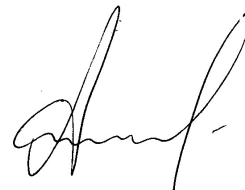


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Шкоп Андрій Олександрович



УДК 622.793 : 648.326

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ ШЛАМОВИХ ВОД З
ПОЛІДИСПЕРСНОЮ ТВЕРДОЮ ФАЗОЮ В ОСАДЖУВАЛЬНИХ
ЦЕНТРИФУГАХ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2017

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Цейтлін Мусій Абрамович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри хімічної техніки та
промислової екології.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Атаманюк Володимир Михайлович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри хімічної інженерії.

доктор технічних наук, доцент
Ляпощенко Олександр Олександрович
Сумський державний університет,
доцент кафедри процеси та обладнання хімічних
і нафтопереробних виробництв.

Захист дисертації відбудеться «16» червня 2017 року об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. Ц, ауд. 204.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий «11» травня 2017 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради К 55.051.04



Гурець Л. Л.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Внаслідок інтенсивної промислової діяльності на багатьох підприємствах хімічної галузі України утворилася величезна кількість рідких відходів, які протягом тривалого часу складаються у відкритих шламо-накопичувачах. Особливе місце займають накопичувачі рідких відходів хімічної промисловості, видобування та збагачення корисних копалин, шламів газоочищення металургійних заводів та інші. В окремих галузях промисловості накопичено величезну кількість промислових відходів і питання щодо їх утилізації перетворилися на серйозні економічні і екологічні проблеми.

Сучасними напрямками інтенсифікації процесів очищення стічних вод є вдосконалення існуючих технологій і розробка нових ефективних методів очищення, впровадження ресурсозберігаючих маловідходних технологій, модернізація існуючих методів і конструкцій водоочисних апаратів, що дозволять заощадити матеріальні і природні ресурси, а також утилізувати цінні компоненти шламових відходів.

Тверда частка шламів хімічної, металургійної, гірничодобувної, вугільної промисловості часто є цінною мінеральною сировиною, а рідка фаза – використовується у замкнутій системі оборотного водопостачання, заощаджуючи чисту воду. Багатьма країнами, включаючи Україну, вже розроблено, а в ряді випадків, і впроваджено, локальні системи очищення хімічно забруднених стічних вод з метою створення замкнутої системи водно-шламового господарства. Проте, досі існує низка невирішених питань з проблеми розділення полідисперсних суспензій та подальшого зниження вологості шламу. Важливу роль відводиться створенню нового типу зневоднюючого устаткування, що за техніко-економічними показниками значно перевершує існуючі, науково-обґрунтованому вибору методів інтенсифікації процесів розділення полідисперсних суспензій за рахунок агрегації часток та підбору якнайкращих параметрів здійснення процесу флокулоутворення з мінімальною витратою дорогих хімічних реагентів.

Вирішення цих наукових задач дозволить підвищити ефективність зневоднення шламу і, разом з тим, поліпшити техніко-економічні показники процесу відділення вологи від шламу та утилізації твердої фази відходів.

Таким чином, дослідження, які спрямовані на підвищення ступеню розділення полідисперсних суспензій шламових відходів за рахунок інтенсифікації процесу агрегації твердих часток, підвищення стійкості агрегатів-флокул у полі гравітаційних та відцентрових сил, а також удосконалення конструкції осаджувальної центрифуги є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у відповідності до наукового напрямку кафедри хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХПІ» в рамках державної НДР МОН України «Визначити можливість підвищення ступеню розділення тонкодисперсних суспензій за рахунок удосконалення конструкції осаджувальної центрифуги» (№ держреєстрації 0116U000965).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження закономірностей і вибір раціональних режимів процесу зневоднення полідисперсних шламових вод різних виробництв в осаджувальних шнекових центрифугах з використанням хімічного посилення флокулянтами агрегатоутворення полідисперсних шламів.

Для досягнення мети в роботі вирішені наступні завдання:

- проаналізовані існуючі методи зневоднення полідисперсних шламів хімічної технології і конструкції вживаних для цього осаджувальних центрифуг;
- досліджені особливості процесу флокуляції полідисперсних шламів;
- виявлені чинники та їх вплив на ефективність процесу флокуляції шламу і стійкість утворених флокул під час розділення суспензії на фази в устаткуванні, що згущує і зневоднює;
- досліджена структура агрегатів флокул в різних режимах осадження і визначені можливості направленої зміни їх стійкості в умовах механічних впливів;
- розроблені рекомендації щодо удосконалення апаратного оформлення процесу флокуляції і зневоднення високодисперсних суспензій.

Об'єктом дослідження є процес розділення шламових вод з полідисперсною твердою фазою в осаджувальній шнековій центрифугі.

Предмет досліджень – закономірності утворення флокул та визначення умов забезпечення їх стійкості в різних режимах осадження.

Методи досліджень базуються на використанні фізичного та математичного моделювання досліджуваних процесів. Обробка експериментальних даних здійснювалась методами математичної статистики. Визначення складу та властивостей речовин, які використовувались при дослідженнях, за допомогою об'ємних і вагових методів хімічного аналізу та фізико-хімічних методів дослідження за стандартними методиками. Математичне моделювання здійснювалося на підставі класичних положень механіки рідини і технічної гідромеханіки.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше запропоновано критерій утворення міцних агрегатів в процесі флокуляції, яким є залишкова швидкість осадження флокул після механічного впливу, а також запропонована методика оцінки цього критерію;
- вперше досліджено закономірності впливу концентрації і дисперсного складу полідисперсних шламів на збереження міцності флокул після механічного впливу;
- вперше встановлено оптимальні значення критерію утворення міцних агрегатів при постійній витраті флокулянта;
- вперше встановлено вплив ступеня згущення шламу на величину критерію утворення міцних агрегатів.
- знайшли подальший розвиток уявлення про механізм флокуляції і можливості інтенсифікації процесу зневоднення полідисперсних суспензій.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методика оцінки ефективності флокуляції, що заснована на критерії утворення міцних агрегатів в процесі флокуляції. Одержані математичні залежності критерію утворення

міцних агрегатів від початкової концентрації і дисперсності шламових суспензій, які дозволяють прогнозувати ефективність процесу зневоднення в центрифугі. Розроблені рекомендації з корегування складу шламу перед введенням флокулянта, як за концентрацією, так і за гранулометричним складом. Вдосконалено конструкцію осаджувальної центрифуги, в якій знижується гідромеханічний руйнівний вплив на отримані флокули.

Результати роботи, отримані закономірності та модернізоване устаткування, впроваджені в наступних організаціях: ДУ «Науково-дослідний і проектний інститут основної хімії» (акт впровадження від 25.11.2016 р.) в процес проектування технологічних установок з утилізації рідких і твердих відходів содового виробництва; ТОВ «Науково-технічний центр «Екомаш» (акт впровадження від 17.01.2017 р.) при проектуванні технологічних установок з утилізації рідких і твердих відходів металургійного виробництва; приватному підприємстві «Науково-виробнича фірма «Добробут» (акт впровадження від 02.02.2017 р.) для зневоднення гуматних добрив. Результати виконаних досліджень впроваджено в навчальний процес при викладанні спеціальних дисциплін, курсовому та дипломному проектуванні за спеціальностями 101 «Екологія» та 133 «Галузеве машинобудування» на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХП» (акт впровадження від 26.01.2017 р.).

Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні і розробці критерію утворення міцних агрегатів для відцентрового зневоднення полідисперсних суспензій, розробці методики експериментальних досліджень, виконанні експериментів, обробці експериментальних даних, отриманні математичних моделей для опису процесу зневоднення полідисперсних суспензій в осаджувальній центрифугі, розробці рекомендацій для модернізації центрифуги. Всі основні положення дисертаційної роботи, які винесені на захист, розроблені здобувачем особисто.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на: Міжнародних наукових читаннях «Информационно-вычислительные технологии и математическое моделирование в решении задач строительства, техники, управления и образования» (10-14 грудня 2013 р., м. Пенза, Росія); Міжнародній науково-практичній конференції «Прогрессивные технологии и оборудование для очистки сточных вод» (1-4 жовтня 2013 р., м. Ялта); 4-му Міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (21-23 вересня 2016 р., м. Львів); XVI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (5-7 жовтня 2016 р., м. Одеса); XXI Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції січень 2017 р., м. Переяслав-Хмельницький).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 10 статей, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях з переліку МОН України (2 статті, у виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus) та 3 статті – у рецензованих міжнародних закордонних журналах, 5 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій і 2 патенти на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 136 сторінок, 41 рисунок за текстом, 2 таблиці за текстом, 4 додатки на 4 сторінках, список використаних літературних джерел зі 143 найменувань на 18 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність виконання досліджень, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

В **першому розділі** наведено аналіз літературних джерел щодо принципів і методів зневоднення полідисперсних шламів різних хімічних виробництв. Визначено, що традиційна схема очищення полідисперсних шламів та стічних вод передбачає процес освітлення води і зневоднення шламу. Остання стадія проводиться за стандартною схемою: змішення шламу з флокулянтном → освітлення (згущування шламу) в радіальному або тонкошаровому відстійнику → зневоднення осаду центрифугуванням або фільтруванням. У той же час з'ясувалось, що у літературі відсутні чіткі рекомендації з інтенсифікації очищення полідисперсних суспензій та шламів.

Аналіз теорії і практики зневоднення дрібнодисперсних (глинистих і мулових) шламів, у тому числі з використанням флокулянтів, дозволив виявити особливості процесу та визначити задачі подальшого вивчення та дослідження.

В **другому розділі** викладено загальну методику дослідження, описано експериментальну установку, модельні системи суспензій і методики проведення експериментів з дослідження гідромеханічних процесів при центрифугуванні шламів. Дослідження проводились в промислових та лабораторних умовах.

Для виявлення закономірностей процесу утворення міцних агрегатів і умов, що впливають на процес зневоднення шламів, дослідження флокуляції проводили в лабораторних умовах на модельних суспензіях, синтезованих наступним чином. З шламу одного з діючих підприємств готували зразки із вмістом твердої фази від 3 до 100 г/дм³ і додавали клас твердої фази розміром 40-100 мкм в кількості від 0 до 30 %.

Клас більше 100 мкм не був цікавим для подальших досліджень, оскільки такі частинки ефективно осідають без застосування флокулянтів.

Вимірювання кінетики осадження флокул в режимі нестисненого осадження проводилися в лабораторному мірному циліндрі діаметром 50 мм і заввишки 500 мм.

Для оцінки механічної міцності агрегатів використовували наступний технологічний тест. Після завершення осадження флокул і вимірювання швидкості осадження повторно перемішували пробу мішалкою зі швидкістю на кінці лопаті 2 м/с. Після чого знов вимірювали швидкість осадження. Знайдену таким чином величину названо «залишковою швидкістю осадження».

Перед безпосереднім проведенням експериментів були підібрані типи флокулянтів і їх концентрація.

Дослідження якості зневоднення полідисперсних шламів у заводських умовах на шламах діючих підприємств проводилася на Модулі БФЯІ 3400.00.00.000 ТОВ «НТЦ «Екомаш». При промислових випробуваннях з очищення полідисперсних шламових вод різного походження (шлами металургійних заводів і шлами вуглезбагачення) визначався вплив параметрів роботи устаткування на ефективність очищення шламів.

При роботі Модуля очищення від завислих речовин, проводилася за рахунок відстоювання в тонкошаровому відстійнику. Інтенсифікація процесів осадження завислих речовин у відстійнику здійснювалася за рахунок застосування флокулянтів і попередньої підготовки шламових вод за концентрацією речовин. Згущений продукт тонкошарового відстійника зневоднювався в осаджувальній центрифугі.

На першому етапі промислових випробувань визначалася ефективність очищення шламових вод у полі відцентрових сил за наступною методикою. На очищення до центрифуги подавали заздалегідь сфлокульований шлам різного походження і гранулометричного складу. Періодично відбирали проби фугату і вимірювали швидкість осадження.

Під час досліджень визначалася залишкова швидкість осадження флокул перед центрифугуванням після первинного згущування в тонкошаровому відстійнику. Для цього після тонкошарового згущувача перед центрифугою через спеціально відведений кран відбирали пробу згущеного шламу, відразу переливали в мірні циліндри і заміряли залишкову швидкість осадження флокул. За результатами робили висновки про властивості згущеного шламу, ефективність видалення твердої фази та зневоднення суспензії.

На другому етапі проводилися промислові дослідження по підборі якнайкращих параметрів проведення процесу очищення шламових вод. З цією метою змінювали умови застосування флокулянта, корегували початкову концентрацію і гранулометричний склад твердої фази шламу, впливали мішалкою на шлам до флокуляції і т.п. Для цього реальні виробничі шлами доводили до певних концентрацій розбавленням, додавали клас твердої фази більше 40 мкм введенням піску або змішенням шламів з різним гранулометричним складом, змінювали дозування флокулянта.

У **третьому розділі** представлено результати експериментальних досліджень.

Результати зневоднення сфлокульованих полідисперсних шламових вод різного походження в промислових умовах представлені на рис. 1. Із графіка видно, що достатньо висока ефективність зневоднення шламових вод в центрифугі досягається при значенні залишкової швидкості більше 2 мм/с. Вказана величина залишкової швидкості осадження показує високу міцність флокул для всіх типів досліджених шламових вод незалежно від дисперсності і походження, а також обумовлює ефективне зневоднення шламових вод в центрифугі з отриманням найбільш чистого фугату. Тому залишкова швидкість осадження флокул перед центрифугою була прийнята, як критерій утворення міцних агрегатів.

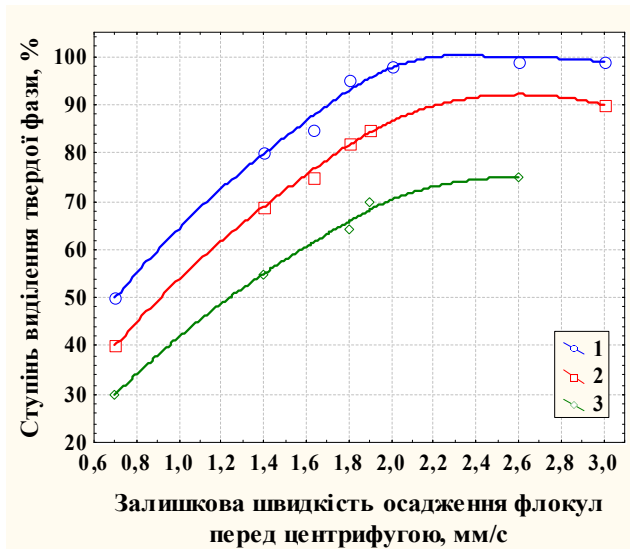


Рисунок 1 – Залежність ефективності зневоднення шламів після згущування у відстійнику від швидкості осадження флокул перед центрифугою: 1 – шлами вуглезбагачувальних фабрик; 2 – шлами мокрого газоочищення металургійного виробництва; 3 – шлами феросплавного цеху

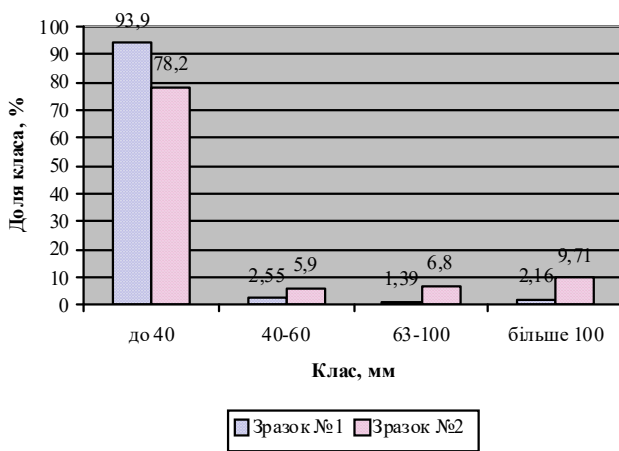


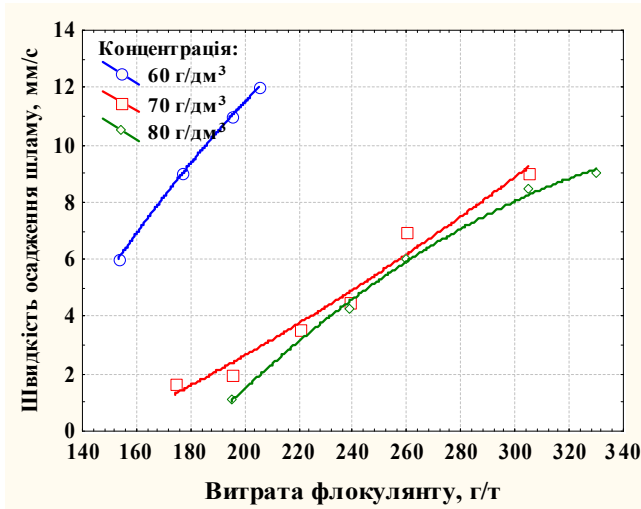
Рисунок 2 – Гранулометричний склад твердої фази зразків №1 та №2

вою швидкістю осадження витрата флокулянта для зразків №1 і №2 відрізняється в 2,5 – 3 рази, при цьому, частка класу більше 40 мкм в зразках шламу відрізняється всього на 15 %.

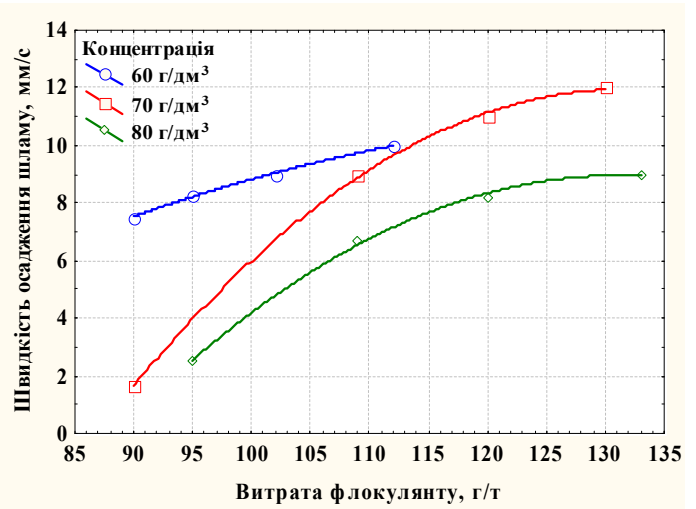
На першому етапі досліджень оцінка впливу дисперсного складу і концентрації твердої фази в шламових водах на витрату флокулянта і швидкість осадження проводилася на суспензіях існуючого виробництва з концентрацією 60, 70 і 80 г/дм³ твердої фази. Гранулометричний склад твердої фази зразків наведено на рис. 2. Зразок №1 більш ніж на 93 % складався з дрібнодисперсних частинок твердої фази класу менше 40 мкм. Зразок шламу №2 містив 22 % частинок твердої фази розміром більше 40 мкм і 78% класу менше 40 мкм.

На рис. 3 показана залежність швидкості осадження від витрати флокулянта. Було виявлено, що із зростанням витрати флокулянта зростає швидкість осадження флокул, що говорить про їх укрупнення. В той же час, виявилася чітка залежність витрати флокулянта від концентрації і дисперсного складу твердої фази.

Зі зростанням частки класу розміром більше 40 мкм спостерігається менша витрата флокулянта, ніж для осадження суспензії з тією ж швидкістю, такої ж концентрації, що містить меншу частку класу 40 мкм. Аналіз даних, представлених на рис. 3, показує, що для утворення флокул з однако-



а – Зразок шламів №1



б – Зразок шламів №2

Рисунок 3 – Залежність швидкості осадження флокул від витрати флокулянта при концентраціях твердої фази 60, 70 і 80 г/дм³ для зразків шламів №1 та №2

Результати досліджень впливу умов введення і співвідношення флокулянтів на міцність утворених агрегатів показані на рис. 4. Для модельного шламів даного виробництва з концентрацією твердої фази 30 г/дм³ та часткою класу більше 40 мкм 15% найбільш ефективним є поєднання неіоногенного і аніонного флокулянтів в співвідношенні 20:80. Критерієм вибору типів флокулянтів і їх співвідношення є найбільша швидкість осадження флокул до і після механічного впливу. Сумарна витрата флокулянта в кожному досліді була постійною і складала 200 г/т твердої фази.

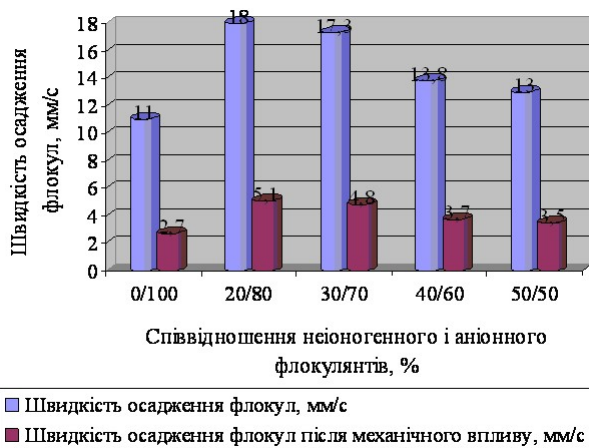


Рисунок 4 – Залежність швидкості осадження флокул від співвідношення неіоногенного і аніонного флокулянтів

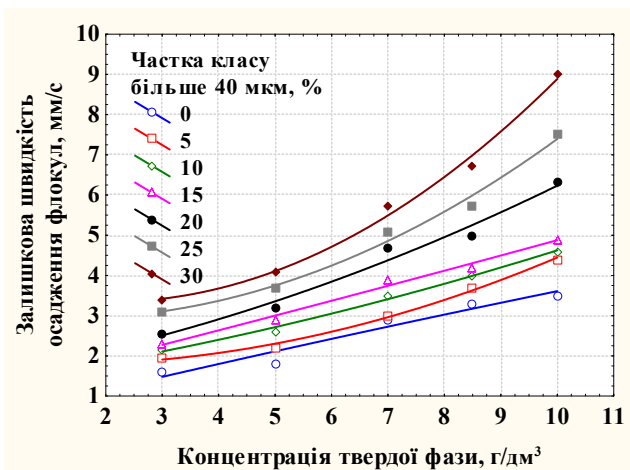


Рисунок 5 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації і дисперсності твердої фази

В результаті дослідження встановлена залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації і дисперсного складу твердої фази в пробі при однаковій витраті флокулянта. Такі дані для концентрації твердої фази в межах від 3 до 10 г/дм³ наведені на рис 5. При збільшенні концентрації твердої фази і вмісту частки класу більше 40 мкм спостерігається збільшення значення критерію.

На рис. 6 представлені результати для концентрації твердої фази в межах від 10 до 50 г/дм³. Зростання вмісту частки класу більше 40 мкм приводить до утворення міцніших флокуляційних структур при будь-яких концентраціях.

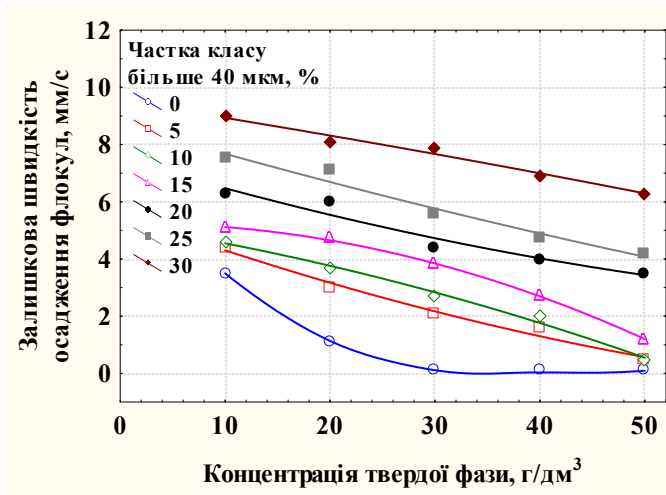


Рисунок 6 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації і дисперсності твердої фази

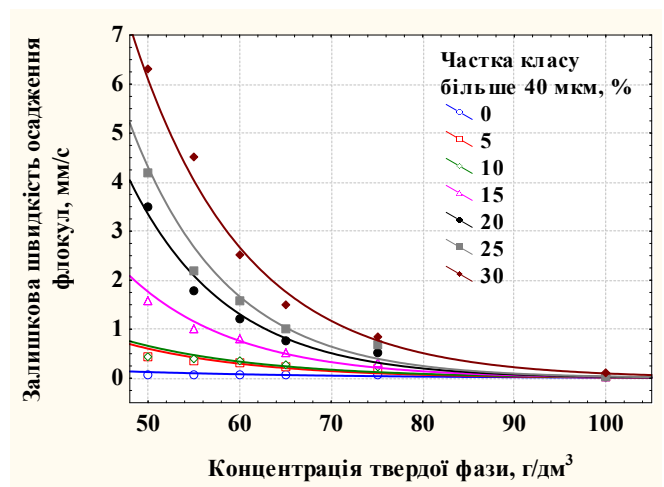


Рисунок 7 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації і дисперсності твердої фази

На рис. 7 представлені результати для концентрації твердої фази в межах від 50 до 100 г/дм³. При всіх варіантах вмісту частки класу більше 40 мкм спостерігається різке зниження швидкості в результаті руйнування флокул.

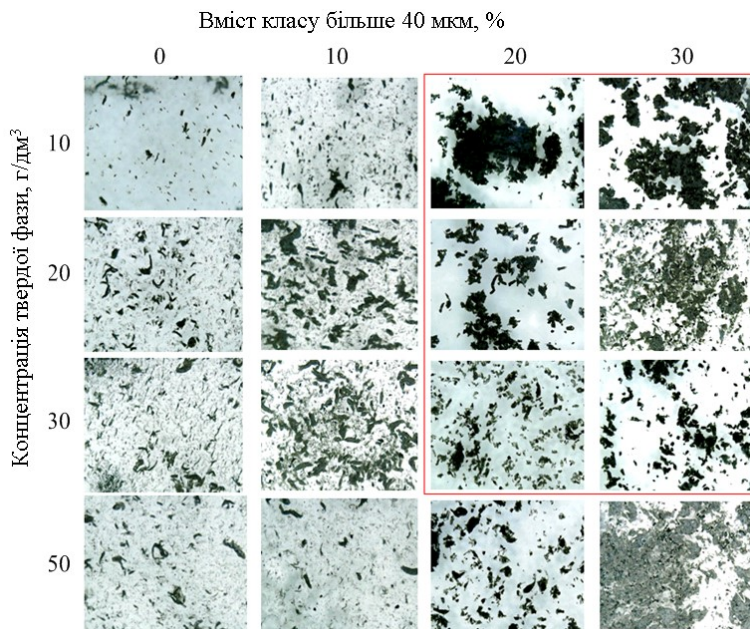


Рисунок 8 – Фотографії флокул після механічного впливу при різних концентраціях і дисперсності твердої фази

із зростанням концентрації твердої фази в початковому шламі зниження цієї швидкості більш яскраво виражене.

Це свідчить про утворення менш міцних агрегатів флокул при високих початкових концентраціях твердої фази в шлам і їх активнішому руйнуванні при

Фотографії на рис. 8 показують, що найбільш великі флокули з чіткими контурами і прозорою рідкою фазою утворюються при вмісті частки класу 40 мкм більше 15% і концентрації твердої фази в межах 10–30 г/дм³.

На рис. 9 наведено залежності залишкової швидкості осадження флокул від концентрації твердої фази у згущеному шлам. Як видно з цього рисунка, швидкість осадження флокул по мірі згущення падає, причому

механічному впливі у міру згущування та дозволяє рекомендувати згущувати даний тип шламу до концентрацій менше 140 – 150 г/дм³.

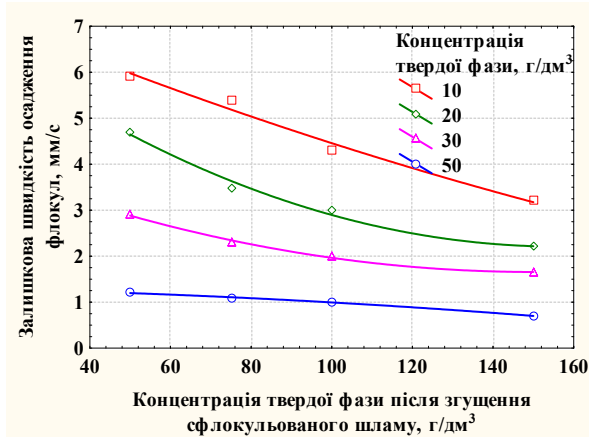


Рисунок 9 – Залежність залишкової швидкості осадження флокул від концентрації твердої фази у згущеному шламі

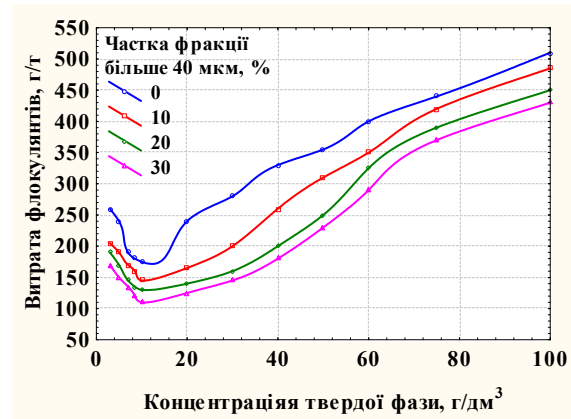


Рисунок 10 – Залежність сумарної витрати флокулянтів від концентрації і дисперсності твердої фази для критерію утворення міцних агрегатів $V_2 = 2$ мм/с

На рис. 10 наведено залежність сумарної витрати флокулянтів від концентрації твердої фази і вмісту часток розміром (класу) більше 40 мкм за умови досягнення значення критерію утворення міцних агрегатів (залишкової швидкості осадження) 2 мм/с, з якої видно наявність оптимуму, тобто складу шламу, за якого спостерігається мінімальна витрата флокулянта. Згідно рис. 10 мінімальна витрата флокулянта за умови досягнення критерію утворення міцних агрегатів 2 мм/с спостерігається при концентраціях твердої фази 7 – 30 г/дм³. Із зростанням вмісту класу більше 40 мкм витрата флокулянта зменшується.

Аналізуючи одержані дані, можна рекомендувати проведення флокуляції шламів при концентрації твердої фази близької до 10 г/дм³, що є оптимальним значенням, або в інтервалі концентрацій 7 – 30 г/дм³, тобто за умов, близьких до оптимальних. При даних концентраціях утворюються найбільш стійкі до механічних впливів флокули, які зберігають достатньо високу швидкість осадження.

Отримані дані дозволяють стверджувати, що надійним показником міцності утворених флокул може служити залишкова швидкість їх осадження після механічного впливу, яка, у свою чергу, відповідає розміру флокул і міцності зв'язку між частинками твердої фази.

Представляє практичний інтерес можливість корегування характеристик шламу для досягнення максимально сприятливих умов утворення міцних агрегатів флокул, що витікає з графіку на рис. 10. Наприклад, шляхом згущування або розбавлення шламу можна корегувати концентрацію твердої фази в межах значень 7 – 30 г/дм³. Другим шляхом інтенсифікації процесу утворення міцних агрегатів може бути додаткове внесення частинок шламу розміром від 40 до 100 мкм.

У четвертому розділі розглянуто результати математичної обробки експериментальних даних, щодо залежності критерію утворення міцних агрегатів від факторів, що на нього впливають.

Позначимо знайдений нами критерій міцності флокул (залишкову швидкість осідання після механічного впливу), як V_2 мм/с. Залежність цього критерію від концентрації твердої фази та частки у ній класу більше 40 мкм, що експериментально досліджена у попередньому розділі, дозволяє прогнозувати значення критерію V_2 для заданого шламу, або розраховувати, як потрібно змінити концентрацію шламу, або його гранулометричний склад для досягнення необхідного значення критерію утворення міцних агрегатів. Найбільш цікавим для цього, як можна бачити з рис. 10, є інтервал концентрацій твердої фази у шламі 10 – 50 г/дм³.

Математична обробка експериментальних результатів методом регресійного аналізу дозволила отримати відносно просте рівняння для цього інтервалу.

$$V_2 = 2,98 - 0,0786 \cdot C_{\text{тф}} + 0,221 \cdot \gamma_{40+}, \quad (1)$$

де $C_{\text{тф}}$ – концентрація твердої фази, г/дм³; γ_{40+} – частка класу більше 40 мкм у твердій фазі.

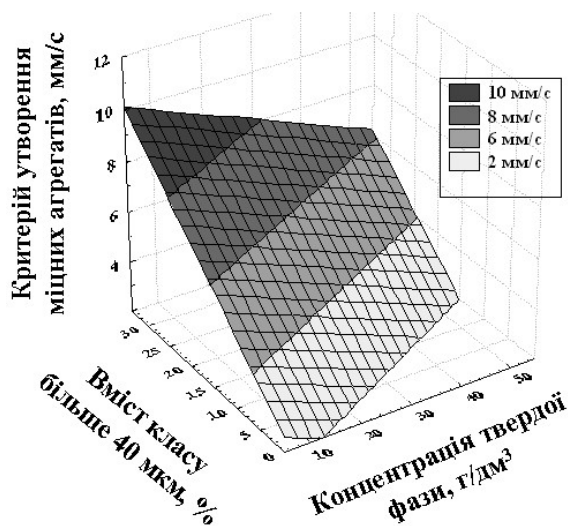


Рисунок 11 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів (V_2) після механічного впливу від дисперсності і концентрації твердої фази в шламі

Рівняння (1) адекватно відображає експериментальні дані за умов використання флокулянтів у сумарній кількості 200 г/т твердої фази. Середньоквадратична помилка (СКО) розрахунку V_2 дорівнює 0,17 мм/с.

Рівняння (1) дає змогу побудувати тривимірний графік залежності впливу дисперсності і концентрації твердої фази на міцність флокул, який для діапазону концентрацій твердої фази від 10 до 50 г/дм³ показано на рис. 11.

Отримане нами узагальнююче рівняння, що охоплює весь досліджений діапазон параметрів, які впливають на V_2 , значно складніше та, відповідно, менш точне. Але використовуючи його, можна розраховувати невідомі параметри (критерій утворення міцних агрегатів, необхідну концентрацію та дисперсний склад шламу), коли з технологічних причин неможливо працювати зі шламом, що має концентрацію твердої фази близькою до оптимальної.

$$\lg V_2 = 0,23 - 0,054 \lg C_{\text{тф}} + 0,70 (\lg C_{\text{тф}})^2 + 0,018 \gamma_{40+} \lg C_{\text{тф}}. \quad (2)$$

Середньоквадратична помилка рівняння (2) – 0,091.

Рівняння (2) дозволяє також побудувати тривимірний графік залежності критерію утворення міцних агрегатів від дисперсності і концентрації твердої

фази в шламi (рис. 12) в усьому дослідженому діапазонi параметрів, який дає більш повне уявлення про вигляд цієї залежності, ніж графіки на рис. 3 – 5.

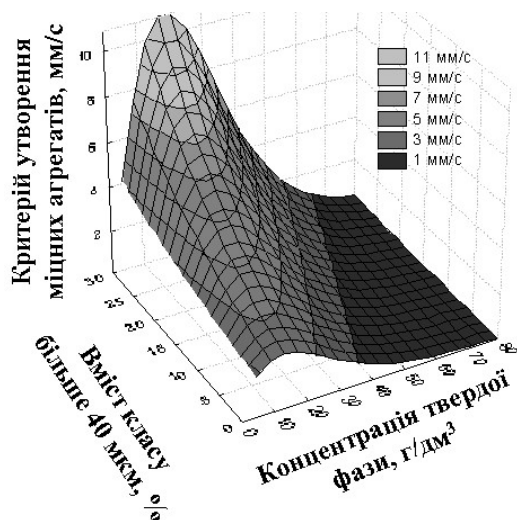


Рисунок 12 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів (V_2) після механічного впливу від дисперсності і концентрації твердої фази в шламi

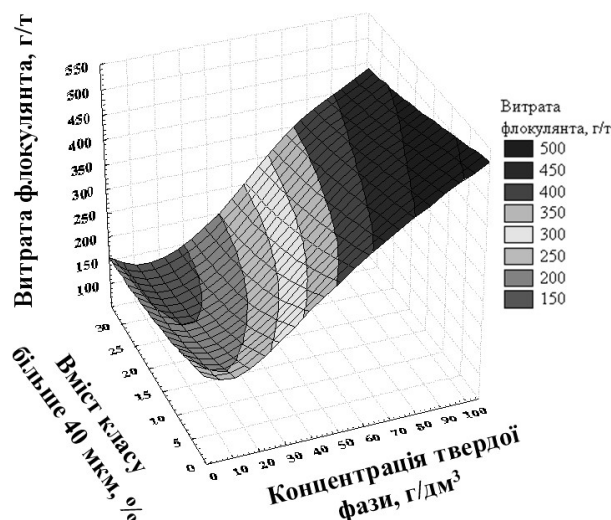


Рисунок 13 – Залежність витрати флокулянтів для досягнення критерію утворення міцних агрегатів, який дорівнює 2 мм/с ($V_2 = 2$ мм/с), від концентрації та дисперсності твердої фази.

На рис. 13 наведено залежність витрати флокулянтів ($C_{\text{флок}}$, г/т) для досягнення критерію утворення міцних агрегатів рівному 2 мм/с від концентрації та дисперсності твердої фази.

$$C_{\text{флок}} = 202 + 1,881C_{\text{тф}} - 4,88 \gamma_{40+} + 0,0161C_{\text{тф}}^2 - 0,0068C_{\text{тф}} \cdot \gamma_{40+} + 0,0646 \cdot \gamma_{40+}^2 \quad (3)$$

Середньоквадратична помилка рівняння (3) – 23 г/т.

Використовуючи узагальнююче рівняння (3) можна розраховувати концентрацію флокулянтів для досягнення $V_2 = 2$ мм/с, або концентрацію та дисперсність твердої фази при заданій концентрації флокулянта.

У **п'ятому розділі** представлена практична реалізація результатів дослідження у технологічній схемі зневоднення шламу та модернізованій конструкції центрифуги.

У центрифугах відбуваються процеси утворення і руйнування флокул в результаті руху. Істотний вплив на ці процеси здійснюють ефекти, що виникають при витіканні струменю шламу з труби живлення, розбризкуванні в барабані шнека і зіткненні струменю з рухомим потоком на поверхні суспензії у роторі. Виходячи із великою складністю щодо теоретичного опису цих процесів, єдиним шляхом рішення такої задачі залишається експеримент.

Дослідження механічного впливу внутрішньороторних потоків на флокули проводили на центрифугах ОГШ-461 і ОГШ-311. Останню в ході експерименту модернізували. У центрифугах стандартної конструкції потік суспензії з труби живлення зустрічається з поверхнею барабана шнека практично під прямим кутом. При цьому на частину потоку шламу впливає зсувний градієнт швидкості.

В результаті цього, велика частина потоку піддається підвищеному механічному впливу.

Для перевірки можливості зниження механічного впливу на флокули, поперше, була змінена конструкція труби живлення таким чином, щоб дозволити шламу стікати по дотичній до поверхні барабана у напрямі його руху (рис. 14а). По-друге, барабан шнека центрифуги ОГШ-311 був обладнаний розгінною втулкою із направляючими трубками (рис. 14ба), які б забезпечували плавну подачу суспензії на поверхню суспензії у роторі.

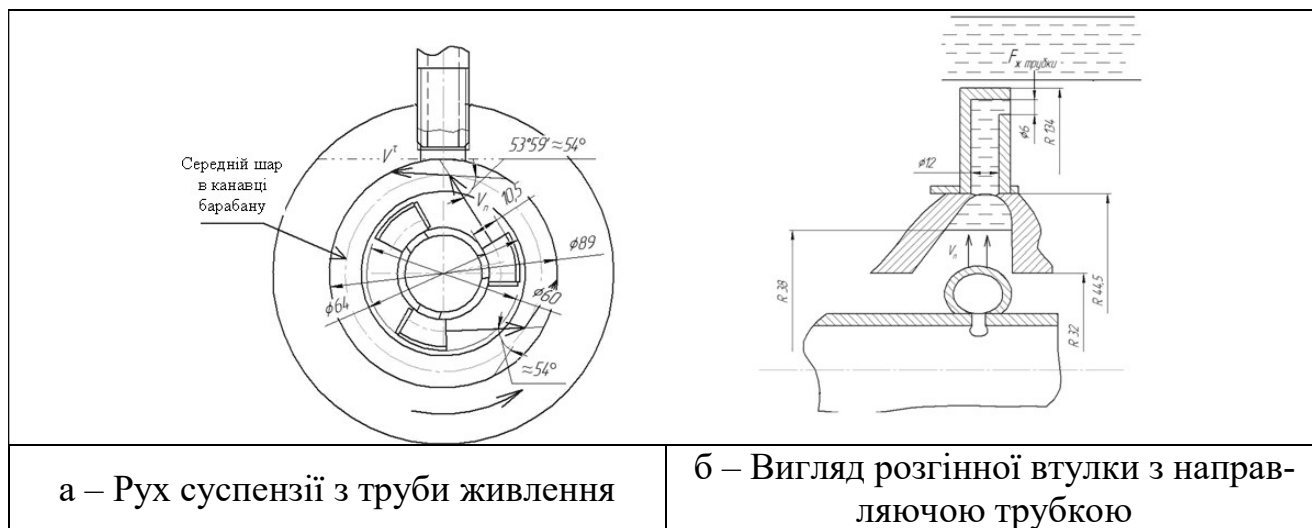
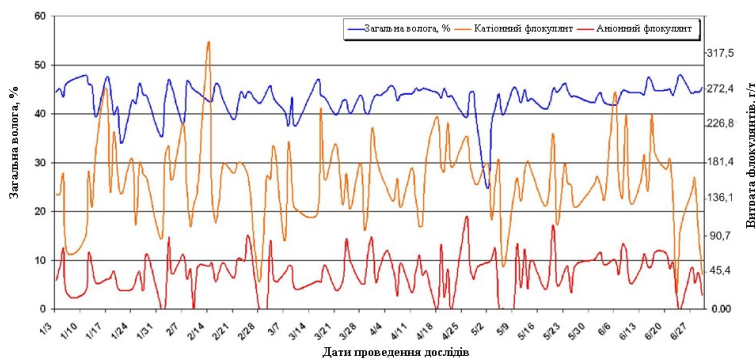


Рисунок 14 – Рух суспензії з труби живлення в канавку розгінного барабана шнеку.

В результаті експериментальних досліджень із застосуванням центрифугальної установки ОГШ-461 (без удосконалень) і ОГШ-311 (з розгінною втулкою) при різній частоті обертання ротора було встановлено, що вказані конструктивні зміни впливають на ефективність роботи центрифуг. Аналіз даних показує, що витрати енергії ротора на зневоднення 1 м³ шламу в центрифугі ОГШ-311 істотно нижче, ніж в центрифугі ОГШ-461 при однаковому факторі розділення. Це свідчить про зниження роботи, що витрачається, в центрифугі ОГШ-311 на подолання гідравлічного опору. В результаті цього знижується і механічний вплив на флокули.

Останнє припущення підтверджує порівняльний аналіз ефективності очищення шламу (частки твердої фази в осаді, від її наявності у шламі), який в центрифугальній установці вдосконаленої конструкції досягає 98-99 %, а залишкова вологість осаду – 30 %, у порівнянні з 45 % вологості при зневодненні аналогічних за складом шламів у США (рис. 15а). Зовнішній вигляд зневодненого шламу представлений на рис. 15б.



а – Результати зневоднення полідисперсних шламів на вуглезбагачувальній фабриці Rockspring (середня вологість осаду 45%)



б – Вигляд осаду центрифуги ОГШ 461Л-01 на промисловому майданчику (середня вологість 30%)

Рисунок 15 – Порівняльна характеристика ефективності зневоднення шламу

В той же час слід відзначити, що ефективність зневоднення на центрифугі без зміни конструкції труби живлення і розгінної втулки (навіть при залишковій швидкості осадження флокул 2 мм/с) незначно відрізняється від її ефективності без застосування флокулянта. Це свідчить про те, що утворені флокули практично повністю руйнуються в центрифугі стандартної конструкції за рахунок механічного впливу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу виявлення закономірностей і вибору раціональних режимів процесу зневоднення полідисперсних шламів вод різних виробництв в осаджувальних шнекових центрифугах з використанням хімічного посилення флокулянтами агрегатоутворення полідисперсних шламів. Внаслідок проведених досліджень зроблено наступні висновки:

1. У якості критерію утворення міцних агрегатів в процесі флокуляції, запропоновано використовувати залишкову швидкість осадження флокул після механічного впливу. Встановлено, що максимальна ефективність зневоднення в осаджувальній центрифугі досягається при значенні цього критерію більше 2 мм/с.

2. Досліджено вплив концентрації твердої фази і її дисперсного складу на утворення міцних агрегатів і ефективність зневоднення. Встановлено, що найміцніші до механічного впливу агрегати утворюються при концентрації твердої фази в шламі 7 – 30 г/дм³ і вмісті частки класу більше 40 мкм понад 10 %. За цих умов досягається максимальне значення критерію утворення міцних агрегатів при фіксованій витраті флокулянту або мінімальна витрата флокулянта при фіксованому значенні критерію утворення міцних агрегатів.

3. Досліджено вплив ступеню первинного згущення сфлокульованого шламу на міцність флокул. Встановлено, що із зростанням концентрації твердої

фази у згущеному шламi понад 140 – 150 г/дм³ суттєво зменшується мiцнiсть флокул пiд механiчним впливом.

4. Запропоновано конструктивнi змiни центрифуги, що дозволяють зменшити механiчний вплив на сфлокульований шлам. Проведенi випробування модернiзованої за цими рекомендацiями обладнання показали зменшення енерговитрат та пiдвищення ступеню зневоднення шламiв у порiвняннi з iснуючим устаткуванням.

5. Результати роботи, отриманi закономірностi та модернiзоване устаткування впровадженi в ДУ «Науково-дослiдний i проектний iнститут основної хiмiї» (м. Харкiв) в процес проектування технологiчних установок з утилізацiї рiдких i твердих вiдходiв содового виробництва. Наукова розробка впроваджена ТОВ «Науково-технiчний центр Екомаш» (м. Харкiв) при проектуваннi технологiчних установок з утилізацiї рiдких i твердих вiдходiв металургiйного виробництва. Приватне пiдприємство «Науково-виробнича фiрма «Добробут» (м. Олександрiя) впровадила центрифугу ОГШ 311К-111 для зневоднення гуматних добрив.

6. Результати виконаних дослiджень впроваджено в навчальний процес при викладаннi спеціальних дисциплiн, у курсовому та дипломному проектуваннi за спеціальностями 101 «Екологiя» та 133 «Галузеве машинобудування» на кафедрi хiмiчної технiки i промислової екологiї НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Шкоп А. А.** Обогащение угольного шлама на осадительных центрифугах / А.Ф. Мацак, А. Г. Трошин, А. А. Шкоп, А. В. Мишанина, Н. Г. Пономарева // Горная промышленность. – 2007. – № 2(71), – С. 42–48.

Здобувачем запропоновано спiсiб зневоднення вугiльного шламу у осаджувальнiй центрифугi.

2. **Шкоп А. А.** К обоснованию технологии обезвоживания мелкодисперсного угля / А.Ф. Мацак, А.Г. Трошин, А. А. Шкоп // Наукотехнiчний збiрник Нацiонального гiрничого унiверситету. – 2009. – Вип. 36-37, – С. 177-187.

Здобувачем запропоновано спiсiб зневоднення дрiбнодисперсної твердої фази з використанням осаджувальної центрифуги.

3. **Шкоп А. А.** Модуль очистки и обезвоживания высокодисперсных илов углеобогатительной фабрики / Г. П. Трошин, А. А. Шкоп, С. А. Савельев, Н. Г. Пономарева // Збагачення корисних копалин. Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 189-196.

Здобувачем розроблено технологiю зневоднення високодисперсних мулiв твердої фази з використанням осаджувальної центрифуги.

4. **Шкоп А. А.** Обезвоживание угольных полидисперсных суспензий / А. А. Шкоп // Схiдно-Європейський журнал передових технологiй. – 2015 – 2/6 (74), – С. 44–49.

Здобувачем проаналізовано особливості застосування осаджувального та фільтрувального устаткування та порівняно їх ефективність при зневодненні полідисперсних шламів.

5. **Шкоп А. А.** Технология очистки и обезвоживания высокодисперсных илов углеобогатительной фабрики / Г. П. Трошин, А. А. Шкоп, С. А. Савельев, Н. Г. Пономарева // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 2. – С. 74-78.

Здобувачем розроблено технологію очищення та зневоднення високодисперсних мулів.

6. **Шкоп А. А.** Исследование кинетики оседания твердой фазы полидисперсных суспензий / А. А. Шкоп, М. А. Цейтлін, А. В. Шестопапов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ «ХПІ» – 2016 – №4(1176), — С. 137-141.

Здобувачем досліджено кінетику осідання твердої фази полідисперсних суспензій та виявлено залежність швидкості осідання від концентрації та дисперсності твердої фази.

7. **Shkop A.** Exploring the ways to intensify the dewatering process of polydisperse suspensions / A. Shkop, M. Tseitlin, O. Shestopalov // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2016 – 2/6 (74), – С. 35–40.

Здобувачем досліджено залежність кінетики осідання сфлоккульованого модельного шламу з контрольованим складом до і після механічного впливу. Виявлено критерій міцності флокул.

8. **Shkop A.** A study of the flocculs strength of polydisperse of coal suspensions to mechanical influences / A. Shkop, M. Tseitlin, O. Shestopalov, V. Raiko // «EUREKA: Physics and Engineering». – 2017. – Number 1. – P. 13 – 20.

Здобувачем досліджено залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації та дисперсності фази. Розроблено методику оцінки цього критерію.

9. **Shkop A.** Study of the strength of flocculated structures of polydispersed coal suspensions / A. Shkop, M. Tseitlin, O. Shestopalov, V. Raiko // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017 – Number 1/10 (85), – С. 20–26.

Здобувачем досліджено закономірності утворення міцних агрегатів з урахуванням впливу концентрації твердої фази в суспензії, дисперсного складу твердої фази, типу та співвідношення флокулянтів, а також ступеня згушення шламу.

10. **Шкоп А. А.** Исследование путей снижения механического воздействия на флокулы в центрифуге / А. А. Шкоп, М. А. Цейтлін, А. В. Шестопапов, В. Ф. Райко // Технологический аудит и резервы производства. – 2017. – № 1/3 (33). – С. 39 – 45.

Здобувачем запропоновано удосконалену конструкцію центрифуги зі зменшеним механічним впливом на флокули. Оцінено технічні показники роботи осаджувальних центрифуг до і після модернізації їх конструкцій.

11. Пат. 83769 Україна, МПК В01D 21/00. Тонкошаровий відстійник / Г. П. Трошин, А. О. Шкоп, Н. Г. Пономарьова; заявник та патентовласник Г. П. Трошин, А. О. Шкоп, Н. Г. Пономарьова. – № u201304837; заявл. 16.04.2013; опубл. 25.09.2013, бюл. №18.

Здобувачем запропоновано конструкцію тонкошарового відстійника для згущення шламів перед їх зневодненням.

12. Пат. 106709 Україна, МПК В04В 3/00. Центрифуга для розділення суспензій. / Г. П. Трошин, А. О. Шкоп, Н. Г. Пономарьова; заявник та патентовласник Г. П. Трошин, А. О. Шкоп, Н. Г. Пономарьова. – № u201508601; заявл. 04.09.2015; опубл. 10.05.2016, бюл. №9/2016.

Здобувачем запропоновано модернізовану конструкцію центрифуги для зневоднення сфлоккульованих суспензій зі зниженим механічним впливом на флокули.

13. **Шкоп А. А.** Технология очистки и обезвоживания высокодисперсных илов углеобогатительной фабрики / А. А. Шкоп, Г. П. Трошин С. А. Савельев, Н. Г. Пономарева // Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные технологии и оборудование для очистки сточных вод», 1-4 октября 2013 г., Ялта: «Экотон». – С. 47 -50.

Здобувачем описана технологія зневоднення мулів та високодисперсних суспензій.

14. **Шкоп А. А.** Интенсификация технологии очистки и обезвоживания высокодисперсных илов углеобогатительной фабрики на основе АСУ ТП / Г. П. Трошин, А. А. Шкоп, С. А. Савельев, Н. Г. Пономарева //Сборник статей. Международные научные чтения «Информационно-вычислительные технологии и математическое моделирование в решении задач строительства, техники, управления и образования» (10 – 14 декабря). – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 63-68.

Здобувачем запропоновано спосіб інтенсифікації зневоднення високодисперсних суспензій в осаждувальних центрифугах шляхом контролювання та корегування параметрів процесу з використанням АСУ ТП.

15. **Шкоп А. О.** Шляхи підвищення ефективності очищення полідисперсних шламів / О.В.Шестопалов, А. О. Шкоп // Збірник матеріалів 4-го міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (21-23 вересня). – Львів: Національний ун-т «Львівська політехніка», 2016. – С. 154.

Здобувачем запропоновано шляхи інтенсифікації процесів видалення твердої фази полідисперсних шламів в процесі їх очищення.

16. **Шкоп А. О.** Шляхи інтенсифікації процесів зневоднення тонкодисперсних шламів / О. В. Шестопалов, А. О. Шкоп // Матеріали XVI Всеукраїнської наук.-технічн. конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» 5-7 жовтня. – Одеса: Національна академія харчових технологій, 2016. – С. 127.

Здобувачем запропоновано шляхи інтенсифікації процесів зневоднення шламів з високим вмістом тонко дисперсної фази.

17. **Шкоп А. А.** Исследование эффективности очистки полидисперсных шламов / А. А. Шкоп, А. В. Шестопапов // Актуальные научные исследования в современном мире: материалы XXI Междунар. науч.-практ. инт.-конф., январь 2017 г., Переяслав-Хмельницкий. Сб. науч. тр. – Переяслав-Хмельницкий, 2017. – Вып. 1 (21), ч. 3 – С. 143 -147.

Здобувачем проведено дослідження критерію утворення міцних агрегатів шламів різного походження та виявлено числове значення цього критерію для ефективної роботи осаджувальних центрифуг.

АНОТАЦІЇ

Шкоп А. О. Закономірності процесів розділення шламових вод з полідисперсною твердою фазою в осаджувальних центрифугах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено виявленню закономірностей процесів розділення шламових вод з полідисперсною твердою фазою в осаджувальних центрифугах. В роботі всебічно досліджено вплив концентрації і дисперсного складу на міцність флокул при механічному впливі.

Встановлено, що залишкова швидкість осадження флокул після механічного впливу при постійній витраті флокулянта має найбільше значення при концентрації твердої фази в шламів в інтервалі 7 – 30 г/дм³. Найкращі результати у всіх досліджах отримані при концентрації твердої фази, яка дорівнює 10 г/дм³. Виявлено, що при концентрації до 7 г/дм³ і понад 30 г/дм³ спостерігається утворення флокул, що володіють найменшою залишковою швидкістю після механічного впливу. Із зростанням вмісту частки твердої фази крупністю 40 – 100 мкм понад 15 % зростає міцність флокул, які зберігають свою форму і достатньо високу швидкість осадження навіть після механічних впливів. Одержані дані дозволяють рекомендувати коректування складу шламу перед введенням флокулянта як за концентрацією, близькою до оптимальної, так і за вмістом частки класу крупністю 40 – 100 мкм понад 15 %.

Показано, що із зростанням концентрації твердої фази у згущеному шламів понад 140 – 150 г/дм³ істотно зменшується міцність агрегатів до механічних впливів.

Ключові слова: флокуляція, полідисперсні шлами, агрегатоутворення, міцність флокул, залишкова швидкість осідання, ступінь згущення шламу

Шкоп А. А. Закономерности процессов разделения шламовых вод с полидисперсной твердой фазой в осадительных центрифугах. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Сумской государственной университет Министерства образования и науки Украины, Сумы, 2017.

Диссертационную работу посвящено выявлению закономерностей процессов разделения шламовых вод с полидисперсной твердой фазой в осадительных центрифугах. В работе всесторонне исследовано влияние концентрации и дисперсного состава на прочность флокул к механическим воздействиям.

Установлено, что остаточная скорость осаждения флокул после механического воздействия при постоянном расходе флокулянта имеет наибольшее значение при концентрации твердой фазы в шламе в интервале 7–30 г/дм³. Наилучшие результаты во всех опытах получены при концентрации твердой фазы, равной 10 г/дм³. Выявлено, что при концентрации до 7 г/дм³ и свыше 30 г/дм³ наблюдается образование флокул, обладающих наименьшей остаточной скоростью после механических воздействий. С ростом содержания доли твердой фазы крупностью 40–100 мкм свыше 15 % возрастает прочность флокул, которые сохраняют свою форму и достаточно высокую скорость осаждения даже после механических воздействий.

Разработаны рекомендации по выбору технологических параметров обезвоживания шламовых вод различных производств в осадительных шнековых центрифугах с использованием химического усиления флокулянтами агрегатобразования полидисперсных шламов. Полученные данные позволяют рекомендовать корректировку состава шлама перед вводом флокулянта как по концентрации, близкой к оптимальной, так и по содержанию доли класса крупностью 40–100 мкм свыше 15 %. Показано, что с ростом концентрации твердой фазы в сгущенном шламе свыше 140–150 г/дм³ существенно уменьшается прочность агрегатов к механическим воздействиям. Это позволяет рекомендовать сгущать шлам до заданной величины.

Предложены пути минимизации механических воздействий на сфлокулированный шлам в центрифуге. В частности, предложен способ модернизации конструкции центрифуги, заключающийся в том, что вдоль боковой поверхности трубы питания выполнены каналы, направленные тангенциально к боковой поверхности трубы питания таким образом, чтобы направление течения суспензии из каналов совпадало с направлением вращения ротора. В результате такой подачи только малая часть потока испытывает сдвиговые напряжения. Другим направлением, снижающим механические воздействия на флокулы является установка в барабане разгонной втулки с направляющими трубками, препятствующими разбрызгиванию суспензии. В результате этих рекомендаций разработана усовершенствованная конструкция осадительной центрифуги, обладающая при соблюдении оптимальных условий флокуляции высокой степенью удаления твердой фазы, возможностью получения осадка относительно низкой влажности, а также низким расходом энергии на процесс.

Ключевые слова: флокуляция, полидисперсные шламы, агрегатобразование, прочность флокул, остаточная скорость осаждения, степень сгущения шлама

Shkop A. A. Conformities to the law of division processes of slime waters with a polydispersed hard phase in decanting centrifuges. – Manuscript.

Thesis for the academic degree of the Candidate of Engineering Science in specialty 05.17.08 – processes and equipments of chemical technology. – Sumy State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2017.

The thesis is concerned with conformities to the law of processes of division of slime waters with a polydispersed hard phase in decanting centrifuges. The influence of concentration and dispersible composition on durability of floccules to mechanical influences was investigated in detail.

The effect of the concentration and disperse composition on the flocculation strength to mechanical influence is investigated. It is found that the residual rate of floccules sedimentation after the mechanical influence at a constant rate of flocculant has a maximum value at a concentration of solids in the slime in the range of 7–30 g/dm³. The best results are obtained in all the experiments at a solids concentration of 10 g/dm³. It is found that at a concentration up to 7 g/dm³ and more than 30 g/dm³, the floccules are formed. They have the lowest residual rate after mechanical influences. With increasing content of the solid fraction of 40 – 100 microns over 15%, the strength of floccules increases. They retain their shape and relatively high sedimentation rate even after mechanical influence. The obtained data allow recommending correction of the slime composition before flocculant injection both the concentration close to the optimum, and the content of size fraction of 40 – 100 microns more than 15%.

It was offered that with an increase in the degree of thickening of more than 140–150 g/dm³ the resistance of aggregates to mechanical influence substantially decreases.

Keywords: flocculation, polydispersed slimes, aggregate formation, strength of floccules, residual sedimentation rate, degree of slime thickening.

