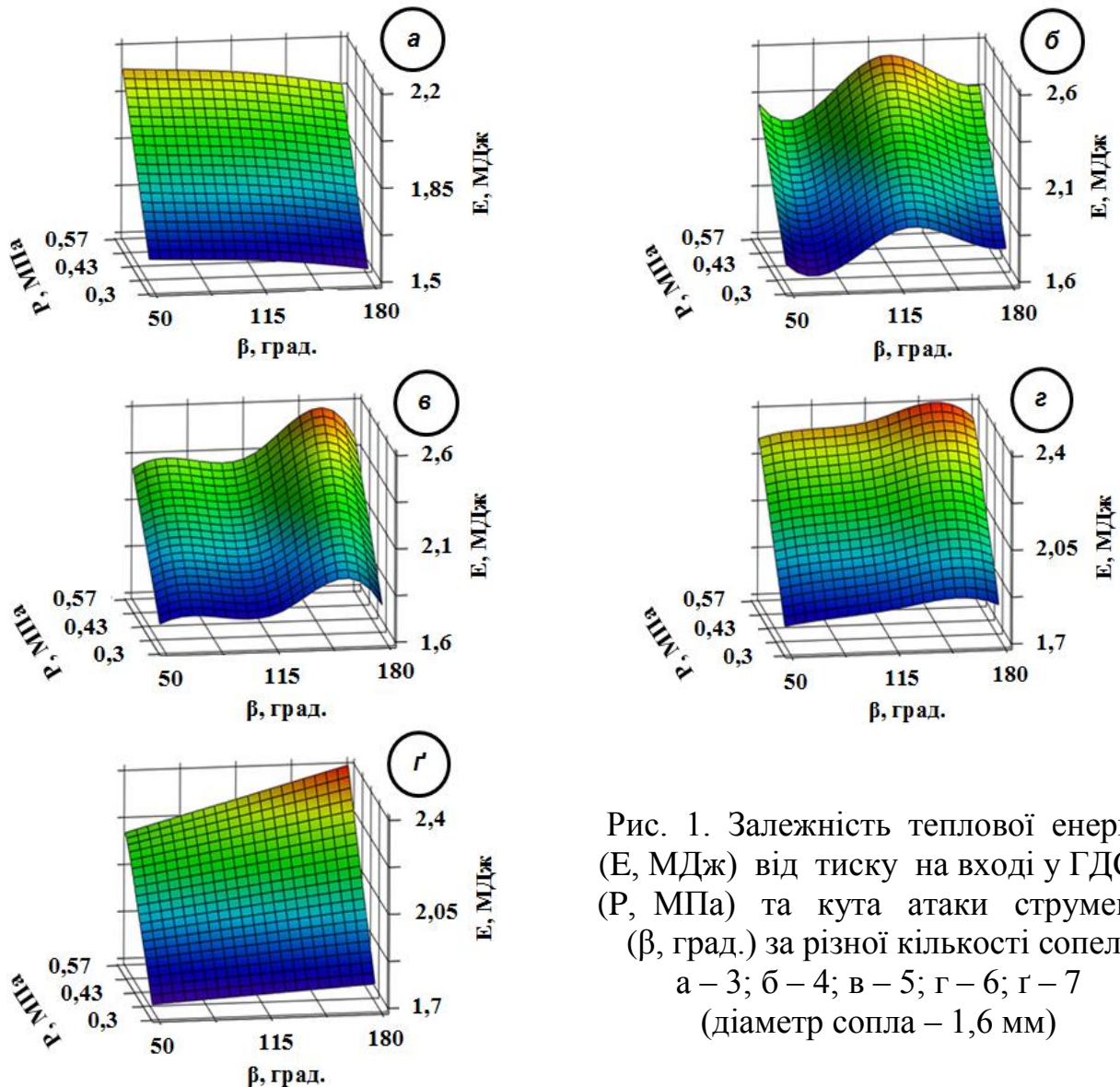


Рис. 1. Залежність теплової енергії ( $E$ , МДж) від тиску на вході у ГДСК ( $P$ , МПа) та кута атаки струменів ( $\beta$ , град.) за різної кількості сопел:  
а – 3; б – 4; в – 5; г – 6; 7 – 7  
(діаметр сопла – 1,6 мм)

Зі збільшенням кількості сопел величина оптимального кута атаки струменів, за якого ефективність кавітаційного оброблення була найвищою, зміщувалась в область більших значень кута атаки (рис. 1). Так, зі збільшенням кількості сопел від 3-х до 7-ми величина оптимального кута атаки струменів зростала від 50 до 175 град. Залежність питомої теплової енергії від діаметра сопла (рис. 2) має екстремальний характер із максимумом за діаметра сопла  $1,6 \pm 0,1$  мм.

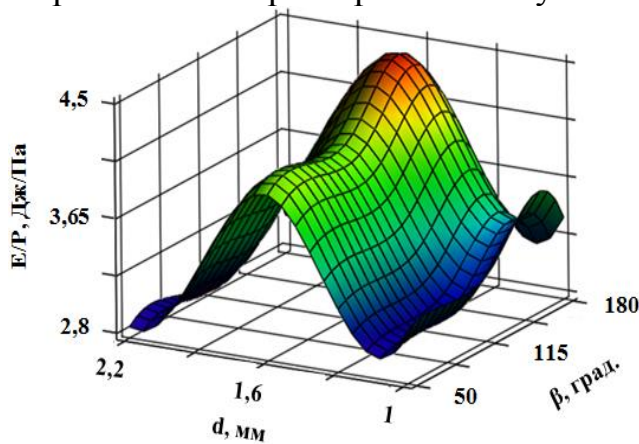


Рис. 2. Залежність питомої теплової енергії ( $E/P$ , Дж/Па) від діаметра сопла ( $d$ , мм) та кута атаки струменів ( $\beta$ , град.) (кількість сопел – 5;  $P = 0,57$  МПа)

варіювання параметрів: тиску –  $0,36 \dots 0,6$  МПа; діаметра сопла –  $1 \dots 2,2$  мм; кількості сопел –  $3 \dots 7$ ; кута атаки –  $36 \dots 180^\circ$ . Параметри, від яких залежить величина теплової енергії, змінювали 5 разів, тому обсяг вибірки  $N$  становив  $5^4 = 625$  комбінацій.

Шукана статистична модель для оптимізації конструкції кавітатора має такий загальний вигляд

$$E(P, d, n, \beta) = E_{\text{сер.арифм}} \cdot f_1(P) \cdot f_2(d) \cdot f_3(n) \cdot f_4(\beta), \quad (1)$$

де  $E(P, d, n, \beta)$  – величина теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, МДж;  $E_{\text{сер.арифм}}$  – середнє арифметичне значень теплової енергії, МДж;  $P$  – тиск на вході у ГДСК, МПа;  $d$  – діаметр сопла, мм;  $n$  – кількість сопел, од.;  $\beta$  – кут атаки струменів, град.

Внаслідок застосування методу Брандона отримали мультиплікативну модель

$$E(P, d, n, \beta) = 1,722 \cdot f_1(P) \cdot f_2(d) \cdot f_3(n) \cdot f_4(\beta), \quad (2)$$

$$\text{де } f_1(P) = 1,562P^{0,599}, \quad (3)$$

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

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

$$f_4(\beta) = -10^{-9}\beta^4 + 3 \cdot 10^{-7}\beta^3 - 2 \cdot 10^{-5}\beta^2 + 0,979. \quad (6)$$

Адекватність отриманих рівнянь регресії (2-6) перевіряли за критерієм Фішера ( $F$ ):  $F < F_T = 0,203 < 1,51$ . Точність математичної моделі оцінювали за двома критеріями – коефіцієнтом детермінації ( $R^2 = 0,792$ ) та середньою відносною похибкою апроксимації ( $\varepsilon_{\text{сер.відн}} = 5,85\%$ ).

Оптимальні умови для здійснення кавітаційного оброблення води знаходяться в площині (рис. 3) значень тиску на вході у кавітатор –  $0,54 \dots 0,6$  МПа, діаметра сопла

Для забезпечення найефективнішого режиму кавітаційного оброблення водного середовища конструкцію ГДСК оптимізували на основі аналізу графічної інтерпретації 4-факторної мультиплікативної статистичної моделі, побудованої з використанням методу Брандона. Вона пов'язує величину виділеної внаслідок кавітації теплової енергії з технологічним та конструктивними параметрами ГДСК.

Кроки варіювання параметрів: тиску на вході у кавітатор –  $0,06$  МПа; діаметра сопла –  $0,3$  мм; кількості сопел –  $1$  сопло; кута атаки струменів –  $36^\circ$ . Области

–  $1,6 \pm 0,1$  мм, кількості сопел – 4...5 од., кута атаки струменів –  $144 \dots 180^\circ$ . За таких умов величина теплової енергії, що виділяється за кавітації, є більшою 2,5 МДж (максимальний ККД = 90,7%). Враховуючи збільшення ерозії сопел за наближення кута атаки до  $180^\circ$ , доцільно обмежити значення кута атаки в діапазоні  $144 \dots 170^\circ$ .

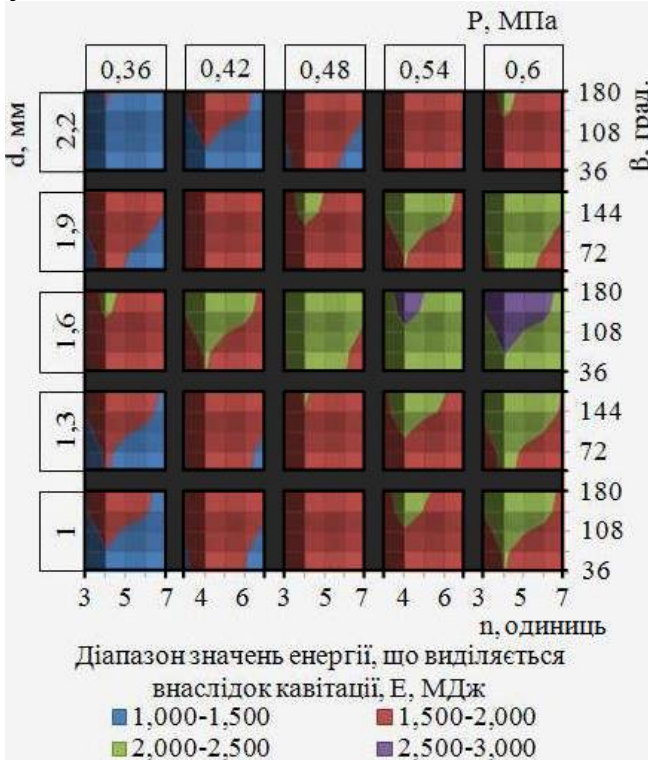


Рис. 3. Діаграма залежності  $E = f(P, d, n, \beta)$ , розрахована за методом Брандона

агломерату бульбашок (бульбашка II покоління), діаметр яких може сягати 10 мм.

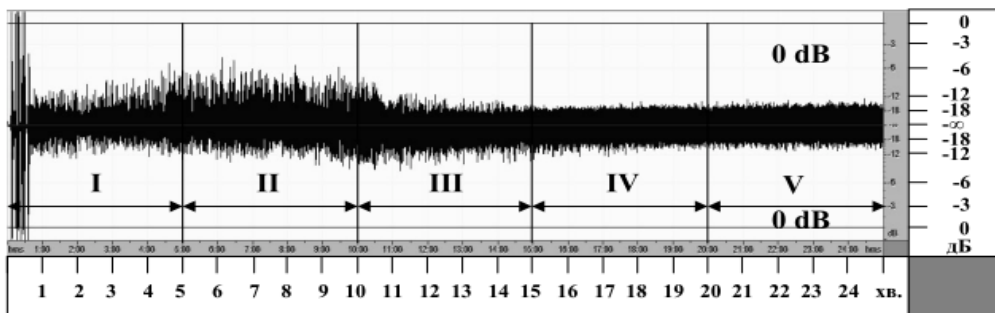


Рис. 4. Осцилограма акустичного сигналу кавітаційного поля, збудженого магнітострикційним випромінювачем, за зміни в часі (хв.) потужності генератора УЗ-коливань (Вт) на ділянках: I – 8,0; II – 9,2; III – 10,2; IV – 11,5; V – 12,5

За величину резонансної частоти приймали середнє арифметичне значень 4-ох частот (табл. 1), що відповідали амплітудним значенням акустичного сигналу в певний період часу (ділянки I... V, рис. 4).

Перебіг кавітації як квазігетерогенного процесу значно знижує ефективність кавітаційного оброблення, оскільки область кавітації локалізована поблизу магнітостриктора, а зростання радіуса бульбашок (від  $0,86 \cdot 10^{-3}$  до  $1,86 \cdot 10^{-3}$  м)

Розроблена статистична модель кавітаційного оброблення води може бути використана для прогнозування інтенсивності кавітаційних полів у значно ширших, ніж досліджувані, областях варіювання технологічного та конструктивних параметрів роботи ГДСК.

Для з'ясування структури кавітаційних полів, сформованих у генераторах різних типів, аналізували дані сонохімічних досліджень. Встановлено, що зі збільшенням потужності генератора УЗ-коливань від 8,0 до 12,5 Вт рівень акустичного сигналу зменшувався у 2...2,5 рази (рис. 4). Це обумовлено формуванням окремих кавітаційних бульбашок у воді (I-го покоління), їх пульсаціями (відривок 0...15 хв. на осцилограмі (рис. 4), та подальшою коалесценцією під дією сил Бьєркнеса з утворенням декількох або навіть одного

Про об'єднання кавітаційних бульбашок I-го покоління з утворенням агломератів свідчить зменшення резонансної частоти під час зростання величини потужності генератора УЗ-коливань (табл. 1).

внаслідок коалесценції суттєво ускладнить флотацію дрібнодисперсних частинок. Це унеможливорює використання УЗ-випромінювачів для реалізації процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ.

Таблиця 1 – 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)	<u>60</u> 4900	<u>120</u> 4400	<u>180</u> 2500	<u>240</u> 3400	3800
9,2 (ділянка II)	<u>60</u> 2950	<u>120</u> 2200	<u>180</u> 2300	<u>240</u> 3150	2650
10,2 (ділянка III)	<u>60</u> 1620	<u>120</u> 3800	<u>180</u> 1400	<u>240</u> 1150	1990
11,5 (ділянка IV)	<u>60</u> 500	<u>120</u> 3400	<u>180</u> 1870	<u>240</u> 1300	1770
12,5 (ділянка V)	<u>60</u> 1750	<u>120</u> 750	<u>180</u> 1650	<u>240</u> 2900	1760

Результати сонохімічних досліджень розвитку кавітаційних полів у ГДСК свідчать, 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 (рис. 5).

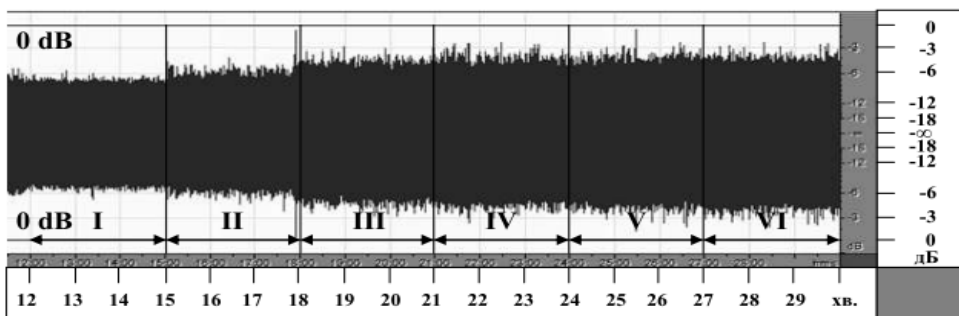


Рис. 5. Осцилограма акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого у ГДСК, за зміни в часі (хв.) величини тиску на вході у кавітатор (МПа) на ділянках: I – 0,29; II – 0,35; III – 0,41; IV – 0,47; V – 0,53; VI – 0,57

меншими розмірами зростає. Це підтверджено зростанням резонансної частоти компонент кавітаційного поля зі збільшенням тиску на вході у кавітатор (табл. 2).

Результати аналізу спектра інтенсивності акустичного сигналу (рис. 6) кавітаційних полів у ГДСК, а також фото- та відеограм свідчать про їх принципово іншу структуру, порівняно із такими, що сформовані УЗ-випромінювачем.

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

Таблиця 2 – 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)	<u>30</u> 970	<u>60</u> 1750	<u>90</u> 2800	<u>120</u> 1520	1760
0,41 (ділянка III)	<u>30</u> 1850	<u>60</u> 1800	<u>90</u> 3500	<u>120</u> 2050	2300
0,47 (ділянка IV)	<u>30</u> 2150	<u>60</u> 3750	<u>90</u> 2220	<u>120</u> 2300	2610
0,53 (ділянка V)	<u>30</u> 3780	<u>60</u> 1300	<u>90</u> 3800	<u>120</u> 3450	3080
0,57 (ділянка VI)	<u>30</u> 3900	<u>60</u> 4450	<u>90</u> 3950	<u>120</u> 3800	4030

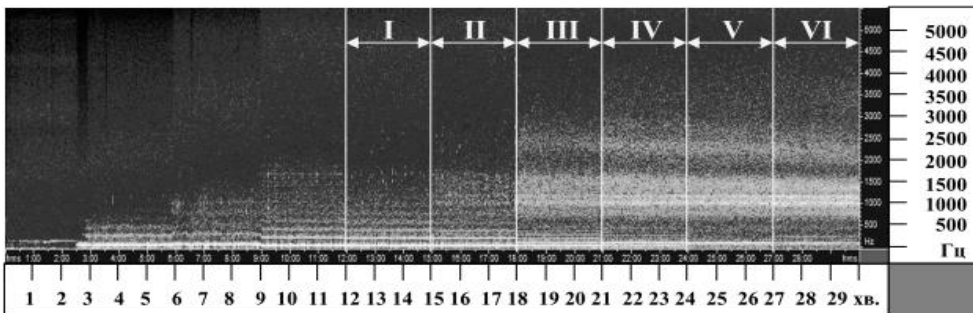


Рис. 6. Спектр інтенсивності акустичного сигналу кавітаційного поля ГДСК за зміни в часі (хв.) тиску на вході у кавітувальний елемент (МПа) на ділянках:

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

збільшенням тиску. Вони сприяють диспергуванню кавітаційних бульбашок I покоління та їх можливих агрегатів (бульбашок II покоління). Відмічено, що під час руху потоку рідини вгору розмір диспергованих бульбашок зменшувався. Отже, у ГДСК формуються 3-и зони – кавітаційна (внизу), перехідна та флотаційна (верхня).

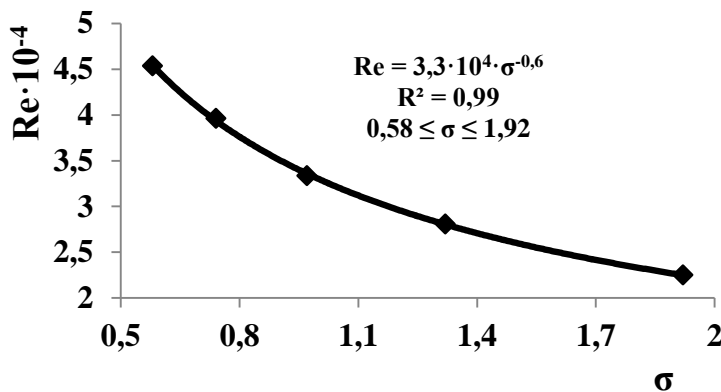


Рис. 7. Залежність критерію Рейнольдса (Re) від числа кавітації ( $\sigma$ ) (кількість сопел – 5; діаметр сопла – 1,6 мм)

Найсвітліший колір має ділянка спектра для ГДСК у діапазоні  $(1 \dots 1,5) \cdot 10^3$  Гц за зміни тиску на вході у ГДСК у межах 0,41...0,57 МПа. Це можна пояснити наявністю вихрових утворень, інтенсивність яких зростає зі

Встановлено, що зі збільшенням  $\sigma$  (визначає режим кавітації) величина Re зменшується, тобто зменшується турбулізація потоку і ускладнюється розвиток кавітаційних явищ. За  $\sigma < 1$  ( $\sigma = 0,97 \dots 0,58$ ) у ГДСК формується режим суперкавітації, для якого характерне сплескування кавітаційних бульбашок за межами сопел, що запобігає їх ерозії. При цьому величина Re зростає від  $3,3 \cdot 10^4$  до  $4,5 \cdot 10^4$  (рис. 7).

Особливістю перехідної зони є виникнення вихрових потоків внаслідок різного роду нестационарностей (градієнтів тиску та швидкості, виникнення локальних газорідних потоків тощо). Стикаючись, вихрові потоки руйнуються з формуванням у флотаційній зоні дрібнодисперсних бульбашок III-го покоління. За тиску на вході у кавітатор 0,57 МПа висота флотаційної зони дорівнює близько 1/3 від висоти флотаційної колони, тобто 0,33 м. Отже, в одному апараті (кавітаторі-флотаторі) суміщено дві стадії процесу розділення водних гетерогенних середовищ: кавітаційну та флотаційну.

Значення резонансного радіуса бульбашок кавітаційних полів (табл. 3, рис. 4, 5), свідчать, що у ГДСК бульбашки досягають резонансних розмірів з найбільшою здатністю до сплескування та руйнівальною дією.

Таблиця 3 – 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

На основі сонохімічного аналізу розвитку кавітаційних полів виявлено, що максимальне значення амплітуди відносного звукового тиску характерне для 5-ти сопел. Отже, результати сонохімічного аналізу та калориметричного методу дослідження розвитку кавітаційних полів взаємно узгоджуються.

З метою інтенсифікації кавітації та супутнього їй ефекту флотації дисперсних частинок у водні середовища перед кавітатором вводили повітря (об'ємна витрата –  $(1,5...9) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ), що виконувало роль зародків кавітації.

Залежність виділеної теплової енергії від об'ємної витрати повітря, введеного у воду, має екстремальний характер (рис. 8). Локальний максимум на кривій

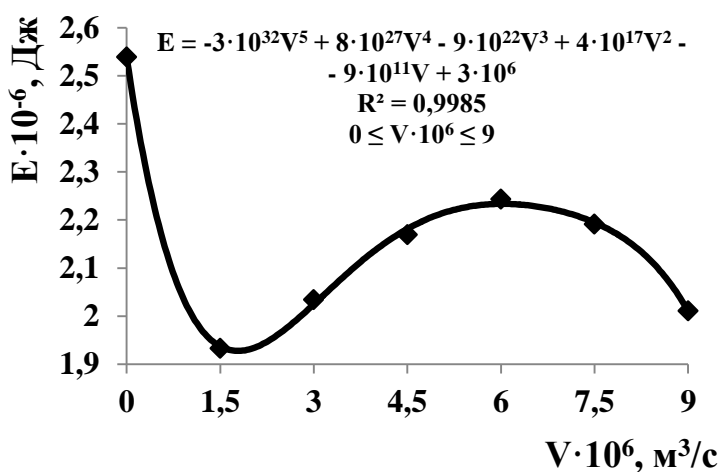


Рис. 8. Залежність теплової енергії (E) від об'ємної витрати повітря (V)

( $2,243 \pm 0,011 \text{ МДж}$ ) за  $V = (6 \pm 0,75) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  відображає найсприятливіші умови для сумісної реалізації кавітаційного оброблення водних середовищ та флотації дисперсної фази як стадій процесу кавітаційно-флотаційного розділення гетерогенних середовищ. В областях праворуч і ліворуч від цього максимуму існує режим „виродженої кавітації“, зумовлений накопиченням дрібних бульбашок, що не сплескуються.

Про доцільність введення

повітря у воду свідчать також дані сонохімічного аналізу: величина акустичного сигналу кавітаційного поля без введення повітря впродовж 900 с оброблення зменшується від -4 до -18 дБ (рис. 9а). При цьому величина амплітуди звукового тиску зменшується в 5 разів – кавітація у часі згасає. Введення повітря ( $V = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ), окрім пульсацій синусоїдального характеру (рис. 9б), дає змогу підтримувати усереднене значення величини акустичного сигналу на рівні -12 дБ впродовж усього процесу оброблення й збільшити величину амплітуди звукового тиску вдвічі. При цьому середній розмір флотаційних бульбашок становив  $\sim 0,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , що всього на 6% менше, ніж без введення повітря. За  $V = 9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  середній розмір флотаційних бульбашок становив  $\sim 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

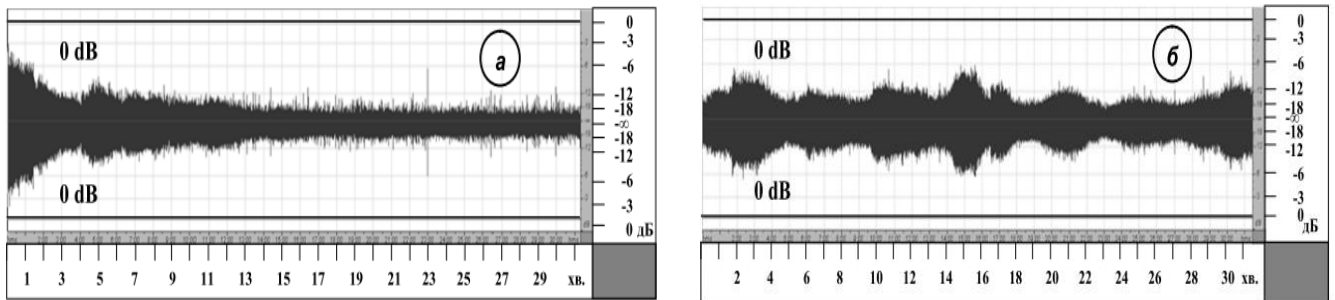


Рис. 9. Осцилограми акустичного сигналу кавітаційних полів у ГДСК за об’ємної витрати повітря ( $V, \text{ м}^3/\text{с}$ ): а – 0; б –  $6 \cdot 10^{-6}$

Важливе значення під час очищення водних середовищ від дисперсних частинок органічної природи відіграють стабільні продукти сонолізу молекул води з окисними властивостями ( $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  тощо). Дослідження їх утворення під час кавітації проводили у попередньо деоксигенованій воді. Встановлено, що ступінь насичення води киснем за рахунок її сонолізу впродовж 1800 с становить 72,7% від максимально можливого. За збільшення об’ємної витрати повітря, введеного у воду, до  $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  ступінь насичення киснем зростає на 11,2% (до 83,9%), а до  $9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  – всього на 1,24%, що пов’язано із встановленням абсорбційно-десорбційної рівноваги у системі “рідина–газ”.

Порівняння вмісту  $\text{H}_2\text{O}_2$  у пробах після 1800 с кавітаційного оброблення свідчить про збільшення інтенсивності сонолізу в ГДСК вдвічі, ніж за використання УЗ-випромінювача.

Для ідентифікації процесів, якими супроводжувався процес кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ, досліджували зміну електрокінетичного потенціалу ( $\zeta$ ) дисперсних частинок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – типового реагенту в чисельних технологічних процесах, під час їх оброблення у ГДСК як за введення повітря у водне середовище, так і без нього. Екстремальний характер залежності величини  $\zeta$ -потенціалу частинок  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  із максимумом за часу оброблення 900 с свідчить про утворення на поверхні бульбашок “шламового покриття”, яке блокує поверхню бульбашок і сприяє агрегації частинок дисперсної фази та їх подальшій седиментації. Тому момент утворення “шламового покриття” (падіння величини  $\zeta$ -потенціалу нижче 40 мВ) можна розглядати як досягнення “порогу коагуляції”.

На основі визначених закономірностей та отриманих кількісних залежностей розвитку кавітаційних полів розроблено конструкцію ГДСК.

У четвертому розділі наведено результати досліджень процесів кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ із використанням ГДСК розробленої конструкції.

Встановлено, що ефективність процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди є в 1,65 рази більшою, ніж за використання пневматичної флотації (вміст сірки у флотоконцентраті (ФК) становив 63,6 проти 38,4% мас.). Максимального коефіцієнта збагачення сірчаної руди, що дорівнював 3,21, досягали за тиску на вході у кавітатор 0,57 МПа та об'ємної витрати введеного у водне середовище повітря ( $V = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ) (рис. 10).

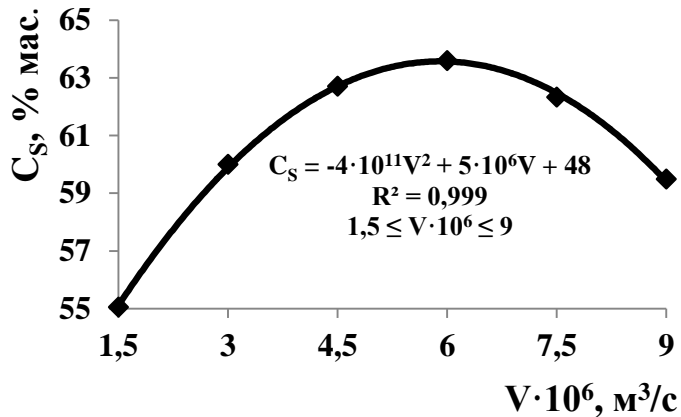


Рис. 10. Залежність вмісту сірки у ФК ( $C_s$ ) від об'ємної витрати повітря ( $V$ )

окиснення іонів  $\text{SO}_3^{2-}$  до  $\text{SO}_4^{2-}$  у ГДСК відбувається у 15 разів швидше, ніж за перемішування (рис. 11). У ГДСК утворюється осад, який осідає в 4 рази швидше, ніж осад у реакторі з мішалкою (1800 с проти 7200 с). Це зумовлено інтенсивнішим окисненням утвореного  $\text{CaSO}_3$  до гіпсу, заряджені частинки якого формують агрегати й осідають.

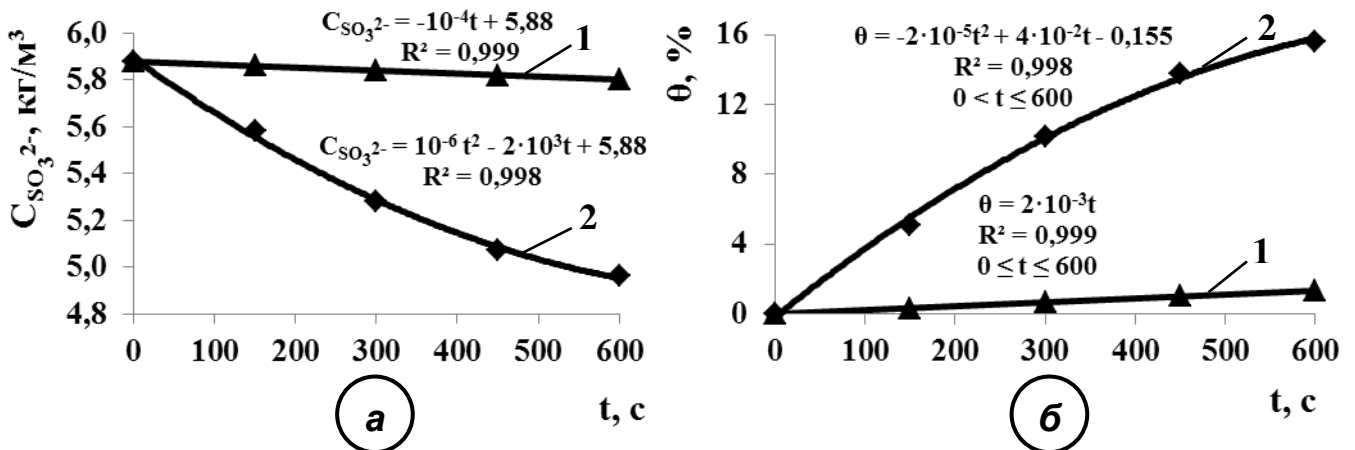


Рис. 11. Залежності концентрації іонів  $\text{SO}_3^{2-}$  ( $C_{\text{SO}_3^{2-}}$ ) (а) та ступеня їх окиснення до  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $\theta$ ) (б) від тривалості процесу окиснення ( $t$ ) у:  
1 – реакторі з мішалкою; 2 – ГДСК

Кавітаційне оброблення стабілізованої суспензії каоліну в ГДСК дає змогу відділити дисперсні частинки каоліну від рідкої фази як за рахунок флотації (ступінь розділення суспензії – 25%), так і за рахунок коагуляції тонких шламових частинок



(ступінь розділення – 13%). Сумарний ступінь флотаційно-коагуляційного відділення дрібнодисперсних частинок каоліну становить 38%. Подальше відстоювання обробленої суспензії впродовж 24 год. зумовлювало зростання ступеня розділення до 98,5%, що відповідало вмісту завислих частинок  $1,5 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>, тобто вимогам чинних нормативних документів.

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. За тиску на вході у ГДСК, що дорівнював 0,35 МПа, спостерігали утворення плівково-структурної піни, для якої 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 рідини; шар піни має відносно невелику висоту – 0,05 м; крупні бульбашки є сильно деформованими. Ознакою ефективної флотації була наявність в піні бульбашок розміром  $(1...3) \cdot 10^{-2}$  м, які частково вкриті плівкою мінеральних частинок так, що на їх поверхні залишились вільні ділянки. Під час флотації реакційна система набувала інтенсивного молочного забарвлення, зумовленого накопиченням дрібнодисперсних бульбашок повітря.

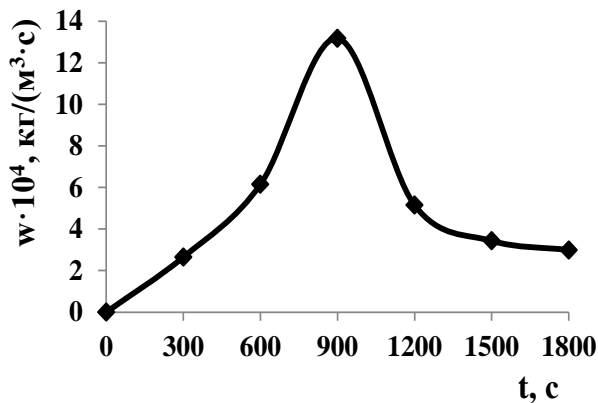


Рис. 12. Залежність швидкості флотації кальцію оксалату ( $w$ ) від тривалості кавітаційного оброблення ( $t$ )

Оптимальна тривалість кавітаційного оброблення, за якої швидкість флотації кальцію оксалату є максимальною ( $13,18 \cdot 10^{-4}$  кг/(м<sup>3</sup>·с)), знаходиться в діапазоні 600...900 с (рис. 12). Подальше збільшення тривалості оброблення спричиняє зменшення швидкості процесу флотації, оскільки зростає частка подрібнених частинок дисперсної фази з розмірами, що неспівмірні з розмірами бульбашок газової фази.

Ефективність кавітаційно-флотаційного процесу підтверджено також під час досліджень процесів розчинення лангбейнітової руди в “холодному режимі” та флотації нерозчинного залишку у СКФА, флотаційного відділення нерозчинного залишку з Домбровського кар’єру.

У п’ятому розділі наведено принципову схему конструкції ГДСК (рис. 13), а також технологічні схеми процесів: кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди (рис. 14); 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.

Розроблена конструкція ГДСК, у якій введення нових елементів (гідрофона 17, мікропроцесора 18, реверсивного двигуна 1, шарнірного 10 та зворотно-поступального 8 механізмів) дає змогу змінювати просторове розташування

кавітувальних елементів (сопел 12) 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 – можливість управління ефективністю кавітаційного оброблення безпосередньо під час здійснення певного технологічного процесу, що забезпечує його безперервність і гнучкість.

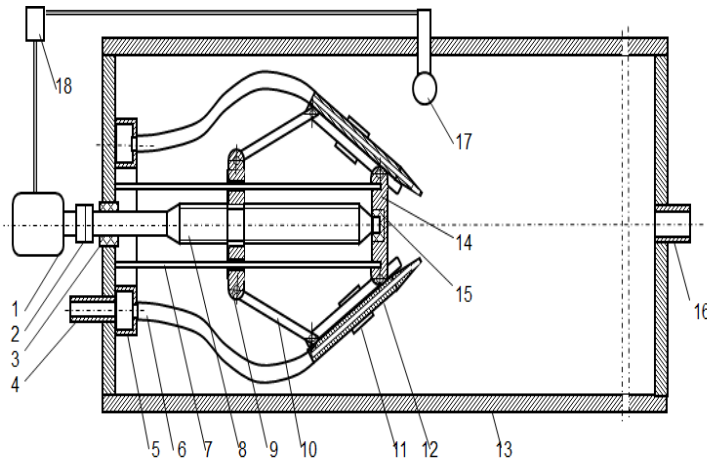


Рис. 13. Принципова схема конструкції ГДСК (поздовжній переріз):

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

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.

Технологічну схему процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди, призначену для отримання флотоконцентрату (ФК) з високим вмістом сірки (55...64% мас.), наведено на рис. 14.

Подрібнену до розмірів  $-1$  мм руду подають із бункера 1 дозатором 2 у реактор з мішалкою 3. У ньому готують пульпу руди, у якій співвідношення Т:Р  $\approx 1:5$  забезпечують додаванням води. Із ємностей 4, 5, 6, 7, 8 до пульпи дозують флотореагенти (гас; соснову олію; розчини крохмалю,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , кальцинованої соди).

Із реактора 3 насосом 9, яким створюють необхідний тиск, пульпу подають у СКФА 11. Кратність циркуляції пульпи сірчаної руди через СКФА дорівнює 10...12. Інтенсивна диспергувальна дія кавітаційних полів, сформованих у нижній частині СКФА – у ГДСК, сприяє глибокому розкриттю пустої породи, а утворені у флотаційній зоні дрібнодисперсні бульбашки забезпечують флотацію частинок сірки. Для інтенсифікації кавітації та флотації сірки у пульпу перед СКФА компресором 10 через витратомір 10а вводять повітря ( $V = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

ФК, який утворюється у верхній частині СКФА, збирають скребковим механізмом і транспортером 13 подають у збірник 12. Звідти вологий ФК надходить на зневоднення на барабанний вакуум-фільтр 14, а потім на стадію перероблення

(наприклад, автоклавне виплавлення сірки). Дрібні частинки пустої породи внаслідок кавітаційного оброблення набувають зарядів і укрупнюються – вони коагулюють та осідають. Утворений осад виводять із СКФА.

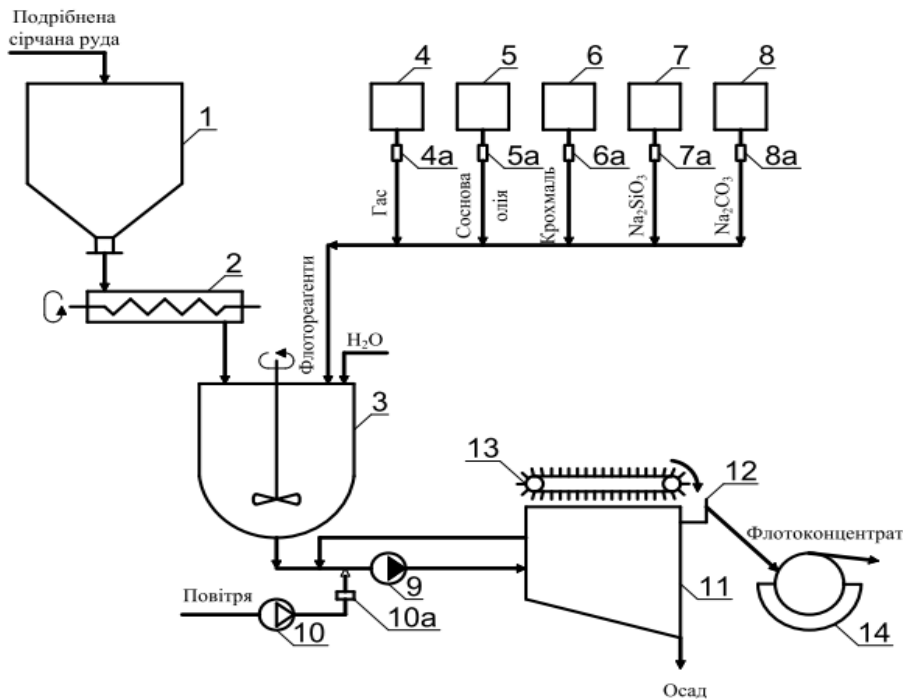


Рис. 14. Технологічна схема процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди:

1 – бункер; 2 – дозатор; 3 – реактор з мішалкою; 4, 5, 6, 7, 8 – напірні ємності; 4a, 5a, 6a, 7a, 8a – дозатори; 9 – циркуляційний насос; 10 – компресор; 10a – витратомір; 11 – СКФА; 12 – збірник ФК; 13 – стрічковий транспортер; 14 – барабанний вакуум-фільтр

Економічний ефект від впровадження процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди розраховано на підставі технологічної схеми, наведеної на рис. 14. За прототип прийняли типовий технологічний процес флотаційного збагачення сірчаної руди у пневмомеханічній машині системи “Механобр” (лабораторна установка).

Економічний ефект від впровадження процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди (табл. 4) досягатиметься внаслідок зменшення річних енерговитрат на оброблення 350 000 м<sup>3</sup> пульпи сірчаної руди для отримання ФК із вмістом сірки 63,6% мас. (для пневматичної флотації – 38,4% мас.). Вміст твердої фази у пульпі становив 20% мас. Витрати електроенергії на живлення компресорів у двох процесах є сумірними, тому ними нехтували.

Таблиця 4 – 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	56·10 <sup>6</sup>	15,59·10 <sup>6</sup>
Вартість одиниці електроенергії, грн./(кВт·год)	1,4314	1,4314
Вартість електроенергії, грн./рік	80,16·10 <sup>6</sup>	15,59·10 <sup>6</sup>
Економічний ефект, грн./рік	64,57·10 <sup>6</sup>	
Продуктивність флотокамери за сіркою, кг S/рік	26,88·10 <sup>6</sup>	44,52·10 <sup>6</sup>
Питома вартість вилучення сірки, грн./кг S	2,98	0,35
Співвідношення питомих вартостей вилучення сірки, рази	2,98/0,35 = 8,5	

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 разі використання пневматичної флотації.

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

## 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 –  $(6 \pm 0,75) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/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 сульфату до кальцію сульфату у реакторі з мішалкою ( $1,33 \cdot 10^{-2}$  кмоль/( $\text{м}^3 \cdot \text{с}$ )) та у ГДСК ( $19,94 \cdot 10^{-2}$  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.

### Основні умовні позначення

$C$  – концентрація,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $d$  – діаметр сопла,  $\text{м}$ ;  $E$  – теплова енергія, що виділяється внаслідок кавітації, Дж;  $n$  – кількість сопел, од.;  $P$  – тиск на вході у ГДСК, Па;  $P_{\text{атм}}$ ,  $P_{\text{нас}}$  – відповідно атмосферний і тиск насиченої водяної пари, Па;  $R_L$ ;  $R_{\text{уз}} (I \text{ діл.})$ ,  $R_{\text{уз}} (V \text{ діл.})$ ,  $R_{\text{ГДСК}}$ ;  $R^{C_m}_{\text{уз}} (I \text{ діл.})$ ,  $R^{C_m}_{\text{уз}} (V \text{ діл.})$ ,  $R^{C_m}_{\text{ГДСК}}$  – резонансний радіус бульбашки, розрахований відповідно за формулами Лапласа, Міннерта і Сміта,  $\text{м}$ ;  $t$  – час,  $\text{с}$ ;  $v$  – дійсна швидкість,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $V$  – об’ємна витрата повітря,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $w$  – швидкість флотації,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ;  $\beta$  – кут атаки струменів, град.;  $\epsilon_{\text{сер.відн}}$  – середня відносна похибка апроксимації, %;  $\zeta$  – електрокінетичний потенціал, В;  $\theta$  – ступінь окиснення, %;  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в’язкості,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $\rho$  – густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . **Безрозмірні комплекси:**

$F$ ,  $F_T$  – відповідно розрахунковий і табличний критерій Фішера;  $R^2$  – коефіцієнт детермінації;  $Re = v \cdot d \cdot \rho / \mu$  – число Рейнольдса;  $\sigma = (P_{атм} - P_{нас}) / (0,5 \cdot \rho \cdot v^2)$  – число кавітації. **Індекси:** сер.арифм – середнє арифметичне.

### **Основний зміст дисертації опубліковано в таких роботах:**

1. 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. *(Особистий внесок здобувача – критичний аналіз існуючих способів очищення стічних вод, дослідження формування кавітаційних полів у ГДСК).*

2. 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. *(Особистий внесок здобувача – виконання експериментальних досліджень, оброблення результатів досліджень).*

3. 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. *(Особистий внесок здобувача – критичний аналіз джерел інформації, побудова енергетичних поверхонь).*

4. 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. *(Особистий внесок здобувача – побудова математичної моделі, перевірка її адекватності).*

5. 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.

6. 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. *(Особистий внесок здобувача – виконання експериментальних досліджень, участь в обробленні результатів досліджень).*

7. 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. *(Особистий внесок здобувача – участь у розробленні формули винаходу).*

8. Пат. 101525 Україна, МПК B01F 3/00, B01J 14/00, C02F 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. *(Особистий внесок здобувача – виконання експериментальних досліджень, участь у розробленні формули винаходу).*

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. *(Особистий внесок здобувача – виконання експериментальних досліджень, участь у написанні тез).*

10. 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. *(Особистий внесок здобувача – виконання експериментальних досліджень, побудова енергетичних поверхонь).*

11. 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. *(Особистий внесок здобувача – виконання експериментальних досліджень за ізотермічних та адіабатичних умов).*

12. 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. *(Особистий внесок здобувача – виконання сонохімічного аналізу спектрів частот).*

13. 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. *(Особистий внесок здобувача – дослідження впливу повітря на величину виділеної теплової енергії).*

14. 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. *(Особистий внесок здобувача – виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів).*

15. 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. (*Особистий внесок здобувача – виконання сонохімічних досліджень кавітації*).

### АНОТАЦІЯ

Сухацький Ю.В. Гідродинамічний кавітатор для кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2017.

У дисертації наведено результати досліджень, спрямованих на розроблення конструкції гідродинамічного струменевого кавітатора (ГДСК) і ефективного та енергоощадного процесу кавітаційно-флотаційного розділення водних гетерогенних середовищ. Досліджено вплив технологічного (тиск на вході у кавітатор) та конструктивних (діаметр сопла, кількість сопел, кут атаки струменів) параметрів ГДСК на величину теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації. На основі аналізу графічної інтерпретації 4-факторної мультиплікативної статистичної моделі ГДСК, побудованої з використанням методу Брандона, встановлено оптимальні умови кавітаційного оброблення водних середовищ.

Результати калориметричного методу дослідження ефективності розвитку кавітаційних полів підтверджено результатами сонохімічного аналізу розвитку кавітаційних явищ. З метою інтенсифікації кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації дисперсних твердих частинок запропоновано вводити у водні середовища перед кавітатором незначні кількості повітря (об’ємна витрата повітря –  $(1,5...9) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с). Встановлено закономірності утворення сполук окисного характеру (кисню, гідрогену пероксиду тощо) під час кавітації. Визначено зміну електрокінетичного потенціалу частинок дисперсної фази, оброблених у кавітаційних полях.

Здійснено апробацію розробленого кавітаційно-флотаційного процесу під час розділення водних гетерогенних середовищ: пульп сірчаної та лангбейнітової руди; суспензії, що утворюється під час регенерації відпрацьованого поглинального розчину у виробництві пігментного титану(IV) оксиду; рідких відходів шкіряних виробництв; суспензій каоліну та нерозчинного залишку. Розроблено конструкцію ГДСК, а також 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. Виконані узагальнені енергетичні та техніко-економічні розрахунки процесу кавітаційно-флотаційного збагачення сірчаної руди свідчать про його конкурентоспроможність.

**Ключові слова:** кавітація, флотація, процес розділення, гідродинамічний струменевий кавітатор, калориметрія, сонохімічний аналіз, водні гетерогенні середовища.



## АННОТАЦИЯ

Сухацкий Ю.В. Гидродинамический кавитатор для кавитационно-флотационного разделения водных гетерогенных сред. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный университет “Львівська політехніка”, Львов, 2017.

В диссертации приведены результаты исследований, направленных на разработку конструкции гидродинамического струйного кавитатора (ГДСК) и гибкого, эффективного и энергосберегающего процесса кавитационно-флотационного разделения водных гетерогенных сред. Графические зависимости изменения температуры обработанной воды от технологического (давление на входе в кавитатор) и конструктивных (диаметр сопла, количество сопел, угол атаки струй) параметров ГДСК использованы для построения в среде автоматизированного проектирования MathCad энергетических поверхностей, на основе которых и осуществляли анализ многофакторной зависимости величины тепловой энергии от вышеупомянутых параметров.

Для обеспечения эффективного режима кавитационной обработки водных сред осуществлено оптимизацию конструкции ГДСК на основе анализа графической интерпретации 4-факторной мультипликативной статистической модели, построенной с использованием метода Брандона и связывающей величину тепловой энергии, выделяющейся в результате кавитации, с технологическим (давление на входе в кавитатор) и конструктивными (диаметр сопла, количество сопел, угол атаки струй) параметрами. Максимальное значение энергетического ККД ГДСК составляет 90,71%. С использованием метода сонохимического анализа установлено разную структуру кавитационных полей, сформированных в генераторах различных типов. С целью интенсификации кавитационных явлений и сопутствующего им эффекта флотации дисперсных твердых частиц предложено вводить в водные среды незначительные количества воздуха (объемный расход воздуха –  $(1,5...9) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ), выполняющие роль зародышей кавитации.

Установлены закономерности кавитационного генерирования кислорода и других соединений окислительного характера, а также экстремальный характер изменения электрокинетического потенциала дисперсных частиц, обработанных в ГДСК, который свидетельствует об образовании на поверхности флотационных пузырьков “шламового покрытия” с очень мелких частиц дисперсной фазы, способных блокировать поверхность пузырьков и вызывать агрегацию частиц дисперсной фазы с их последующей седиментацией.

Высокая эффективность предложенного кавитационно-флотационного процесса подтверждена результатами его апробации при разделении водных гетерогенных сред: пульп серной и лангбейнитовой руд; суспензии, образующейся во время регенерации отработанного поглощающего раствора в производстве пигментного титана(IV) оксида; жидких отходов кожевенных производств; суспензий каолина и нерастворимого остатка.

Разработана конструкция ГДСК, а также технологические схемы процессов: кавитационно-флотационного обогащения серной руды; кавитационно-

флотационного разделения суспензии, образующейся во время регенерации отработанного поглощающего раствора в производстве пигментного титана(IV) оксида; растворения лангбейнитовой руды и флотации нерастворимого остатка. Выполнены обобщенные энергетические и технико-экономические расчеты процесса кавитационно-флотационного обогащения серной руды свидетельствуют о его конкурентоспособности.

**Ключевые слова:** кавитация, флотация, процесс разделения, гидродинамический струйный кавитатор, калориметрия, сонохимический анализ, водные гетерогенные среды.

### SUMMARY

Sukhatskiy Yu.V. Hydrodynamic cavitator for cavitation and flotation separation of water heterogeneous environments. – On the rights of manuscript.

The thesis for PhD degree (technical sciences), specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2017.

The thesis presents the results of research, that aimed at development of hydrodynamic jet cavitator (HDJC) design and effective energy-efficient process of cavitation and flotation separation of water heterogeneous environments. Was investigated the influence of technology (inlet pressure in cavitator) and structural (diameter of nozzle, the number of nozzles, angle of jets attack) parameters of the HDJC by the amount of heat, that released due to cavitation. Based on the analysis graphic interpretation of 4-factor multiplicative statistical model of HDJC, that constructed using the method Brandon, were found optimal conditions for cavitation processing of aquatic environments.

The results of calorimetric method of study of cavitation fields effectiveness were confirmed by soundchemical analysis of cavitation. In order to intensify the cavitation effect and accompanying flotation of dispersed solid particles was proposed adding a small amount of air (volumetric air flow –  $(1,5...9) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ) into the aquatic environments before cavitator. The regularities of formation of oxidative character compounds (oxygen, hydrogen peroxide, etc.) during cavitation was established. The changes of electrokinetic potential of the dispersed phase processed in the cavitation fields were identified.

Approbation of the developed cavitation and flotation process during separation of water heterogeneous environments: pulps of sulfuric and langbeynit ores; suspension, that was formed during the regeneration of spent absorbent solution in the production of pigmentary titanium(IV) oxide; liquid waste of leather manufactures; kaolin and of insoluble residue suspensions was made. The design of HDJC and technological schemes of processes: cavitation and flotation enrichment of sulfuric ore; cavitation and flotation separation suspension, that was formed during the regeneration of spent absorbent solution in the production of pigmentary titanium(IV) oxide; dissolving of the langbeynit ore and flotation of the insoluble residue was developed. Executed generalized energy and technical-economic calculations of cavitation and flotation process of enrichment of sulfuric ore demonstrate its competitiveness.

**Keywords:** cavitation, flotation, separation process, hydrodynamic jet cavitator, calorimetry, soundchemical analysis, water heterogeneous environments.