

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник –
Цейтлін Мусій Абрамович,
доктор технічних наук, професор

Суми – 2017

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЩОДО ПРИНЦИПІВ ТА МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ШЛАМІВ.....	10
1.1 Загальна характеристика полідисперсних відходів хімічних виробництв	10
1.2 Способи зневоднення шламів та мулів	12
1.3 Шляхи інтенсифікація процесів зневоднення шламів та осаду	19
1.4 Сучасні проблеми теорії і практики процесів флокуляції	25
1.5 Обґрунтування обраного напрямку досліджень	34
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ШЛАМОВИХ ВОД З ПОЛІДИСПЕРСНОЮ ТВЕРДОЮ ФАЗОЮ	37
2.1 Методика лабораторних досліджень модельних шламів.....	37
2.1.1 Методики дослідження складу шламів.....	37
2.1.2 Приготування модельних шламів з контрольованими параметрами	38
2.1.3 Методика проведення досліджень швидкості осадження сфлокульованих полідисперсних шламів	38
2.1.4 Методика підбору флокулянтів	41
2.1.5 Дослідження умов найкращого первинного згущення сфлокульованого шламу у відстійнику	42
2.1.6 Методика дослідження сумарної витрати флокулянтів.....	42
2.2 Методика промислових досліджень.....	43
2.3 Методика обробки результатів експериментальних досліджень.....	48
Висновки до розділу 2	51
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ УТВОРЕННЯ МІЦНИХ АГРЕГАТІВ ФЛОКУЛ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ШЛАМОВИХ ВОД	53
3.1 Дослідження ступеня виділення твердої фази в промислових умовах	53
3.2 Результати дослідження кінетики осадження твердої фази реального (відібраного на підприємстві) шламу.....	55

	3
3.3 Результати дослідження процесу флокуляції полідисперсних шламів.....	62
3.4 Дослідження залишкової швидкості осідання флокул після механічного впливу.....	69
3.5 Результати дослідження впливу згущення шламу на міцність флокул	80
Висновки до розділу 3	83
РОЗДІЛ 4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ ШЛАМОВИХ ВОД З ПОЛІДИСПЕРСНОЮ ТВЕРДОЮ ФАЗОЮ	85
4.1 Основні завдання моделювання процесу для визначення оптимальних параметрів процесу зневоднення полідисперсних шламів.....	85
4.2 Залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації та дисперсності твердої фази.....	87
4.3 Залежність витрати флокулянтів від концентрації та дисперсності твердої фази.....	93
Висновки до розділу 4	96
РОЗДІЛ 5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ШЛАМІВ.....	97
5.1. Рекомендації щодо апаратурно-технологічного оформлення процесу....	97
5.2 Шляхи зниження механічного впливу на флокули в центрифугі та напрямки її удосконалення.....	100
Висновки до розділу 5	113
ВИСНОВКИ.....	114
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	116
ДОДАТКИ.....	133

ВСТУП

Актуальність теми. Внаслідок інтенсивної промислової діяльності на багатьох підприємствах хімічної галузі України утворилася величезна кількість рідких відходів, які протягом тривалого часу складаються у відкритих шламонакопичувачах. 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. Так, наприклад, обсяг стічних вод, які скидаються підприємствами чорної і кольорової металургії та підприємствами машинобудування України, сягає 500 млн. м³/рік [1], а коксохімічними підприємствами близько 20 млн. м³/рік.

Переповнення шламосховищ і складності відведення під них нових величезних площ земельних угідь призвели до екологічно небезпечної тенденції збільшення місткостей за рахунок нарощування гребель. При цьому збільшення гідростатичного тиску сприяє фільтрації забруднених вод в підземні водоносні горизонти і, як наслідок, перетіканню в поверхневі водоймища, розвиненню процесів підтоплення населених пунктів і сільськогосподарських угідь. Випаровування рідкої фази шламів та вивітрювання пилових часток з поверхні шламосховищ призводить до забруднення атмосфери та прилеглих територій.

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 дозволяють 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. [2]. Проте досі існує низка невирішених питань з проблеми розділення полідисперсних суспензій та подальшого зниження вологості шламу. Важлива роль відводиться, як створенню нового типу зневоднюючого устаткування, що за техніко-економічними показниками значно перевершує існуюче, так і 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» (номер 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 апаратурного 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 проєктний інститут основної хімії» (акт впровадження від 25.11.2016 р.) в процес проєктування технологічних установок з утилізації рідких і твердих відходів содового виробництва; ТОВ «Науково-технічний центр «Екомаш» (акт впровадження від 17.01.2017 р.) при проєктуванні 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 «ХПІ» (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 «Прогресивные 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), а також на наукових семінарах кафедри хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХПІ» та кафедри прикладної екології Сумського державного університету.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 17 наукових праць, у т. ч. 10 статей, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях з переліку МОН України (2 статті індексуються міжнародною наукометричною ба-

зою даних Scopus) та 3 статті – у рецензованих міжнародних закордонних журналах; 5 тез доповідей конференцій, отримано 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 з 143 найменувань на 18 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЩОДО ПРИНЦИПІВ ТА МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ШЛАМІВ

1.1 Загальна характеристика полідисперсних відходів хімічних виробництв

Виробнича діяльність з видобування та збагачення природної сировини (руди, вугілля та ін.) і подальша її переробка (отримання коксу, чавуну, сталі, кольорових металів і т.д.) супроводжуються утворенням значних кількостей техногенних відходів, зокрема в рідкому вигляді в шламонакопичувачах. Шламосховища можна класифікувати за видом збагаченню природної сировини (вугільні або рудні) і за станом поверхні (повністю покрите водою, частково обводнене, вологе і сухе) [3]. Найчастіше діючі шламосховища за станом поверхні є змішаними, що обумовлено технологією намівання шламів, особливістю відкладання частинок за фракціями і природною будовою дна заповнюваної місткості (балки).

Зі всього різноманіття функціонального використання водних ресурсів в промислових технологіях найбільша кількість використовується як охолоджувач (50 – 70%), розчинник (15 – 20%) та в якості транспортуючого агента (15 – 25%).

Так, наприклад, при виробництві сталі стічні води утворюються після охолодження сталеплавильних конверторів і після мокрого очищення газів. Середня концентрація завислих речовин складає 3 г/дм³, максимальна – 17 г/дм³. В цілях повторного використання стічних вод на газоочистці їх необхідно освітлювати до залишкового вмісту завислих частинок 150 – 200 мг/дм³ [4, 5].

Видобування і переробка руд неминуче призводить до утворення відходів збагачення, складування яких здійснюється в шламо- і хвостоховищах. Тільки 10 – 20 % із видобутої руди поступає в концентрат, решта – це відходи [6].

Шахтні води утворюються в результаті фільтрації підземних і поверхневих вод в підземні гірські вироблення. Всі шахтні води забруднені завислими речовинами і бактеріями. Завислі речовини в шахтних водах представлені вугільними і порідними частинками, речовинний склад яких відповідає складу викопного вугілля і породи [7]. Зольність суспензії змінюється від 20 до 80%, причому із зменшенням розмірів частинок вона збільшується у зв'язку з тим, що найбільш тонкі суспензії представлені глинистими частинками.

Загалом шламіві води більшості підприємств хімічної галузі є гетерогенними системами з полідисперсним складом твердої фази різної природи і являють собою неоднорідні багатоконпонентні механічні суміші з різними фізико-механічними властивостями. Гранулометричний склад шламів в більшості випадків дещо змінюється за часом і залежить від його походження і технологічного процесу. Це створює певну складність при дослідженні процесів осідання та зневоднення шламів (розділення дисперсних систем на фази), оскільки частинки твердої речовини у складі гідросуміші відрізняються за розмірами, щільністю, формою, а при їх переміщенні в рідкому середовищі вирішальний вплив здійснює ефективна в'язкість, коефіцієнти опору і дифузії помітно змінюють свої числові значення при збільшенні вмісту твердої фази в даних середовищах [8].

Завислі частинки в стічних водах та шламах можуть розрізнятися за розмірами в дуже широких межах, можливі діаметри частинок в суспензіях складають від 10^{-1} мкм до 10^{-4} м. Для частинок розміром менше 10 мкм кінцева швидкість осідання менше 10^{-2} см/с. У технології очищення води ступінь дисперсності завислих частинок прийнято характеризувати так званою гідравлічною крупністю, тобто швидкістю вільного осідання частинок суспензії в нерухомій воді, що має температуру 10°C [9]:

$$V_{ГК} = \sqrt{\frac{4(\rho_m - \rho_p)gd}{3\rho_p C_m}}, \quad (1.1)$$

де $V_{ГК}$ – гідравлічна крупність частинки, м/с;

ρ_m – густина твердої частинки, кг/м³;

ρ_p – густина рідини, кг/м³;

C_m – коефіцієнт опору тиску;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

d – еквівалентний діаметр частинки, м.

Так гідравлічна крупність піску діаметром 0,1-1 мм коливається в межах $6,9 \cdot 10^{-3}$ – $100 \cdot 10^{-3}$ м/с, мулу діаметром 0,01 – 0,05 мм – $0,7 \cdot 10^{-3}$ – $1,7 \cdot 10^{-3}$ м/с та глини 0,001 – 0,0027 мм – $0,0007 \cdot 10^{-3}$ – $0,005 \cdot 10^{-3}$ м/с відповідно. У зв'язку з тим, що густина твердих часток різного розміру в полідисперсних шламах може коливатись в широких межах, то гідравлічна крупність достатньо добре характеризує швидкість осідання часток без урахування природи та розміру твердої фази.

1.2 Способи зневоднення шламів та мулів

Сучасні виробничі процеси, у тому числі і процеси збагачення корисних копалини, очищення бурових розчинів, шламів металургійних підприємств передбачають згущення і зневоднення шламів [5, 10, 11]. Метою при цьому є оптимальне розділення рідкої і твердої фаз при максимально можливій чистоті рідкої фази і найбільш низької вологості сухої речовини твердої фази.

Існуючі водно-шламові схеми на виробництвах, описані у вітчизняних [12] і зарубіжних літературних джерелах [13, 14], передбачають первинне освітлення (згущення) шламу у зовнішніх шламонакопичувачах-відстійниках і зневоднення осаду за допомогою центрифуг або фільтруючого устаткування, що дозволяє замкнути водооборотний цикл виробництв.

Існуючі водно-шламові схеми застосовують такі основні методи згущення та подальшого зневоднення:

- дренавання – природне стікання води під дією сили ваги на нерухомих грохотах, в елеваторах і штабелях;

- відстоювання (згущення) – осадження у воді й ущільнення осаду, яке здійснюється у різноманітного роду відстійниках та згущувачах;
- грохочення – зневоднення під дією сили ваги води і вібрації;
- центрифугування – зневоднення у відцентровому полі, яке здійснюється в фільтруючих та осаджувальних центрифугах;
- фільтрування через пористу перегородку за допомогою вакууму на вакуум-фільтрах або надлишковому тиску на фільтр-пресах;
- осадження в гідроциклонах;
- сушіння осаду – термічне зневоднення в сушарках різноманітних конструкцій.

Застосування того або іншого процесу зневоднення залежить в основному від гідравлічної крупності і гранулометричного складу шламу, та доцільності використання твердої фази в якості товарного продукту (для дорожнього будівництва; в якості наповнювачів та в'язучих та ін.) [15, 16] або джерела енергії (наприклад для газифікації [17], брикетування [18, 19], отримання рідкого палива [20]).

У світовій практиці абсолютно чітко простежується тенденція до безперервного збільшення питомої ваги механічного зневоднення осаду та шламів стічних вод через значні витрати енергетичних ресурсів на термічні методи [21]. Як правило, дренавання застосовується при зневодненні грубодисперсного, центрифугування – дрібного, фільтрування і згущення – тонкого матеріалу.

У відстійниках очищення рідин відбувається під дією сил гравітаційного поля. Тут швидкість процесу очищення обмежена швидкістю осідання частинок. Наприклад, частинка діаметром 100 мкм і густиною 1200 кг/м^3 осяде у відстійнику заввишки 1 м через 17 хвилин, а частинка діаметром 1 мкм – за $1,8 \cdot 10^5$ хвилин (більше 4 місяців). Тому їх використовують для первинного освітлення рідини та згущення шламу перед зневоднювальним устаткуванням. Широкого розповсюдження набули відстійники радіального та тонкошарового типів [22].

Традиційна схема зневоднення вугільних шламів є ланцюжком з гідроциклонів, грохотів і центрифуг [21]. Можливі деякі варіації цього устаткування. Ефективність зневоднення залежить від гранулометричного складу зернистих середовищ, їх структури і фізико-хімічних властивостей. Отримання низької вологості зневоднених тонкодисперсних мулів дозволяє сумісно складувати відходи фабрики, а також зменшити втрати води у виробництві [23, 24].

Для зневоднення шламових продуктів нефлотаційної крупності застосовуються сита, вібросита, віброгрохоти, стрічкові вакуум-фільтри, фільтруючі і осаджувально-фільтруючі центрифуги, стрічкові фільтр-преси і термічні сушарки; для флотаційної крупності – дискові, стрічкові і барабанні вакуум-фільтри, гіпербарфільтри, осаджувальні центрифуги, стрічкові і камерні фільтр-преси [25].

В Україні розробки зі створення технологій і устаткування для збагачення тонких класів і утилізації шламових відходів вугледобувної промисловості ведуть наступні організації: "УкрНДІвуглезбагачення", "Гіпромашвуглезбагачення", Національна металургійна академія, Національний гірничий університет, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАНУ та інші.

З літератури відомо, що використання грохотів різної конструкції [26 – 32] при переробці шламів доцільно для довилучення вугільних фракцій з розмірами крупнішими за 40 – 50 мкм, а більш тонкі фракції скидаються у мулонакопичувачі і потребують подальшої утилізації. Для зневоднення і тонкої класифікації суспензій на грохотах широко застосовуються щілинні колоснікоподібні (шпальтові) [33] і гумові сита [34, 35] з трапецеїдальним перетином щілини.

В "УкрНДІвуглезбагачення" розроблені технології збагачення шламів з використанням циклонсепаратора ЦС-500/360, на якому продукти розділення мають зольність після зневоднення відповідно: концентрат – 23 – 30%, відходи – 70 – 83% [36]. Апарат складається з декількох однакових секцій, в яких відбувається: осадження і накопичення частинок твердого матеріалу крупніс-

тю більше 3 мкм; осадження частинок крупністю менше 3 мкм і освітлення рідкої фази; зневоднення матеріалу. Після вказаних операцій відходи транспортуються у відвал [37, 38].

Цікавою є технологія зневоднення шламів, запропонована фірмою ПАТ "АНА-ТЕМС", яка полягає в подачі шламової суспензії для розділення її на воду і тверду фазу у великорозмірний "мішок" з тканого геотекстилю – контейнер з фільтрувального матеріалу [39]. У міру заповнення контейнера, в ньому формується щільне шламове тіло. Витримка шламового тіла, "упакованого" в геотекстиль, забезпечує схід вологи, підсушення осаду і зниження вологи до 15% [40].

Для зневоднення шламу в основному застосовуються стрічкові вакуум-фільтри, рідше пульсуючі, осаджувальні або осаджуючо-фільтруючі центрифуги. Всі ці апарати дозволяють одержувати вологу в межах 28 – 35% на вакуум-фільтрах і 25 – 32% – на центрифугах [41].

Камерні і шнекові фільтр-преси широко використовуються в країнах Західної Європи і США для зневоднення осадів міських і промислових стічних вод на великих очисних спорудах. Основними їх перевагами є можливість глибокого механічного зневоднення, порівняно низькі питомі витрати енергії, велика продуктивність одиниці виробничого устаткування. Проте, вони вимагають великої виробничої площі, могутніх фундаментів і складної системи видалення зневодненого осаду [42].

Фільтрування може бути використано в технологічних схемах очищення як самостійний метод, так і в поєднанні з іншими методами. При використанні фільтрів допустимий вміст суспензії у воді не повинен перевищувати 500 мг/дм³, для деяких тихохідних фільтрів допускається 700 мг/ дм³.

В порівнянні з вакуум-фільтрами шнекові фільтруючі і осаджувально-фільтруючі центрифуги мають переваги:

– можливість живлення як згущеною, так і розбавленою пульпою з широкими варіаціями крупності твердої фази;

- універсальність застосування, тобто, для різних продуктів, що різко відрізняються один від одного за якістю і гранулометричним складом;
- простота експлуатації;
- відсутність потреби в допоміжному устаткуванні;
- менші габаритні розміри і енергоспоживання;
- в деяких випадках менша вологість зневодненого матеріалу.

З патентно-інформаційних видань відомо, що для зневоднення різних дрібнозернистих матеріалів застосовуються осаджувальні і фільтруючі центрифуги з великим різноманіттям типорозмірів і конструктивних виконань. Якщо осаджувальні центрифуги застосовуються в основному для зневоднення сильнорозбавлених суспензій з малим вмістом твердої фази, то фільтруючі центрифуги розраховані на їх використання при зневодненні порівняно крупних матеріалів.

Так, наприклад, осаджувально-фільтруюча центрифуга (рис. 1.1) безперервної дії має дві послідовні стадії розділення твердої фази від рідкої початкової суспензії [43,44]. Перша стадія включає відцентрове віджимання твердої фази в суцільному циліндровому роторі, друга стадія включає відцентрову фільтрацію на щілинному ситі циліндрової форми.

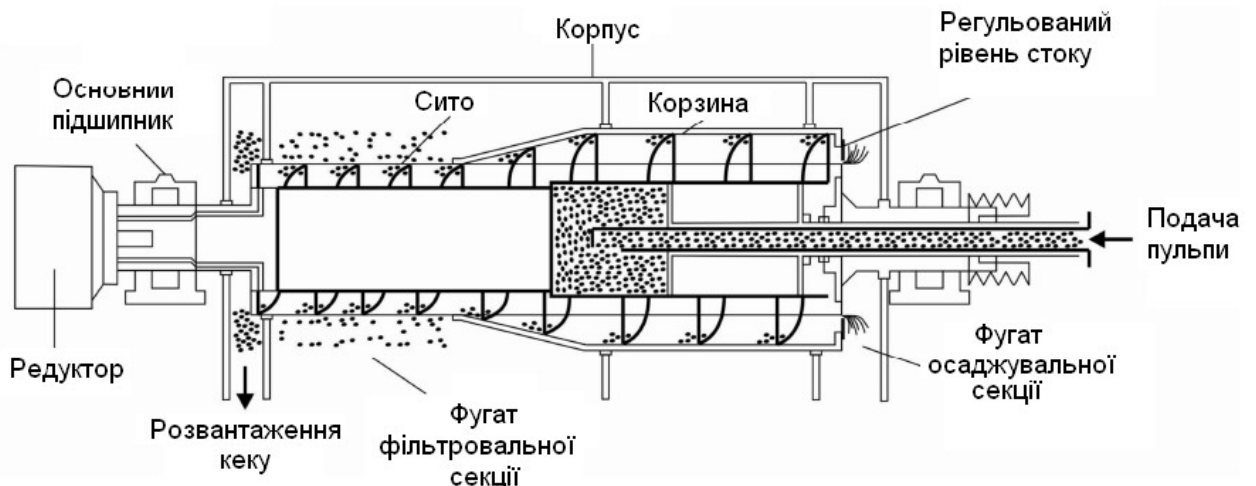


Рисунок 1.1 – Схема осаджувально-фільтруючої центрифуги (від Bird Machine Company)

Найбільш важливі параметри пульпи, які впливають на зневоднюючу дію осаджувально-фільтруючої центрифуги [45, 46] це розмір частинок, вміст твердої фази в суспензії живлення і її витрата. Зазвичай, кількість ультратонкого матеріалу визначається вмістом частинок класу $0 \times 0,044$ мм в загальній кількості твердого в живленні. Згідно з практичними даними [47] із зростанням ультратонких фракцій зростає і вологість осаду, що призводить до неможливості уловлювати дрібні частинки, що є недоліком даного виду центрифуг. Скидання ультратонких фракцій високої зольності (29,9 %) виносить з собою до 50 % вологи з осаду [48].

Окрім вмісту тонких зерен, на процес зневоднення шламу більшою чи меншою мірою впливають інші чинники, до яких можна віднести продуктивність і вихід твердого осаду. У свою чергу, ці чинники можна розділити на три групи:

- походження шламу, тобто, тип дисперсної фази і середовища, їх щільність, розподіл за гідравлічною крупністю (або ситовому складу);
- параметри устаткування (фільтрів, центрифуг): конструкція, форма, типорозміри, експлуатаційний стан (знос, забруднення), фільтруюча або сітчаста робоча поверхня (матеріал, вид тканини, розмір щілини сита), безперервний або періодичний режим роботи;
- виробничі умови, такі як вміст твердого в живленні для початкового матеріалу, розрідження (для фільтру) або показник чинника розділення (для центрифуг), частота обертання фільтруючої поверхні, глибина занурення, розміри зон зневоднення і відсмоктування або, відповідно, тривалість зневоднення, якість води (показник рН, вміст солі, температура), вид і витрата реагентів, а також питома пропускна спроможність.

В Україні для зневоднення шламу до недавнього часу широко використовувалися осаджувальні центрифуги типу НОГШ-1320Ф, у яких на цій операції зазначено ряд недоліків [47]:

- висока вологість осаду, що вимагає додаткової сушки;
- великі витрати на обслуговування і ремонт;

– в результаті шламування центрифуг при подачі живлення із вмістом твердої фази понад 300 г/дм^3 відбувається перевантаження і вихід редуктора з ладу.

Сьогодні в Україні випускаються більш досконалі види центрифуг, що свідчить про розвиток цих апаратів та промислове застосування в шламовому господарстві для очищення стічної та оборотної води [49 – 54].

Найбільш представницькими фірмами, що поставляють відцентрове устаткування на світовий ринок, є: німецькі фірми «Хіллер», «Вестфалія Сепаратор», «Флотвег», «КХД», шведська фірма «Альфа Лаваль», французька фірма «Гінард», японські «Чорі», «Куріта», російські «СЕТКО», американська «Decanter Machine Inc.», українські ТОВ «НТЦ «Екомаш» (м. Харків), ПАТ «СМПО ім. Фрунзе» (м. Суми) та ін.

Перш за все, слід зазначити, що відцентрове устаткування вказаних фірм відповідає світовому рівню і має попит на світовому ринку в різноманітних галузях зневоднення шламів та очищення стічних вод [55 – 58].

Про рівень оптимізації процесів розділення гетерогенних систем і зневоднення виділеної твердої фази різноманітними апаратами свідчать досягнуті якісно-кількісні показники: наприклад, у вуглезбагаченні відходи флоатації, незбагачені шламові води і т.п. із вмістом твердого 5 – 10 % згущуються у відстійниках (згущувачах) (робота відстійників в періодичному режимі) до вмісту твердої фази 30 – 50 %. У зневоднених на стрічкових пресах фільтрах осад згущувача має вміст твердої фази 55 – 65 %, якщо ж осад згущувача зневоднюється в камерних чи рамних фільтр-пресах періодичної дії, то вміст твердої фази складе близько 75 %, якщо осад зневоднюється в центрифугах (на режимі приблизно $Fr = 500$), то вміст твердої фази складе 60 – 65 %. На всіх етапах осадження, зневоднення, як правило, проводиться хімічне посилення процесів за рахунок використання значної кількості флокулянтів загальною витратою 350 – 500 г/т і більше.

1.3 Шляхи інтенсифікація процесів зневоднення шламів та осаду

Здатність багатьох речовин у водному середовищі змінювати свій фазово-дисперсний стан під впливом фізико-хімічних чинників, таких як концентрація, рН середовища, сольовий склад, температура та інших відкриває можливість широко варіювати технологічні рішення, оптимізувати процеси, що протікають в апаратах, і результати технологічного ланцюжка в цілому. Процес очищення і освітлення може бути прискорений, якщо буде знайдений зручний метод, що інтенсифікує агломерацію (злипання і укрупнення) частинок, що порушує стійкість дисперсної системи.

В даний час ще не розроблена чітка теорія процесу осадження концентрованих полідисперсних суспензій, хоча роботи в цьому напрямі ведуться. Роботи таких відомих авторів, як: Л.Т. Вертола, Б.В. Дерягіна і його співробітників, М.І. Бейліна, М.А. Борца, Ю.П. Бочкова, В.С. Камінського, Г.Л. Майдукова, П.І. Пілова і багатьох інших присвячені дослідженню і інтенсифікації процесів зневоднення [59 – 61]. Встановлено, що вода в дисперсних системах набуває нових властивостей, відмінних від властивостей води в об'ємі [62], перш за все за рахунок капілярних процесів між частинками і утворення гідратних плівок.

Інтенсифікація процесу розділення суспензії, що містить тонкі та ультратонкі фракції пов'язана з порушенням стійкості дисперсної системи. Класичні уявлення про стійкість дисперсних систем сформована ще в 20-х роках минулого століття. За пропозицією Н. П. Піскова стійкість дисперсних систем підрозділяють на два види: стійкість до осадження дисперсної фази (седиментаційна стійкість) і стійкість до агрегації її частинок (агрегаційна стійкість) [63]. Перший вид стійкості характеризує здатність дисперсної системи зберігати рівномірний розподіл частинок дисперсної фази за об'ємом дисперсного середовища, або її стійкість до розділення фаз (седиментаційна стійкість).

Коагуляція в розбавлених системах призводить до втрати стійкості системи, агрегації частинок дисперсної фази, седиментації, і зрештою до роз-

шарування (розділення) фаз. До процесу коагуляції відносять адгезійну взаємодію частинок дисперсної фази з макроповерхнями (адагуляція). У вузчому сенсі злипання частинок називають коагуляцією, процес злиття частинок одержав назву коалесценції.

Кінетичні чинники, що знижують швидкість коагуляції, пов'язані в основному, з гідродинамічними властивостями середовища: з уповільненням зближення частинок, витікання і руйнування прошарків між ними.

За класичними уявленнями розрізняють наступні термодинамічні і кінетичні чинники стійкості дисперсних систем:

– електростатичний чинник, який полягає в зменшенні міжфазного натягнення унаслідок виникнення подвійного електричного шару на поверхні частинок відповідно до рівняння Ліпмана, який обумовлюється поверхневою електролітичною дисоціацією або адсорбцією електролітів;

– адсорбційно-сольватний чинник полягає в зменшенні міжфазного натягнення при взаємодії частинок дисперсної фази з середовищем (завдяки адсорбції і сольватації) відповідно до рівняння Дюпре для роботи адгезії і адсорбційним рівнянням Гібса;

– ентропійний чинник, як і перші два, відноситься до термодинамічних і доповнює їх в системах, в яких частинки або їх поверхневі шари беруть участь в тепловому русі. Суть його полягає в прагненні дисперсної фази до рівномірного розподілу за об'ємом системи (як і розподіл розчиненої речовини в дійсних розчинах);

– структурно-механічний чинник (кінетичний), дія якого обумовлена тим, що на поверхні частинок є плівки, що володіють пружністю і механічною міцністю, руйнування яких вимагає витрати енергії і часу;

– гідродинамічний чинник знижує швидкість коагуляції завдяки зміні в'язкості середовища і щільності дисперсної фази і дисперсійного середовища;

– змішані чинники найбільш характерні для реальних систем, тому агрегативна стійкість забезпечується декількома чинниками одночасно. Особ-

ливо висока стійкість спостерігається при сукупності дії термодинамічних і кінетичних чинників, коли разом із зниженням міжфазного натягнення виявляються структурно-механічні властивості міжчасткових прошарків.

Кожному чиннику стійкості відповідає специфічний метод його нейтралізації, а отже і інтенсифікації розділення дисперсної системи на фази. Наприклад, дія електростатичного чинника значно знижується при введенні в систему електролітів, які викликають стиснення подвійного електричного шару (наприклад, додати в суспензію сіль). Сольватація при адсорбційно-сольватному чиннику може бути виключена ліофобізацією частинок дисперсної фази за допомогою адсорбції відповідних речовин (наприклад, додати в суспензію флокулянт). Дію структурно-механічного чинника можна зменшити за допомогою речовин, що розріджують і розчиняють пружні структуровані шари на поверхні частинок (наприклад, додати в суспензію розчинник).

Основною характеристикою, що впливає на седиментаційну стійкість є розміри частинок дисперсної фази (R):

$$v = \frac{2g(\rho_T - \rho_P)}{9\mu} R^2, \quad (1.2)$$

де v – швидкість седиментації, м/с;

μ – в'язкість дисперсійного середовища, Па·с;

g – прискорення вільного падіння, $9,81\text{ м/с}^2$.

Крім розміру частинок дисперсної фази, різниці густини твердих часток і рідини ($\rho_T - \rho_P$) і в'язкості дисперсного середовища швидкість седиментації v залежить від сукупності хімічних, фізико-хімічних і фізичних властивостей часток (концентрація, протяжність сольватаційного шару, форма частинок, заряд їх поверхні і ін.), характеристик дисперсійного середовища (хімічний склад, температура, рН та ін.), а також від ряду фізичних параметрів для аналізованої дисперсії в цілому.

З рівняння (1.2) очевидно, що зі зменшенням розміру часток і наближенням їх до ультратонкої фракції збільшується вплив в'язкості і густини дисперсної фази, а з ними і чинників стійкості дисперсного середовища. І на-

впаки, при збільшенні розміру часток швидкість седиментації приблизно дорівнює R^2 . Саме тому найчастіше інтенсифікація процесу осадження полідисперсних суспензій, які містять тонкі фракції, здійснюється шляхом агрегації дрібнодисперсних частинок за рахунок різних видів коагуляції [64], флокуляції за допомогою полімерів [65] та біополімерів [66], селективної флокуляції на мінеральному носії [67] та ін.

Так, наприклад, відомо, що швидкість налипання шламистих частинок діаметром 5-11 мкм на зерна мінералу-носія діаметром 60 мкм у багато разів більше швидкості злипання дрібних частинок між собою. Ступінь флокуляції значно підвищується також у присутності мінералу-носія.

Явище агрегації твердої фази високодисперсних суспензій в результаті глибокого вивчення його різними дослідниками стало широко використовуватися в техніці центрифугування. Цей процес одержав назву відцентрово-флокуляційного способу розділення суспензій [68]. У Західній Європі широкого поширення набув метод зневоднення осаду центрифугуванням з використанням полімерних флокулянтів [57, 64, 69 – 71].

У сучасних водно-шламових схемах фабрик вуглезбагачення агрегація дрібнодисперсної твердої фази в шламових водах із застосуванням полімерів (процес флокуляції) проводиться перед кожним апаратом виходячи з фазово-дисперсного стану твердої фази в суспензії і режимів роботи апаратів. Причому, повторна флокуляція проводиться в гідродинамічних змішувачах, конструкції яких і режими процесу є предметом know-how.

Важливим параметром є правильний підбір концентрації флокулянта і точок його подачі в технологічний процес. Часто цьому не приділяють належної уваги, а в результаті значно збільшуються витрати флокулянта, знижується його ефективність.

Інтенсифікація процесу флокуляції дисперсних систем пов'язана з адсорбцією реагентів-флокулянтів на межі розділу фаз і її впливу на електростатичну складову поверхні частинок. Стійкість і ступінь освітлення суспензії визначається в першу чергу вмістом тонкодисперсних частинок

(<5 мкм), що несуть, як правило, максимальний по абсолютній величині заряд поверхні. Для зниження цього заряду можна подавати катіонний поліелектроліт, що дозволяє в умовах перемішування формувати щільні агрегати, які складаються з тонких глинистих мікрочасток, що потім, флокулюють разом з крупною фракцією. При додаванні високомолекулярних флокулянтів через більшу довжину ланцюжків окремих молекул полімеру вірогідність їх взаємодії з іншими частинками зростає, а це сприяє створенню крупних рихлих флокул, які збільшують швидкість осадження твердої фази [72].

Глинисті мінерали, які входять до складу практично будь-якого шламу, мають на своїй поверхні негативні електричні заряди, що створюють навколо частинок силове поле [73]. Під дією негативних зарядів молекули води своїми позитивними кінцями (H^+) орієнтуються у напрямку до негативного заряду глинистої частинки і, щільно оточивши її, утворюють мономолекулярний і далі полімолекулярний шари адсорбованої води. Згідно загальноприйнятої в даний час моделі Гуї-Штерна зовнішнє обкладання частинки можна розділити на дві області: щільну частину (штерновську), що складається з шару щільно прилеглих безпосередньо до поверхні противоіонів і дифузійну частину, в якій противоіони утримуються тільки електростатичними силами. У штерновській частині до них додаються ще адсорбційні сили. Тому очищення від дрібних глиноподібних часток вимагає врахування типу взаємодії часток в дисперсній системі. Так, наприклад авторами [73] зазначається, що для інтенсифікації очищення глинистих частинок менше 0,05 мм необхідно подавати в суспензію спочатку катіонний поліелектроліт, а потім аніонний полімер. Для частинок крупніше 0,16 мм, зміна послідовності подачі флокулянтів, як правило, не здійснює істотного впливу на ефективність освітлення суспензії.

Як зазначають автори [73] в більшості випадків, флокулянти з високою молекулярною масою є найбільш ефективними. Особливо це помітно при згущенні шламів з невеликою кількістю твердої фази (до 20 г/дм³). При збільшенні густини пульпи, ефективність роботи високомолекулярних флоку-

лянтів значно падає. Це відбувається через високу в'язкість пульпи і ефекту обмеженого падіння частинок. В даному випадку, флокулянти з низькою молекулярною вагою дозволяють одержати більший ефект.

Відмічається, що неорганічні суспензії і шлами, такі як, наприклад, гідроксидні шлами, глинисті суспензії, вугільні промивні води, дрібнодисперсні суспензії, що утворюються при промивці піску і гравію утворюють флокули при обробці переважно аніонними або неіоногенними флокулянтами. Органічні суспензії і згущені шлами, такі як активний мул, а також дрібнодисперсні глинисті суспензії обробляються, як правило, катіонними флокулянтами.

Аналіз стану сучасного устаткування для реагентної обробки води показав, що ще одним з ефективних технічних рішень є використання систем з рециркуляцією шламу і введенням мікропіску [74 – 80] для підвищення ефективності флокуляційно-коагуляційного процесу. Методи коагуляції з рециркуляцією шламу в Росії достатньо вивчені і активно застосовуються в нових і модернізованих установках. Досліди з введенням асоціюючих добавок (мелений кліноптілоліт, глина) показали, що разом з інтенсифікацією процесу коагуляції відбувається збільшення об'єму відходів [74 – 76]. Тому дані методи розповсюдження не одержали, на відміну від іншого напряму інтенсифікації процесу коагуляції – введенням мікропіску і його рециркуляції [75]. Суть способу очистки води за допомогою коагуляції і флокуляції з використанням мікропіску включає добавку коагулянту у суспензію, підготовку суспензії за концентрацією завислих речовин за допомогою мікропіску, введення флокулянту, відділення згущеного продукту від освітленої рідини у тонкошаровому відстійнику, виділення мікропіску і повернення його в процес та зневоднення згущеного продукту. При агрегації з піском осадження пластівців відбувається дуже швидко, через що крупні пластівці захоплюють дрібні частинки та укрупнюються [81]. Це сприяє прискоренню очищення води. До недоліків найближчого цього методу слід віднести недостатньо високу ступінь очищення суспензії, а також складність і велику вартість технології очищення. Використання мікропіску для інтенсифікації процесу флоку-

ляції звужує сферу використання, а наявність процесу коагуляції збільшує кількість і вартість хімічних реагентів, що зумовлює збільшення вартості всього процесу.

В даний час існує ряд інших прийомів, заснованих, наприклад, на використанні частотних коливань, у тому числі, і ультразвуку [82] в поєднанні з іншими способами очищення.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що найпоширенішим способом інтенсифікації процесу очищення полідисперсних шламів є застосування флокулянтів.

Розглянемо механізми дії та особливості впливу різних факторів щодо здійснення цього процесу.

1.4 Сучасні проблеми теорії і практики процесів флокуляції

Застосування розчинних полімерних флокулянтів розглядається в роботах вітчизняних і зарубіжних авторів [83 – 97].

Седиментаційна стійкість дисперсної системи під дією високомолекулярних з'єднань багато в чому визначається стадією адсорбції макромолекул на поверхні частинок і характеристиками адсорбційних шарів, що утворюються (числом сегментів макромолекули, пов'язаних з поверхнею частинок, стійкістю таких локальних контактів, а також товщиною адсорбційного шару, що утворився) [63]. Адсорбція макромолекул на поверхні частинок дисперсної фази вважається першою стадією флокуляції, яка багато в чому визначає протікання всього процесу. Для правильного розуміння механізму флокуляції і управління ним необхідно мати уявлення про основні теорії адсорбції полімерів. В основі сучасних теорій адсорбції лежать уявлення про конформаційні зміни, що відбуваються з адсорбованими макромолекулами на межі розділу фаз полімер-поверхня твердих частинок, і в поверхневому шарі в актах взаємодії полімер-полімер і полімер-розчинник. Для неіоногенних полімерів основна група теорій базується на класичних уявленнях Флорі, які були розвинені ним для сильно розбавлених розчинів полімерів [63]. На

підставі уявлень Флорі при низьких концентраціях полімеру в розчині відсутнє перекривання клубків макромолекул і щільність сегментів в усіх точках розчину однакова і достатньо добре описується теорією «середнього поля». Для систем, в яких використовується сильний розчинник, характерно формування сильно набряклих клубків з макромолекул полімерів, що перекриваються. Це призводить до появи флуктуацій щільності сегментів в просторі. Великий експериментальний матеріал, підтверджуючий цю концепцію, одержаний школою Ю. С. Ліпатова [98]. Для іоногенних полімерів, на відміну від неіоногенних, до звичайних взаємодій поверхні адсорбенту з макромолекулою додаються електростатичні взаємодії поверхні частинок з макромолекулами адсорбата. Тому, у іоногенних полімерів (в порівнянні з неіоногенними) реалізується ширший спектр конформаційних станів у макромолекул – не тільки з набором конформацій, характерних для статистичних клубків, але і для асиметричних моделей макромолекул типу сильно витягнутих еліпсоїдів обертання. При адсорбції макроіонів з розбавлених розчинів електролітів, тобто коли між адсорбатом і адсорбентом домінують електростатичні сили, формування на поверхні довгих петель і хвостів стає набагато менш вірогідним, при цьому адсорбована на частинках кількість макромолекул в адсорбційному шарі невелика. В результаті цього різко ослаблюється залежність адсорбційних параметрів від величини молекулярної маси полімерного зразка.

Більшість авторів в якості рушійної сили процесу флокуляції розглядають утворення полімерних містків між дисперсними частинками і макромолекулами адсорбованого високомолекулярного з'єднання. За допомогою даного механізму, вперше запропонованого Ла Мером [99], вдається пояснити основні закономірності флокуляції дисперсій, що спостерігаються неіоногенними і зарядженими полімерами, а саме – утворення в присутності полімерів об'ємистих і рихлих осадів, зростання флокулюючих показників полімерів у міру збільшення молекулярної маси адсорбата, залежність ефективності флокуляції від технологічного режиму її проведення – технологічного чинника.

При флокуляції за механізмом утворення містків адсорбовані макромолекули полімерів, закріплюючись на поверхні порівняно невеликим числом контактів, слабо деформуються і з цієї причини можуть містити достатньо довгі петлі і хвости. При цьому вважається, що процес флокуляції протікає тільки за наявності вакантної поверхні на сусідніх (що наближаються до аналізованої частинки) частинках, де могли б адсорбуватися незв'язані ділянки інших, макромолекул, що зближуються між собою. Для більшості реальних дисперсних систем число частинок дисперсної фази у флокулах значно більше – 20–50 і більш.

Інший, обговорюваний в літературі, механізм флокуляції дисперсних систем – це нейтралізаційний механізм, який супроводжується компенсацією локальних зарядів поверхні частинок за рахунок адсорбції на них протилежно заряджених ланок макроіонів адсорбата, що повторюються. Даний механізм реалізується лише за умови наявності в поверхневому шарі досить великого числа по величині протилежно (по відношенню до макроіона) заряджених ділянок на поверхні розділу фаз. Цей процес нейтралізації локальних поверхневих зарядів поверхні розділу фаз супроводжується істотним зниженням електрокінетичного потенціалу у частинок дисперсної фази. При нейтралізаційному механізмі передбачається, що макроіони флокулянта зв'язуються з поверхнею частинки великим числом контактів, при цьому змінюють свою конформацію на більш витягнуту і плоску, «розгортаючись» на поверхні з формуванням «мозаїчної» структури з приблизно рівного числа зарядів різного знаку.

Останнім часом Непером і рядом інших авторів розвинені нові уявлення про так звану витіснювальну флокуляцію дисперсних систем. Відповідно до цієї концепції процес флокуляції відбувається в умовах, коли більшість з макромолекул полімеру, що вводяться в дисперсійне середовище, не адсорбується на поверхні частинок, а знаходяться у вільному стані в розчині. Суть цього механізму полягає в тому, що коли в дисперсній системі відстань між частинками, що зближуються, менше ефективного діаметру полімерного

клубка, то макромолекули не можуть проникати в міжчастковий простір і по суті виключаються з нього. Таким чином, між частинками існує мікрорезервуар майже чистого розчинника і в цьому випадку на частинки починають діяти сили осмотичного тиску з боку розчину полімеру, які прагнуть зближувати ці частинки. При подальшому їх зближенні частина чистого розчинника витісняється в об'ємну фазу і призводить до зниження вільної енергії системи.

Флокулоутворення під дією полімерних добавок залежить від дуже великого числа чинників: характеристик (особливо поверхневих) частинок, хімічної природи ланок, що повторюються, і складу макромолекул полімеру, концентрації флокулянта, а також від сукупності хімічних, фізико-хімічних і фізичних властивостей дисперсного середовища (рН, природи і іонної сили електроліту, наявності і природи поверхнево-активних речовин і ін.). Величезний вплив на показники флокуляції здійснює концентрація дисперсної фази, дія якої на механізм процесу флокуляції найвиразніше виявляється при зміні режиму седиментації, тобто, при переході від вільного до обмеженого осідання, або навпаки. При вивченні впливу концентрації на аніонних флокулянтах зафіксоване зниження флокулюючого ефекту з підвищенням масової концентрації твердої фази в суспензії, що багато в чому пов'язано із зменшенням відстані між частинками і із зміною сумарної поверхневої енергії на межі розділу фаз між частинками і дисперсним середовищем. Зміни концентрації флокулянта впливають не тільки на ефективний об'єм сформованих флокул і їх кількість, але і безпосередньо відображаються на таких макроскопічних показниках, як адсорбція, швидкість седиментації частинок і седиментаційну стійкість дисперсних систем. Встановлено, що з підвищенням концентрації флокулянта, швидкість осадження помітно зростала до певної межі, після якої навіть значне збільшення концентрації полімеру не викликало істотного прискорення процесу седиментації. Більш того, у ряді випадків спостерігалось навіть погіршення флокуляції – унаслідок як структуризації системи. В літературі показано, що дія полімерів багато в чому залежить від

умов внесення його в суспензію. Для ряду дисперсних систем ефективність флокуляції збільшується при додаванні полімеру в дві стадії і практично рівними порціями, як це було проілюстровано, зокрема, при флокуляції суспензії каоліну поліакріламідними флокулянтами [100]. Автори пов'язують отриманий результат з утворенням при додаванні в суспензію другої порції полімеру вторинних флокул (так званих «суперфлокул»), що перевершують за своїми розмірами первинні, і осідають з більшою швидкістю. Зростання флокулюючих показників при поетапному введенні полімеру декількома порціями може бути обумовлене також і переходом до більш оптимальних структурних параметрів системи на стадії утворення флокул. У режимі обмеженого осідання із зростанням іонної сили зменшується швидкість седиментації частинок, що обумовлено дією введеного електроліту як на поверхневі характеристики частинок, так і на конформаційний стан макромолекул аналізованих полімерних зразків. В більшості випадків якнайкраща флокуляція спостерігається при тривалому дозованому додаванні полімеру з енергійним перемішуванням протягом короткого часу. У ряді експериментів збільшення розмірів флокул спостерігалось в період введення полімеру при безперервному перемішуванні суспензії і повністю (або частково) припинялося за відсутності перемішування. Дуже інтенсивне перемішування вело до процесу руйнування сформованих флокул і до зниження активності полімеру. Спираючись на дані про залежності швидкості осідання частинок дисперсної фази від дози полімеру, що вводиться, при різному часі змішення, для деяких дисперсних систем було відзначено різке зниження швидкості осідання із збільшенням часу і інтенсивності перемішування при однакових дозах полімеру, що вводиться. В цьому випадку уповільнення процесу флокуляції пов'язане з руйнуванням частини вже сформованих флокул при тривалому, інтенсивному перемішуванні суспензії.

Щодо тривалості перемішування і часу перебування води в змішувачі дотепер немає єдиної думки. Рекомендований час перемішування [101, 102] змінюється від декількох секунд до семи хвилин. При цьому час перебування

води в змішувачі обґрунтовується з позицій утворення міцних пластівців [102]. Таким чином, у дослідників єдиної думки про тривалість змішення домішок транспортуючих стічних і оборотних вод з поліелектролітами не існує.

Теоретично швидкість флокуляції частинок в турбулентному потоці визначається рівнянням:

$$U_T = \frac{dn}{dt} = -12\pi\beta \cdot G \cdot R^3 \cdot \varphi \cdot \theta \cdot (1 - \theta) \cdot n^2, \quad (1.3)$$

де β – безрозмірний параметр;

GR^3 – коефіцієнт турбулентної дифузії;

θ – відношення сфери дії міжмолекулярних сил до розміру частинок;

n – число завислих частинок в масопотоці.

Передбачувана швидкість градієнтної коагуляції визначається за рівнянням Кемпа і Штейна [103]:

$$U_r = \frac{dn}{dt} = Kr \cdot a^3 \cdot G \cdot n^2, \quad (1.4)$$

де Kr – коефіцієнт коагуляції:

$$a = \theta(r_1 + r_2), \quad (1.5)$$

де r_1 і r_2 – радіуси часток, м;

G – градієнт швидкості, c^{-1} :

$$G = \frac{W}{\mu V t}, \quad (1.6)$$

де W – енергія, що витрачається на перемішування, Дж;

μ – динамічна в'язкість, Па·с;

V – об'єм, в якому відбувається перемішування, m^3 ;

t – час перемішування, с.

Хадсон [104] модифікував рівняння Кемпа таким чином:

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\frac{\eta CG_t}{\pi}}, \quad (1.7)$$

де N_0 – кількість частинок у воді до коагуляції;

N_t – кількість нескоагульованих частинок через період часу t ;

η – коефіцієнт ефективності зіткнень;

C – об'ємна концентрація пластівців, г/дм³.

Харіс допрацював формулу Хадсона і запропонував наступне рівняння ефективності процесу утворення [105] пластівців при наступних допущеннях:

– коагуляція виражається в утворенні первинних частинок (мікропластівців), які мають однорідний розподіл за розміром;

– із збільшенням часу коагуляції частинок переважають умови гетерогенної системи:

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = \frac{Da^3 \eta C G}{\pi} t, \quad (1.8)$$

де D – експериментально визначувана змінна, що є функцією розподілу частинок за розміром;

a – відношення радіусу зіткнень частинки до її дійсного радіусу.

При оцінці ефективності флокуляції частинок частіше за все використовують непрямі показники, наприклад, швидкість осідання частинок і ступінь освітлення води після відстоювання. Іноді використовують інтегральний критерій, що включає декілька показників, одним з яких є еквівалентний діаметр флокул. Розмір флокули не повною мірою відображає ефективність процесу флокуляції, оскільки на швидкість осідання сформованих агрегатів впливають не тільки розмір, але і щільність, або пористість самого агрегату. На думку автора [106], інтенсивність перемішування, або число зіткнень частинок з макромолекулою в одиницю часу є визначальним критерієм ефективності флокуляції.

Згідно теорії Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека агрегативна стійкість дисперсних систем визначається співвідношенням молекулярних сил притягання і електростатичних сил відштовхування між частинками [107]. Порушення агрегативної стійкості таких систем за допомогою флокулянтів зумовлює злипання частинок. Відомості, що містяться в літературі [108], дають пі-

дставу вважати, що ця теорія може бути застосована для випадку взаємодії частинки твердої фази і макромолекули полімеру.

Існує декілька визнаних механізмів флокуляції для неіоногенних полімерів. Флокуляція по механізму витіснення ґрунтується на частковому або повному витісненні макромолекул з простору між частинками дисперсії [109]. Такий процес спостерігається у разі, коли полімер не взаємодіє з адсорбентом. У разі, коли в системі існує взаємодія полімер-адсорбент, частинки зв'язуються у флокули за допомогою полімерних містків, які виникають в результаті адсорбції певних ділянок макромолекули одночасно на декількох різних частинках [110].

Ефективність флокуляції для вугільного шламу залежить від багатьох чинників: концентрації твердого в оброблюваних водах, тривалості і інтенсивності перемішування, в'язкості вод, молекулярної маси і заряду флокулянта, температури і ін.

Різноманіття чинників, що впливають на процес флокуляції, і недостатня вивченість процесу флокулоутворення призводять до збільшення витрати флокулянта, замість оптимізації самого процесу (наприклад, стадій адсорбції полімеру на поверхні частинок або утворення міцних флокуляцій них структур).

Для очищення вугільного шламу, що містить мінеральні дрібнодисперсні домішки глинистих частинок, спостерігається висока ефективність застосування іоногенних (катионного і аніонного) флокулянтів в порівнянні з неіоногенними [111]. Автори статті [112] для очищення шламу вуглезбагачення рекомендують аніонний флокулянт і встановили залежність його витрати від концентрації твердої фази і значення рН. На адсорбційну активність полімерного флокулянта впливають також і інші чинники, наприклад мінералізація рідкої фази [113]. Стабілізуючий вплив високомолекулярних з'єднань зростає у міру збільшення їх молекулярної маси. Також спостерігається різке зростання стійкості дисперсних систем [114].

Не дивлячись на значну вивченість самого процесу флокуляції, структура і міцнісні характеристики флокул, а також властивості, реології сфлукуюваних суспензій висвітлені в літературі недостатньо. В той же час, знання закономірностей утворення міцних структур і течії сфлукуюваних суспензій дозволить прогнозувати можливість їх транспортування, що забезпечує мінімальну деструкцію флокул. Це вимагає пошуку відповідей на наступні питання [115]:

– до якого вмісту твердої фази доцільно згущувати суспензію, щоб при її русі деструкція флокул була б зведена до мінімуму?

– які значення параметрів режиму руху сфлукуюваної суспензії забезпечують за даних умов мінімальну деструкцію флокул?

Останнім часом з'явилися публікації, що обґрунтовують механізм руйнування флокул за рахунок напруги зсуву [116]. Розраховано, що деструкція флокул відбувається при нарузі зсуву близько 1-10 Па, причому міцність агрегатів зростає із збільшенням дози флокулянта [117]. Встановлено, що суспензії концентрату флотації вугілля без застосування флокулянтів за характером течії близькі до ньютонівських рідин, а структуроутворення в суспензії не відбувається [118]. При подачі флокулянта суспензія набуває псевдопластичних властивостей. Дані [117, 118] добре узгоджуються з [119]. Следствием руйнування контактів частинок в структурі є посилення неньютонівського характеру течії системи в результаті переходу від в'язкопластичного до псевдопластичного руху суспензії, незалежно від хімічної природи використаного флокулянта [120].

Таким чином, аналіз теоретичних основ флокуляції і коагуляції завислих частинок у рідких середовищах, зокрема з використанням процесу фізико-хімічного моделювання, показав, що у дослідників не існує єдиної думки про режими флокуляції і показники, які використовуються для оцінки ефективності цього процесу. Крім того, не існує єдиної думки і про тривалість змішення домішок транспортуючих стічних і оборотних вод з поліелектролітами не існує.

1.5 Обґрунтування обраного напрямку досліджень

Узагальнюючи вищенаведене, можна стверджувати, що традиційною схемою очищення полідисперсних шламів та стічних вод є процес освітлення води і зневоднення шламу, який проводиться за стандартною схемою: змішення шламу з флокулянт → освітлення (згущування шламу) в радіальному або тонкошаровому відстійнику → зневоднення осаду центрифугуванням або фільтруванням.

Аналіз теорії і практики очищення полідисперсних шламових вод показує наступні особливості процесу очистки, які потребують подальшого вивчення та дослідження:

- зневоднення ультратонких (глинистих і мулових) шламів, в тому числі з використанням флокулянтів, відрізняється від класичних уявлень осадження шламів з гідравлічною крупністю більше $1,7 \cdot 10^{-3}$ м/с (з частинками твердої фази понад 40 – 60 мкм), що дозволяє судити про те, що механізми утворення і стабільності агрегатів в шламах, що містять частинки з гідравлічною крупністю менше і більше $1,7 \cdot 10^{-3}$ м/с відрізняються;

- флокулоутворення і швидкість осідання твердої фази залежить від концентрації твердої фази в початковій суміші, зростання якої ускладнює адсорбцію полімеру (ускладнює дифузію флокулянта до поверхні твердої фази), призводить до раннього утворення і руйнування агрегатів-флокул, а також уповільнює осідання (внаслідок зростання седиментаційної стійкості дисперсної системи);

- процес флокуляції проходить в дві стадії: адсорбція флокулянта на поверхні частинок і утворення агрегатів-флокул, які відрізняються за своєю природою і вимагають різних умов змішення і інтенсифікації процесу;

- в процесі первинного згущування відбувається порушення стабільності флокул (внаслідок їх руйнування), що приводить до необхідності дофлокуляції і підвищеній витраті флокулянта, що в свою чергу збільшує в'язкість дисперсного середовища і перешкоджає подальшому ефективному зневоднення осаду;

– процеси згущування в центрифuzі пов'язані з гідродинамічним і механічним впливом на флокули, що призводить до їх руйнування і зменшення ефективності очищення шламу і забруднення фугату тонкими фракціями.

Все вищесказане вказує на необхідність встановлення якнайкращих (оптимальних) умов флокуляції і згущування твердої фази полідисперсних шламів залежно від чинників, що впливають на міцність флокул та стабільність дисперсної системи. Серед таких чинників можна виділити наступні:

- гранулометричний склад твердої фази, що впливає на щільність і розмір флокул, їх седиментаційні властивості;
- концентрація дисперсної фази в шламі, що впливає на адсорбцію полімеру і агломерацію частинок, а також седиментаційну стійкість системи;
- умови проведення адсорбції флокулянта і, власне, флокуляції (флокуляція двома порціями, гідродинамічні умови змішення флокулянта з шламом і т.п.);
- умови первинного згущення сфлокульованого шламу у відстійнику, що впливають на збереження міцності флокул в полі гравітаційних сил;
- шляхи мінімізації флокулоруйнівних навантажень в центрифuzі в полі відцентрових сил.

У літературі відсутні чіткі рекомендації з інтенсифікації очищення полідисперсних шламових відходів з урахуванням вищевикладених чинників. На думку багатьох авторів, не дивлячись на величезну кількість публікацій з цього питання, процес флокуляції полідисперсних і тонкодисперсних систем (глинистих і мулових фракцій), а також питання їх стійкості ще не досить вивчені. Проте очевидно, що для оптимізації реагентного режиму важливо дотримувати ряд умов: концентрація розчину флокулянта і його місця подачі в процес повинні бути встановлені з урахуванням концентрації та гранулометричного складу дисперсної фази, турбулентності потоку і впливу механічних чинників на агрегати, що утворилися. Рациональним також є корегування гранулометричного складу дисперсної фази шляхом збільшення вмісту грубодисперсних часток гідравлічною крупністю більше $1,7 \cdot 10^{-3}$ м/с, що, в свою

чергу, сприятиме ефективному флокулоутворенню, тобто укрупненню флокул та налипанню на них тонких фракцій, а також їх активному осіданню.

Таким чином, виявлення закономірностей флокуляції полідисперсних шламів дозволять інтенсифікувати процес очищення шламової суспензії і мінімізувати витрату дорогого флокулянта. Крім того, надмірне застосування флокулянта може привести до збільшення стійкості дисперсної системи, і перешкоджати видаленню вологи з осаду за рахунок збільшення в'язкості і густини дисперсного середовища.

Саме потреба вирішення цих наукових задач обумовила необхідність проведення подальших досліджень. Розглядаючи наукове завдання встановлення відповідних залежностей і чинників, які впливають на ефективну роботу зневоднюючого устаткування з позицій системного підходу, можна виділити основні напрямки дослідження, серед яких головними є:

- експериментально дослідити особливості процесу флокуляції та розділення полідисперсних шламів;
- дослідити вплив різних чинників (концентрації твердої фази, гранулометричного складу твердої фази, гідромеханіки адсорбції флокулянту і утворення агрегатів, ступеня згущення шламу та ін.) на ефективність процесу зневоднення шламу та стійкість утворених флокул під час розділення суспензії на фази у сгущуючому та зневоднюючому устаткуванні;
- дослідити структуру агрегатів-флокул в різних режимах осідання та можливості направленої зміни їх стійкості в полі дії гравітаційних та відцентрових сил;
- розробити рекомендації щодо удосконалення технологічної схеми та апаратного оформлення процесу флокуляції та зневоднення шламових відходів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ШЛАМОВИХ ВОД З ПОЛІДИСПЕРСНОЮ ТВЕРДОЮ ФАЗОЮ

Дослідження процесу розділення шламових вод з полідисперсною твердою фазою проводились в промислових та лабораторних умовах. Під час промислових досліджень виявлялися параметри, які впливають на ступінь видалення твердої фази та ступінь зневоднення полідисперсних суспензій промислових підприємств. Серед таких параметрів вирішальну роль мають умови утворення міцних агрегатів. Для виявлення закономірностей процесу утворення міцних агрегатів і умов, що впливають на процес зневоднення шламів, подальше дослідження флокуляції проводили в лабораторних умовах на модельних суспензіях зі змінними параметрами гранулометричного складу та концентрації твердої фази в суспензіях.

2.1 Методика лабораторних досліджень модельних шламів

2.1.1 Методики дослідження складу шламів

У зв'язку з тим, що флокулоутворення та водовіддача осадів багато в чому залежить від розміру частинок та хімічного складу їх твердої фази, проби шламових вод в лабораторних умовах аналізували на:

- визначення гранулометричного складу і розподілу маси шламу за класами, яке проводились за стандартною методикою (ГОСТ 27707) з використанням віброаналізатора ВА-В01;
- визначення щільності твердої фази шламів, як середньої величини, так і щільності шламів в кожному окремому класі.

При лабораторному дослідженні використовували наступне устаткування і інструменти:

- піч електрична з терморегулятором «Харків 2М»;
- ваги лабораторні Certus “Balans” клас точності 0,05 грам;

- лабораторний мірний циліндр $D = 50$ мм за ГОСТ 1770-79;
- секундомір;
- лінійка 300 мм.

2.1.2 Приготування модельних шламів з контрольованими параметрами

Дослідження закономірностей впливу концентрації твердої фази та гранулометричного складу на утворення флокуляційних структур полідисперсних шламів проводили на модельних шламах з контрольованими параметрами концентрації і дисперсності твердої фази, синтезованих наступним чином. Реальний шлам, взятий на одній з діючих вуглезбагачувальних фабрик, пропускали через сита розміром 40, 60, 80 і 100 мкм і відокремлювали фракції одна від одної. Шлам з класом твердої фази менше 40 мкм згущували відстоюванням і потім освітленою рідиною розбавляли до концентрацій від 3 до 100 г/дм³, необхідних при подальшому дослідженні впливу концентрації твердої фази на процес флокуляції.

Для подальших серій дослідів з вивчення впливу дисперсного складу синтезували шлам із вмістом твердої фази від 3 до 100 г/дм³, до якого додавали середній клас часток твердої фази розміром від 40 до 100 мкм в кількості, необхідній для підтримання частки цього класу від 5 до 30 %. Клас твердої фази розміром більше 100 мкм не представляв інтересу для подальших досліджень, оскільки такі частинки ефективно осідають без застосування флокулянтів. Густина твердої фази шламу складала 1700 ± 30 кг/м³.

2.1.3 Методика проведення досліджень швидкості осадження сфлокульованих полідисперсних шламів

Вимірювання кінетики осадження флокул в режимі вільного (необмеженого) осідання проводилася в лабораторному мірному циліндрі діаметром 50 мм і заввишки 500 мм.

Перед безпосереднім проведенням експерименту були підібрані тип флокулянта і його концентрація. Для кожного зразка шламу дозування флокулянта перераховували на його масову витрату (у грамах) на одиницю маси твердої фази (у тоннах). Для шламу даного виробництва використовували неіоногенний і аніонний флокулянти з сумарною витратою 200 г/т. Температуру рідкої фази у всій серії дослідів складала 15°C та підтримувалась постійною.

При дослідженні кінетики осадження з використанням флокулянту шламом певної концентрації твердої фази (від 3 до 100 г/дм³) і гранулометричного складу (від 0 до 30% вмісту частки твердої фази класу 40 – 100 мкм) заповнювали мірний циліндр та взмучували. Розрахункову кількість розбавленого розчину флокулянту з масовою часткою 0,1 % додавали у верхній шар мірного циліндра (рис. 2.1а). Флокулянт додавали двома порціями. Спочатку вводили неіоногенний флокулянт (стадія адсорбції на поверхні твердої фази) у кількості 20 % від сумарної кількості флокулянтів, а потім залишок 80 % у вигляді аніонного флокулянту (стадія флокулоутворення). Циліндр щільно закривали і перемішували дванадцятиразовим перекиданням. За допомогою секундоміра замірювали проміжок часу, протягом якого межа розділу двох фаз проходить шлях між двома відміченими на циліндрі кільцями. Цей шлях складав 0,4 від висоти циліндра, що відповідає зоні вільного осадження частинок. Потім за одержаними експериментальними даними розраховували швидкість осадження флокул (V_1 , мм/с) як відношення пройденого шляху за час вільного осідання часток:

$$V = \frac{0,4H}{t_i}, \quad (2.1)$$

де H – висота освітленого шару, мм;

t_i – час вільного осідання флокул ($0,4 \cdot H$), с.

Для оцінки міцності флокул до механічних впливів використовувався наступний технологічний тест. Після утворення флокул і їх осідання одразу перемішували сфлокульований шлам мішалкою зі швидкістю на кінці лопаті приблизно 2 м/с впродовж 40 с в прямокутній ємності 120x70 мм (рис. 2.1б). Потім зливали вміст в мірний циліндр і повторно визначали швидкість осадження завислих часток в пробі після механічного впливу. Швидкість осадження флокул після перемішування (далі «залишкова швидкість») також розраховувалася за формулою (2.1). На нашу думку такий тест імітує механічний вплив на сфлокульований шлам під час руху по трубопроводу від апарату згущення (відстійника) до апарату зневоднення (центрифуги). Залишкова швидкість осадження характеризує розмір агрегатів, отже, і міцність флокул по відношенню до механічного впливу. Саме тому в подальшому залишкова швидкість осадження після механічного впливу була позначена як критерій утворення міцних агрегатів – V_2 , мм/с.

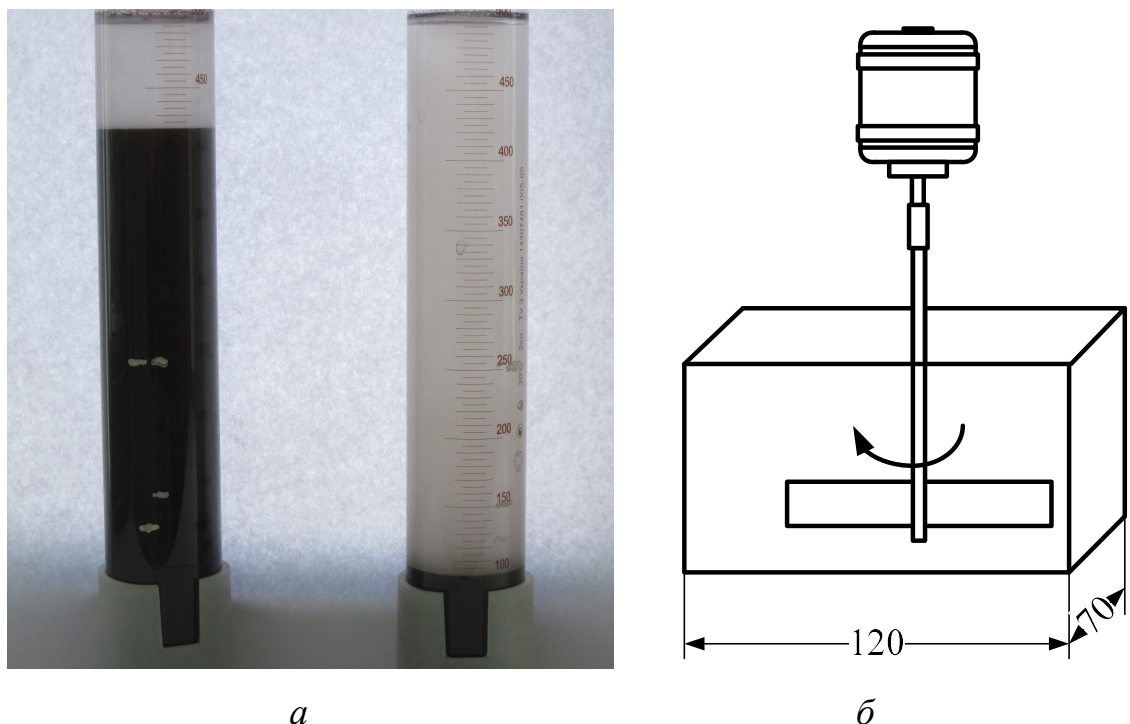


Рисунок 2.1 – Лабораторне устаткування для проведення експериментів:

- a* – мірні циліндри для дослідження швидкості осадження шламу;
- б* – прямокутна ємність з мішалкою для механічного впливу на флокули.

На етапах введення першої порції флокулянта і визначення швидкості осідання флокул до і після механічного впливу на сфлокульовані агрегати відбирали проби шламу, які вивчали під мікроскопом.

Первинні результати експериментів наносилися на графіки в координатах: час осідання флокул – концентрація твердої фази в шламi. Кожна крапка на цих графіках була усередненим значенням результатів трьох-п'яти дослідів. Відносне відхилення експериментальних даних від середнього значення коливалося у інтервалі 0,05 – 0,2 мм/с, але не перевищувало 5 % від середнього значення.

2.1.4 Методика підбору флокулянтів

Час дифузії флокулянта до частинки залежить від концентрації твердої фази в оброблюваних водах, тривалості і інтенсивності перемішування, в'язкості води, молекулярної маси флокулянта, температури і ін.

Для виявленні найкращих умов адсорбції конкретного типу флокулянта були проведені наступні дослідження.

Для модельного шламу з концентрацією твердої фази 30 г/дм^3 зі вмістом частки класу розміром 40 – 100 мкм 15 % вводили неіоногенний та аніонний флокулянт наступним чином. В мірні циліндри зі шламом вводили неіоногенний флокулянт в кількості від 20 до 50 % від необхідної сумарної концентрації (200 г/т). Після перемішування перекиданням вводили залишок аніонного флокулянту відповідно від 80 до 50 % від сумарної кількості. Для порівняння вводили флокулянт одноразово, вливаючи відразу всі 100 % неіоногенного флокулянту. Після флокулоутворення вимірювали швидкість вільного осідання флокул (V_1 , мм/с) та імітували транспортування по трубопроводу перемішуванням і вимірювали залишкову швидкість осідання (V_2 , мм/с) у зоні вільного осадження за описаною в п. 2.1.3 методикою.

2.1.5 Дослідження умов найкращого первинного згущення сфлокульованого шламу у відстійнику

На цьому етапі дослідження синтезували суспензії з концентрацією твердої фази від 10 до 50 г/дм³ із вмістом класу твердої фази 40 – 100 мкм на рівні 15 %. Витрату флокулянта підтримували постійною у межах $C_{\phi} = 200$ г/т.

У мірних циліндрах вводили флокулянт по відпрацьованій методиці (згідно п. 2.1.2 і 2.1.3). Після утворення флокул згущували сфлокульований шлам відстоюванням до концентрації твердої фази 50, 75, 100 і 150 г/дм³. Для цього в процесі осідання флокул і згущення шламу зливали розраховану для даної концентрації частину освітленої рідкої фази в окремий мірний циліндр. Згущений продукт, що залишився, перемішували в ємності з мішалкою протягом 40 секунд і потім змішували з освітленою рідкою фазою, доводячи до первинної концентрації. Після цього визначали залишкову швидкість осадження флокул та робили висновки щодо міцності агрегатів флокул.

Також після механічного впливу на сфлокульовані агрегати відбирали проби шламу, які вивчали під мікроскопом.

2.1.6 Методика дослідження сумарної витрати флокулянтів

Виходячи з того, що швидкість осадження флокул залежать від дози флокулянта і зі збільшенням кількості флокулянта підвищується швидкість осідання агрегатів флокул, необхідно було встановити залежність сумарної витрати флокулянтів від концентрації і дисперсності твердої фази. З цією метою була проведена серія дослідів з визначення швидкості осадження флокул до і після механічного впливу для модельних суспензій з концентраціями твердої фази від 3 до 100 г/дм³ та вмістом класу більше 40 мкм від 0 до 30 % за наступною методикою.

В підготовлену за методикою п. 2.1.2 пробу шламу у мірному циліндрі додавали флокулянт двома порціями неіоногенний та аніонний флокулянти у співвідношенні 20:80 % відповідно в сумарній кількості від 100 до 300 г/т та

визначали за методикою п. 2.1.3 швидкість осідання до та після механічного впливу. За отриманими даними для кожного зразку шламу певної концентрації та гранулометричного складу будували залежність залишкової швидкості осідання флокул від сумарної кількості флокулянту. Ці залежності дозволяли визначити витрату флокулянта для конкретного зразка шламу для досягнення певного значення швидкості осідання флокул.

2.2 Методика промислових досліджень

Дослідження зі зневоднення полідисперсних шламів в заводських умовах на шламах діючих підприємств проводилися на модулі БФЯІ 3400.00.00.000 виробництва ТОВ «НТЦ «Екомаш» [123, 138], фотографії якого під час промислових експериментів наведено на рис. 2.2

При промислових випробуваннях Модуля БФЯІ 3400.00.00.000 зі зневоднення полідисперсних шламів вод різного походження (шлами вуглезбагачення, шлами мокрого газоочищення металургійних підприємств) визначався вплив параметрів роботи устаткування на ефективність виділення твердої фази із шламової суспензії та зневоднення осаду.



а

б

Рисунок 2.2 – Фотографії модуля зневоднення полідисперсного шламу на діючих підприємствах при проведенні промислових експериментів:

а – на промисловому майданчику вуглезбагачувальної фабрики;

б – у цеху металургійного підприємства

При роботі модуля БФЯІ 3400.00.00.000 очищення рідкої фази суспензії від завислих речовин проводиться методом відстоювання в тонкошаровому відстійнику [135]. Інтенсифікація процесів осадження завислих речовин у відстійнику відбувалася за рахунок застосування флокулянтів і попередньої підготовки шламових вод за концентрацією речовин.

Згущений продукт після тонкошарового відстійника зневоднювався в осаджувальних центрифугах типу ОГШ-311Л-01.

Принципова схема ланцюга апаратів Модуля представлена на рис. 2.3.

Робота модуля очищення шламових вод здійснюється таким чином [123, 128, 137, 138]. Шламіві води із вмістом завислих речовин поступають в першу секцію приймально-дозувальної ємності об'ємом 2 м³, в якій вони усереднюються за вмістом завислих речовин. Потім суспензія перетікає у другу секцію об'ємом 1,5 м³, в яку додається перша порція флокулянту зі станції приготування та дозування. Кількість флокулянту розраховується таким чином, щоб його концентрації було недостатньо для утворення флокул.

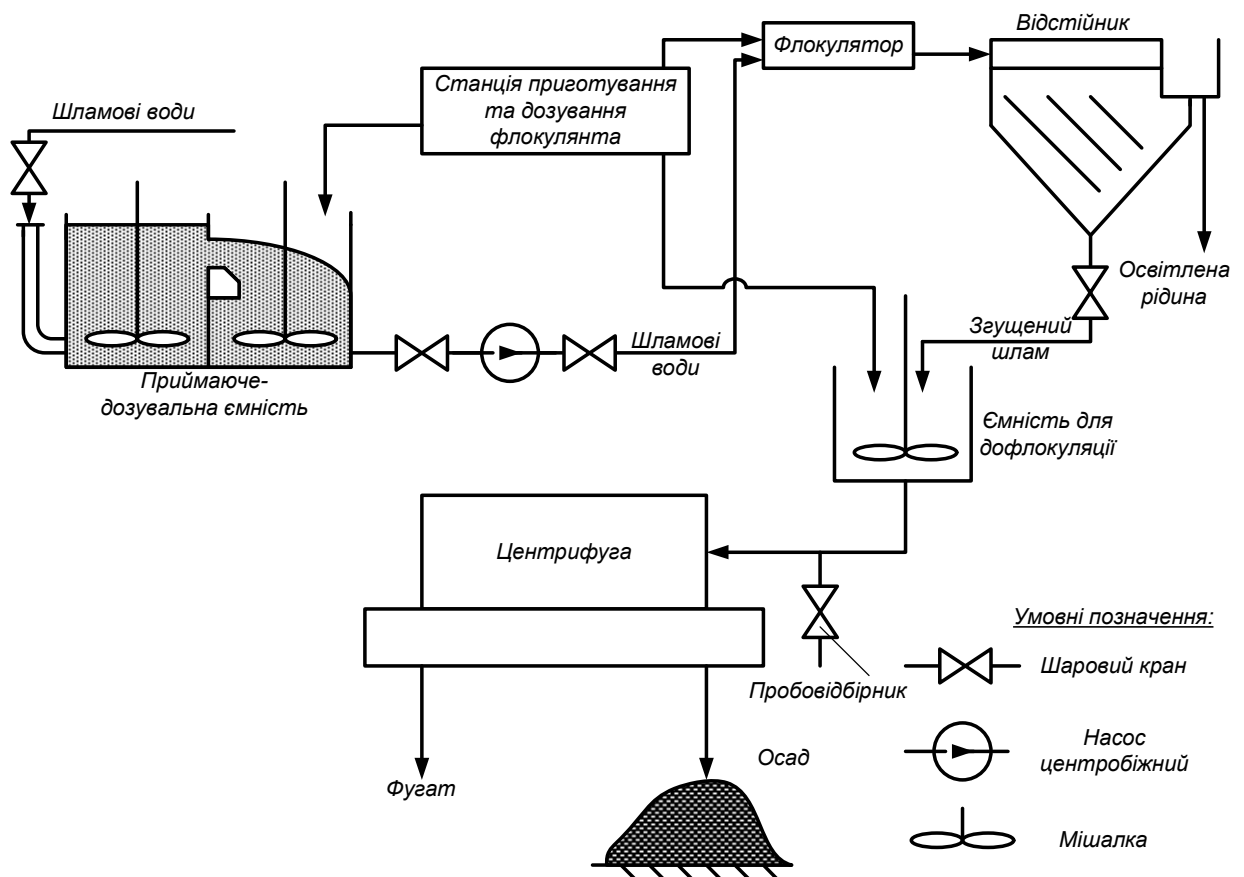


Рисунок 2.3 – Принципова схема ланцюга апаратів Модуля.

Укрупнення завислих часток за рахунок місткової флокуляції проводиться у флокуляторі, куди підготовлені шламові води подаються з певною продуктивністю ($\sim 50 \text{ м}^3/\text{год}$). Разом зі шламом у флокулятор подається друга порція флокулянту, необхідна для утворення агрегатів.

Далі шламові води самопливом потрапляють в тонкошаровий відстійник, в якому вони розділяються на згущений і освітлений продукти.

Освітлений продукт (рідка фаза) повертається у водно-шламову схему виробництва, а згущений продукт відстійника зневоднюється в осаджувальній центрифугі.

Осад центрифуги складається на промисловому майданчику і в залежності від складу використовується у виробництві, направляється на утилізацію або у відвал. Фугат центрифуги змішується з освітленою у відстійнику рідиною або повертається на доочищення у приймально-дозувальну ємність.

Модуль БФЯІ 3400.00.00.000 укомплектований серійними апаратами, що дозволяють перевірити основні процеси очищення шламових вод і зневоднення шламів в умовах підприємства і використовується як пілотна установка з продуктивністю $50 \text{ м}^3/\text{год}$ по шламовій суспензії.

Випробування на Модулі БФЯІ 3400.00.00.000 дозволяють встановити фактичну для даного виробництва і типу суспензії якість очищення шламових вод (ступінь видалення твердої фази), витрати реагентів і електроенергії, а також вологість зневодненого шламу і інші технологічні параметри.

Розчин флокулянта готується в 2-х ємностях об'ємом $12 - 13 \text{ м}^3$. При цьому, одна ємність є витратною, а в другій в цей час йде приготування нового розчину флокулянта. Розчин флокулянта початковою концентрацією $0,05 \%$ готується 2 рази на добу (1 раз в зміну). Перемішування розчину флокулянта відбувається шляхом барботажу повітрям протягом 12 годин. Якість приготованого розчину флокулянта не контролюється. З ємності дозуючим плунжерним насосом приготовлений розчин флокулянта подається в ємність для змішення потоків розчину флокулянта і шламових вод. Приготованого флокулянта ($12-13 \text{ м}^3$) при фіксованій настройці дозуючого насоса ($1,5$

м³/год) на робочу зміну не вистачає. У перебігу зміни в бак готового флокулянта додається вода, що приводить до розбавлення флокулянта і зниженню концентрації до 0,025%.

Промислові дослідження роботи модуля виконувались у декілька етапів. На першому етапі визначалася ступінь видалення твердої фази зі шламових вод в полі гравітаційних сил (у відстійнику-згущувачі) з подальшим зневодненням в полі відцентрових сил (в осаджувальній центрифугі) за наступною методикою.

Після підбору режимних параметрів роботи модуля і подачі шламу після центрифуги періодично відбирали проби фугата і осаду. Фугат досліджували на вміст в ньому твердої фази і визначали ступінь її видалення за формулою:

$$E = \frac{100 \cdot (C_1 - C_2)}{C_1}, \quad (2.2)$$

де C_1 , C_2 – вміст твердої фази у вхідному шлам і фугаті центрифуги, відповідно, г/дм³.

Осад досліджували на залишкову вологість, яку визначали як відношення маси води ($M_{вод}$, г) до загальної маси вологого осаду ($M_{во}$, г) за формулою:

$$w = \frac{M_{вод}}{M_{во}} \cdot 100\%. \quad (2.3)$$

Визначення вологості осаду проводили таким чином. Попередньо прожарювали порцелянову чашку, охолоджували і зважували з точністю до 0,01 г. Наливали в чашку добре перемішаний осад масою близькою до 100 г, зважували осад з чашею на технічних вагах. Чашку з осадом висушували на водяній бані насухо, а потім досушували у сушильній шафі при температурі 105°C до постійної маси. Потім охолоджували та зважували.

Початкову вологість вихідного осаду (w_6 , %) визначали за формулою:

$$w = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_3)} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

де m_1 – маса чашки з вологим осадом, г;

m_2 – маса чашки з висушеним осадом, г;

m_3 – маса порожньої порцелянової чашки, м.

Також під час промислових 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 її в мірні циліндри і заміряли залишкову швидкість осадження флокул. За результатами робили висновки про властивості, реологію згущеного шламу і ефективність очищення і зневоднення шламу.

На другому етапі проводилися промислові випробування і ДКР з підбору якнайкращих умов проведення процесу очищення шламових вод. З цією метою в промислових умовах проводили зміну умов застосування флокулянтів, коректування початкової концентрації і гранулометричного складу твердої фази шламу, впливали мішалкою на шлам до та після флокуляції. Для цього реальні виробничі шлами доводили до певних концентрацій розбавленням, додавали клас більше 40 мкм введенням піску або змішенням шламів з різним гранулометричним складом, змінювали дозування флокулянта.

Результати, одержані при випробуваннях модуля БФЯІ 3400.00.00.000 показали, що достатньо висока ступінь видалення твердої фази шламу в центрифугах досягається при значеннях залишкової швидкості осадження флокул перед центрифугою більшою 2 мм/с. Ця величина показує достатньо високу міцність флокул, що дозволяє провести ефективне згущування шламу в центрифугі. В подальших дослідженнях величина залишкової швидкості осі-

дання флокул після механічного впливу на них була прийнята за критерій утворення міцних агрегатів.

Таким чином, виникає необхідність дослідження закономірностей впливу різних чинників на міцність утворених флокул (критерієм якої може служити значення залишкової швидкості осідання флокул) і виявлення закономірностей її збереження до центрифугування в лабораторних умовах на модельних шламах з контрольованими параметрами (концентрацією і гранулометричним складом шламової суспензії).

2.3 Методика обробки результатів експериментальних досліджень

Для математичної обробки експериментальних даних та визначення адекватності отриманих залежностей застосовували описані у літературі [126, 127, 142, 143] алгоритми розрахунку значень таких показників:

– середнє арифметичне відгуку (результату дослід) X :

$$X = \frac{1}{n} \sum X_i ; \quad (2.5)$$

– одиничне відхилення ΔX_i :

$$\Delta X_i = X_i - X ; \quad (2.6)$$

– перевірка відповідності отриманих відхилень такій умові: $\sum \Delta X_i = 0$;

– квадрати одиничних відхилень: $(\Delta X_i)^2$;

– середня квадратична помилка S_n для n вимірювань:

$$S_n = \sqrt{\sum (\Delta X_i)^2 / (n - 1)} ; \quad (2.7)$$

– середньоквадратична помилка середнього арифметичного відгуку S_X :

$$S_X = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\sum (\Delta X_i)^2 / n(n-1)}; \quad (2.8)$$

– абсолютна похибка результатів вимірювання $\Delta X (E_\alpha)$:

$$\Delta X = E_\alpha = t_\alpha^n \cdot S_x, \quad (2.9)$$

де α – емпірично встановлений коефіцієнт надійності, $\alpha = 0,95$;

t_α^n – табличний коефіцієнт Стьюдента для заданих n та α ;

– відносна похибка E_X :

$$E_X = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%. \quad (2.10)$$

За одержаними результатами будували криві для визначення емпіричних залежностей у вигляді регресійних рівнянь.

Для всіх результатів експериментів спочатку проводився пошук всіх існуючих стандартних видів залежностей, які використовуються при статистичній обробці результатів. Результатами пошуку стали наступні стандартні види залежностей [126, 127, 142, 143]:

– лінійний:

$$\bar{y} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i; \quad (2.11)$$

– експоненціальний:

$$y = e^{a_0 + \sum_{i=1}^n x_i^{a_i}}; \quad (2.12)$$

– ступеневий:

$$\bar{y} = e^{a_0} \prod_{i=1}^n x_i^{a_i} ; \quad (2.13)$$

– логарифмічний:

$$\bar{y} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \ln x_i ; \quad (2.14)$$

– квадратичний:

$$\bar{y} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i^2 ; \quad (2.15)$$

Потім здійснювався вибір із стандартних видів залежностей тих, які можна використовувати при існуючій постановці завдання. Використовуючи вибрані види залежностей визначалися коефіцієнти рівняння множинної регресії. На основі отриманих коефіцієнтів складалися рівняння регресії. Для вибраних видів залежностей визначався коефіцієнт детермінації $R_{yx_i}^2$.

Коефіцієнт детермінації $R_{yx_i}^2$ розраховувався за формулою [127]:

$$R_{yx_i}^2 = \frac{\sum(y - \bar{y})^2 - \sum(y - \bar{y}_x)^2}{\sum(y - \bar{y})^2}, \quad (2.16)$$

де y – фактичне значення результативної ознаки;

\bar{y} – значення загальної середньої результативної ознаки;

\bar{y}_x – розрахункове значення результативної ознаки.

Коефіцієнт детермінації визначає, яка частинка варіації ознаки y враховується в моделі і обумовлена впливом на неї незалежних врахованих чинників. Таким чином, чим вище коефіцієнт детермінації, тим вище та частинка варіації ознаки y , яка враховується в моделі.

Для коефіцієнта детермінації визначалася статистична достовірність [127]

$$\frac{R^2_{yx_i}}{\sigma_R} > 3, \quad (2.17)$$

де σ_R – середньоквадратична помилка, коефіцієнта детермінації яка розраховувалася за формулою [108]:

$$\sigma_R = \frac{1}{\sqrt{n-1}}, \quad (2.18)$$

де n – кількість дослідів.

Якщо нерівність (2.17) вірна, то коефіцієнт детермінації достовірний.

Потім проводився остаточний вибір виду залежності. Критеріями вибору служив найбільший коефіцієнт детермінації.

Висновки до розділу 2

1. Дослідження в промислових умовах дозволяють визначити критерій ефективності видалення твердої фази з суспензії, в якості якого запропоновано залишкову швидкість осідання флокул перед центрифугою (критерій утворення міцних агрегатів).

2. Розроблена методика лабораторних досліджень на модельних шламах дозволяє оцінити якість флокуляції (адсорбції та флокулоутворення) та стійкість утворених агрегатів до механічних впливів.

3. Запропонована методика підбору та дослідження сумарної витрати флокулянтів, що дозволяє визначити найкращі умови проведення флокуляції, а також встановити залежність витрати флокулянту, необхідної для досягнення певного значення критерію утворення міцних агрегатів, від концентрації та дисперсності твердої фази в шламi.

4. Математична обробка експериментальних даних дозволяє виявити залежності критерію утворення міцних агрегатів від незалежних змінних: концентрації та гранулометричного складу полідисперсного шламу.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ УТВОРЕННЯ МІЦНИХ АГРЕГАТІВ ФЛОКУЛ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ШЛАМОВИХ ВОД

3.1 Дослідження ступеня виділення твердої фази в промислових умовах

Результати, одержані при випробуваннях Модуля БФЯІ 3400.00.00.000 зі зневоднення полідисперсних шламових вод різного походження показали, що витрата флокулянтів для хімічного посилення процесів агрегатоутворення у модулі змінюється зі 150 до 300 г/т в залежності від складу шламової суспензії, яка подається. Мінімальна витрата флокулянтів спостерігається при певному співвідношенні гранулометричного і дисперсного складу шламів, а саме: приблизно 30 % частинок типу кварцевого піску розміром 63 – 150 мкм і до 70 % – твердої фази крупністю до 40 мкм, яка представлена глинистими частинками.

Дослідження залежності ступеню виділення в центрифугах твердої фази шламу (рис. 3.1) показали, що достатньо високе значення цього показника досягається при значеннях залишкової швидкості осадження флокул перед центрифугою $V_2 > 2$ мм/с. Для всіх типів шламів незалежно від дисперсного складу і походження ця величина показує достатньо високу залишкову міцність флокул, що дозволяє провести ефективно зневоднення шламу в центрифусі і одержати достатньо чистий фугат.

Значення залишкової швидкості осадження флокул на рівні $V_2 = 2$ мм/с характеризує розмір флокул, що зазнали механічного впливу в процесі транспортування від відстійника до центрифуги. Саме такого розміру агрегатів достатньо для їх ефективного осадження в полі відцентрових сил. З графіка (рис. 3.1) видно, що при менших значеннях залишкової швидкості падає ступінь видалення твердої фази до 30 – 50 % і спостерігається забруднення фугата дрібнодисперсною фазою шламу. Ступінь виділення твердої фази в

центрифузі на рівні 30 – 60 % характерна для шламу без застосування флокулянтів.

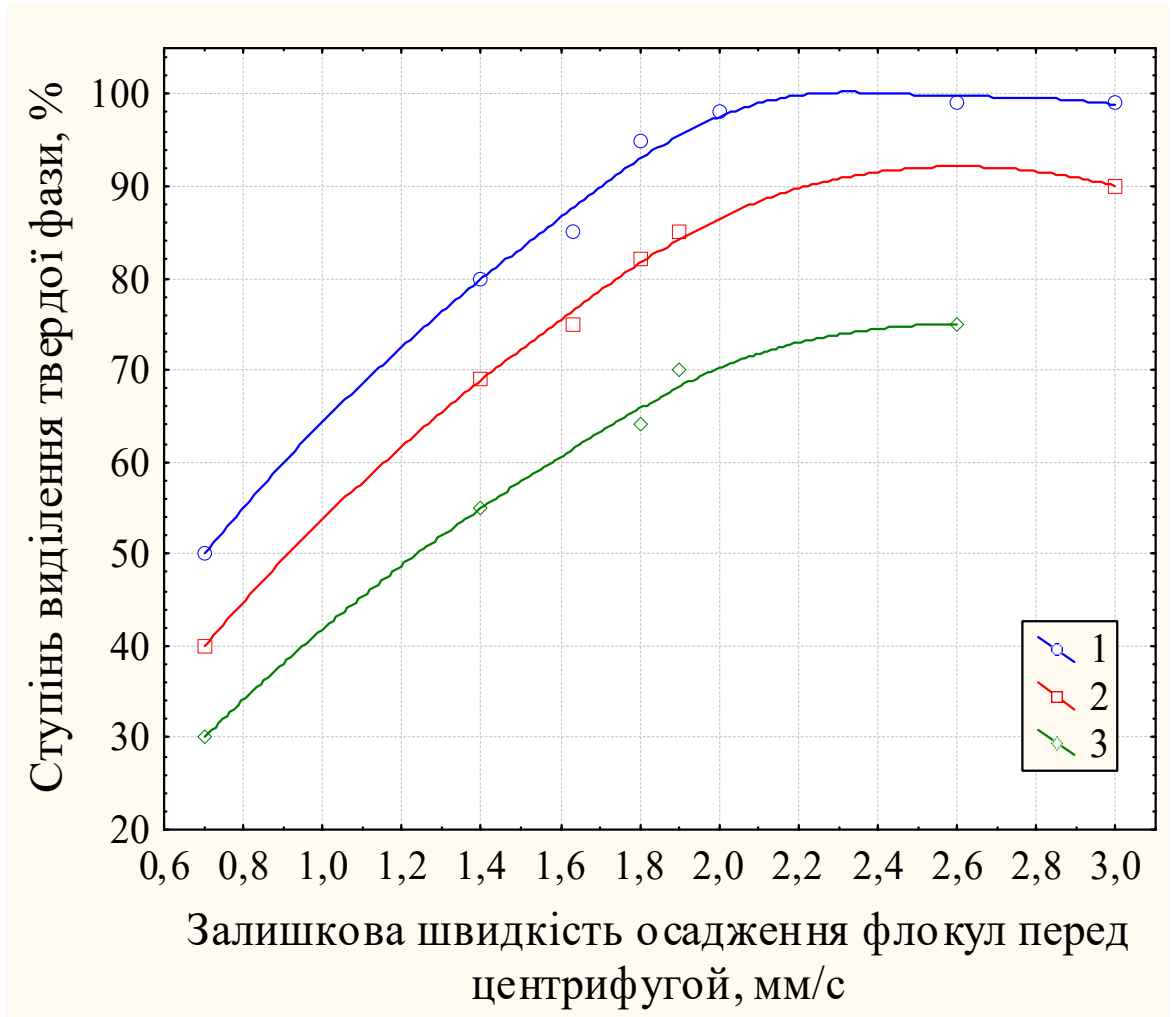


Рисунок 3.1 – Залежність ступеня видалення твердої фази шламу після згущування у відстійнику від швидкості залишкової осадження флокул перед центрифугою: 1 – шлами вуглезбагачувальних фабрик; 2 – шлами мокрого газоочищення металургійного виробництва; 3 – шлами феросплавного цеху.

Отримані залежності свідчать про те, що флокули з меншою залишковою швидкістю перед центрифугою (меншої гідравлічної крупності) не встигають осісти в центрифугу, руйнуються і вивільняють дрібну фракцію, що частково виноситься фугатом. Тобто, якщо не досягається значення залишкової швидкості на рівні 2 мм/с можна стверджувати, що флокули не достатньо міцні. Крім того, при низьких значеннях залишкової швидкості осідання фло-

кул спостерігається така ж сама ефективність роботи модуля, як із застосуванням флокулянтів, так і без.

В той же час можна констатувати, що підвищення залишкової швидкості осідання флокул перед центрифугою віще 2 мм/с в серії промислових експериментів (шляхом підвищення дозування флокулянта, зміни концентрації і гранулометричного складу шламу) не призводили до істотного підвищення ступеня видалення твердої фази та ефективності роботи модуля. Цей факт свідчить про те, що гідравлічної крупності флокул на рівні 2 мм/с достатньо для швидкого осадження в центрифугі, а збільшення розміру агрегатів не впливає на якість зневоднення шламу, оскільки вже досягнута максимальна ефективність роботи центрифуги. Таким чином, залишкову швидкість осадження флокул перед центрифугою можна прийняти за критерій утворення міцних агрегатів (УМА).

Як показано у розділі 1, в літературі не висвітлені питання підвищення міцності флокул виникає необхідність дослідити фактори, які впливають на цей показник в лабораторних умовах. Головною метою лабораторних дослідів було виявлення напрямків підвищення міцності сфлукуюваних агрегатів (значень критерію УМА) за рахунок створення найкращих умов абсорбції полімеру на твердих частках або флокулоутворення.

3.2 Результати дослідження кінетики осадження твердої фази реального (відібраного на підприємстві) шламу

На першому етапі експериментальних досліджень кінетики осадження твердої фази полідисперсних суспензій на одній з діючих вуглезбагачувальних фабрик були відібрані зразки шламів різного дисперсного складу. Використовувалися два зразки шламових вод: зразок №1 – шламові води від обмивання стрічок транспортерів після транспортування розмокшої породи в бункери збору породи із вмістом твердої фази до 120 г/дм³; зразок № 2 – згущений продукт останньої батареї гідроциклонів водношламової схеми збагачення фабрики із вмістом твердої фази до 130 г/дм³.

Кожний із зразків був розділений на три частини і кожен частину проби розбавленням доводили до концентрацій твердої фази 60, 70 і 80 г/дм³ відповідно.

На цьому етапі були проведені наступні дослідження:

1) визначення кінетики осадження твердої фази для зразків №1 і №2 при концентраціях 60, 70 та 80 г/дм³ без застосування флокулянтів;

2) визначення кінетики осадження твердої фази для зразків №1 і №2 при концентраціях 60, 70 та 80 г/дм³ з подальшим введенням рекомендованого для даного типу шламу аніонного флокулянта Есофлос А-19 різного дозування.

Гранулометричний склад твердої фази зразків шламу збагачувальної фабрики і зольність кожного класу представлені на рис. 3.2.

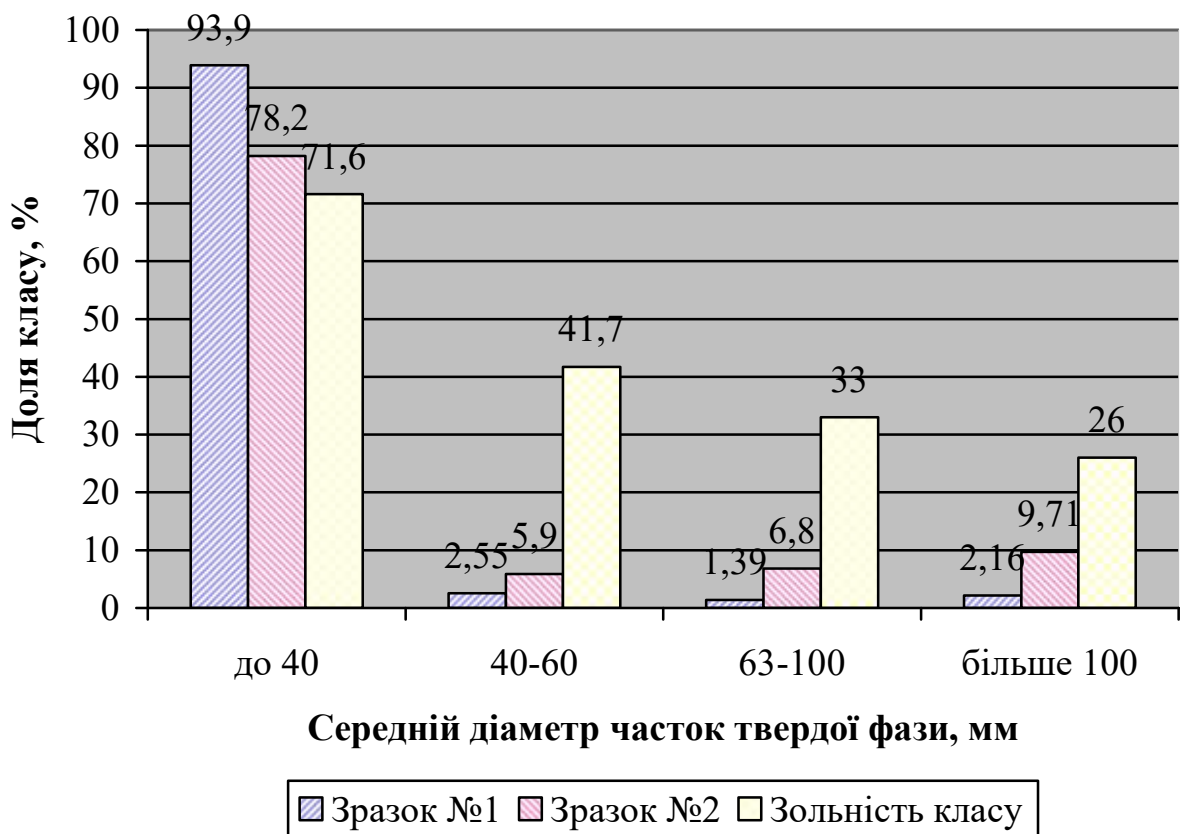


Рисунок 3.2 – Гранулометричний склад твердої фази зразків %: зразок №1 – змив із стрічок порідних конвеєрів; зразок №2 – згущений шлам схеми збагачення фабрики

З діаграми видно, що зразок шламу №1 більш ніж на 90 % складається із дрібнодисперсних часток твердої фази (клас менше 40 мкм), що відрізняється високою зольністю (переважно глинисті частинки). Зразок шламу №2 містить 22 % частинок твердої фази розміром більше 40 мкм.

Процес осадження в природних умовах (без додавання флокулянту) проводили в мірних циліндрах об'ємом 500 мл на протязі двох годин з реєстрацією рівня освітленої рідини кожні 10 хвилин. Дослідження кінетики осадження в полі гравітаційних сил (рис. 3.3) показало, що швидкість осідання твердих часток шламу при різних початкових концентраціях обох зразків зменшується із зростанням концентрації твердої фази, що відповідає класичним уявленням про обмежене осадження.

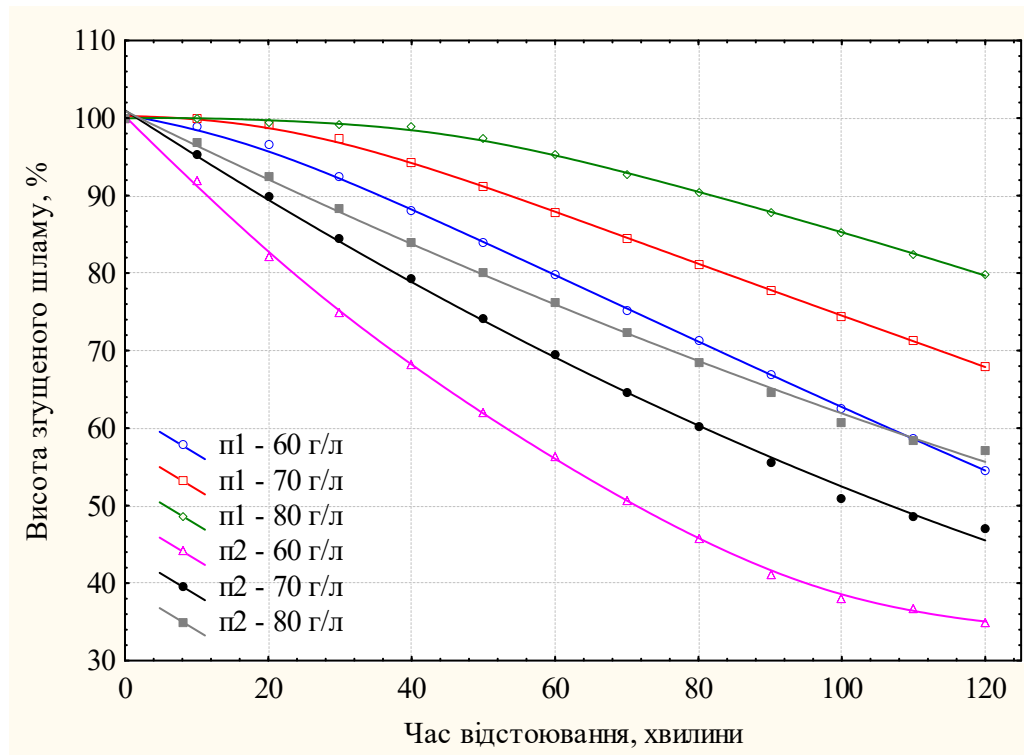
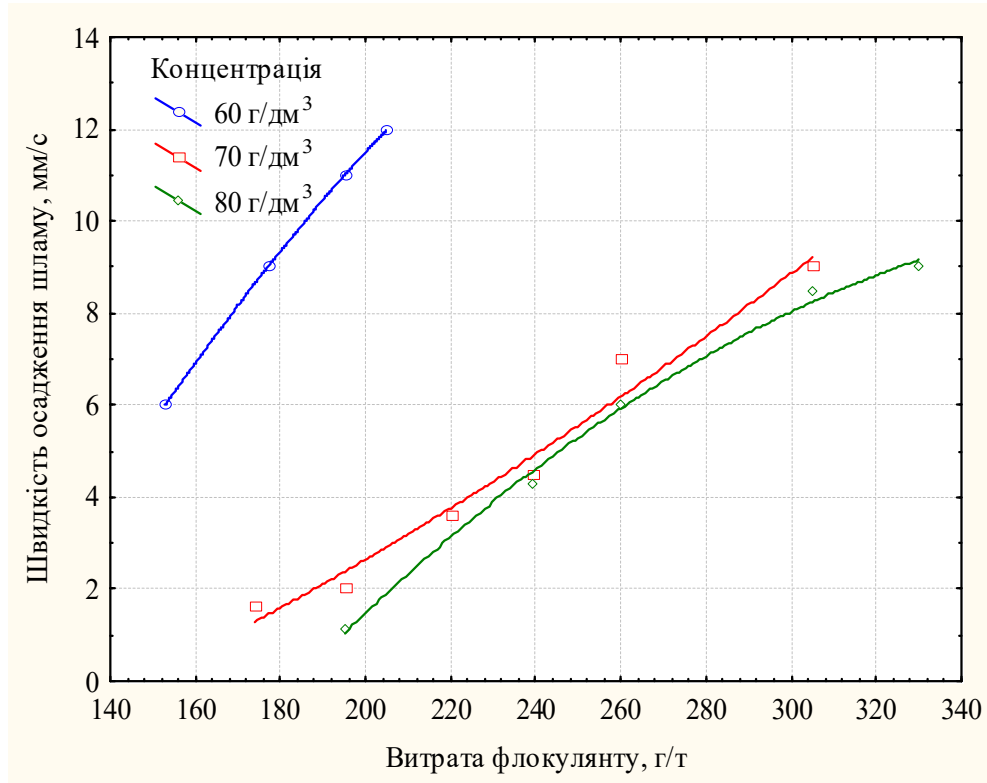


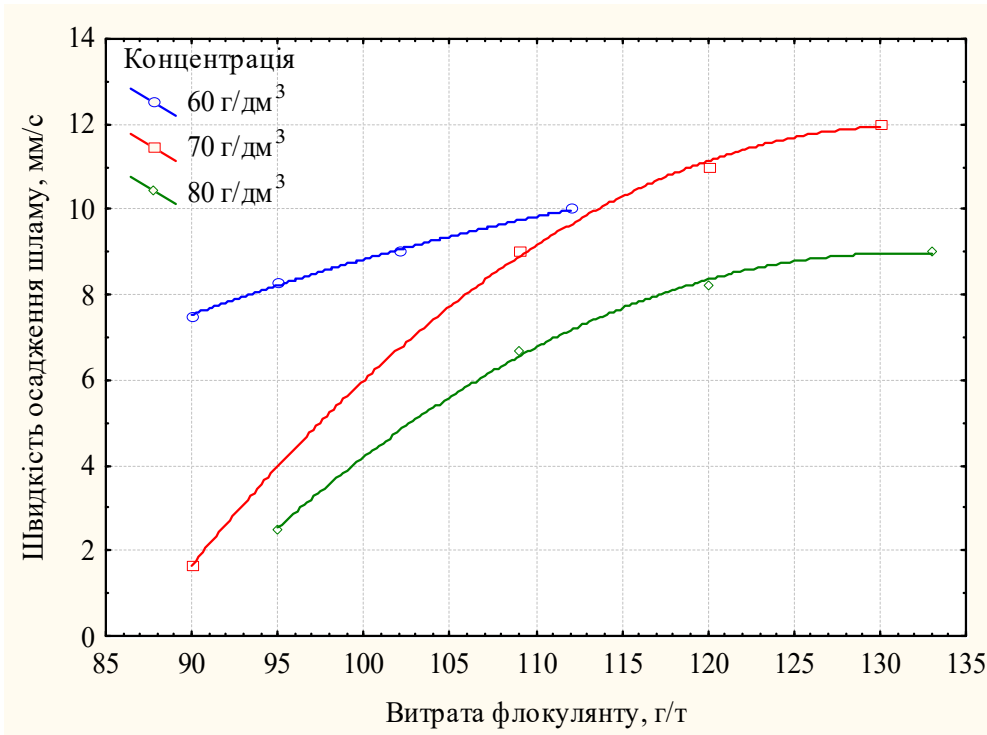
Рисунок 3.3 – Кінетика осадження зразків шламу:
п1 – зразок шламу №1; п2 – зразок шламу №2.

Аналіз даних для зразків шламу №1 і №2 показує також, що швидкість осадження частинок шламу залежить від дисперсного складу. Чим менше частинки дисперсної фази (проба №1), тим менша їх швидкість осадження, що також відповідає класичним представленням теорії осадження.

Дослідження процесу осадження полідисперсних суспензій зразків шламу №1 і №2 із застосуванням флокулянта представлені на рис. 3.4а і 3.4б.



а – кінетика осадження проби шламу №1



б – кінетика осадження проби шламу №2

Рисунок 3.4 – Залежність швидкості осадження флокул від дози флокулянта для зразків шламу №1 і №2

В процесі утворення флокул відбувається усереднювання розміру агрегатів, оскільки основна їх маса (близько 90 %) має приблизно однакові розміри. Це дозволяє перетворити полідисперсну систему на монодисперсну і шляхом використання флокулянтів отримати майже однакову швидкість осадження різних за складом і концентрацією суспензій.

Із зростанням концентрації флокулянта зростає швидкість осадження флокул, що говорить про їх укрупнення (утворенні флокул 2-го порядку).

В той же час можна бачити (рис. 3.4), що витрата флокулянту на одиницю маси твердої фази залежить як від дисперсного складу шламу, так і від його концентрації. Шлами однієї концентрації але різного дисперсного складу при однаковій витраті флокулянту мають різні швидкості осадження флокул. Зростання частки класу твердої фази розміром менше 40 мкм вимагає більшої витрати флокулянта для початку флокулоутворення, ніж для суспензії з тією ж швидкістю такої ж концентрації, що містить велику частку крупнішого класу (більше 40 мкм).

Вірогідно, це явище можна пояснити більшою площею поверхні розділу фаз у дрібнодисперсному шламi ніж у грубо дисперсному. Це з одного боку вимагає більшої кількості флокулянта для адсорбції на поверхні дрібних часток. З іншого боку, більша поверхня розділу фаз підвищує в'язкість середовища за рахунок гідратних плівок, які оточують дрібні частки твердої фази, що ускладнює дифузії молекул флокулянта та подальшу його адсорбцію.

Крім того, агрегати флокул дрібнодисперсного шламу, що утворилися, мають менші розміри і відповідно меншу швидкість осідання. Для подальшого укрупнення до розмірів, що забезпечують більшу швидкість осідання (утворення флокул 2-го порядку) потрібна додаткова доза полімеру.

Порівняльна характеристика кількості флокулянта, необхідного для досягнення однієї і тієї ж швидкості (наприклад, 9 мм/с), а отже, і однакового розміру агрегатів, наочно представлена на рис. 3.5.

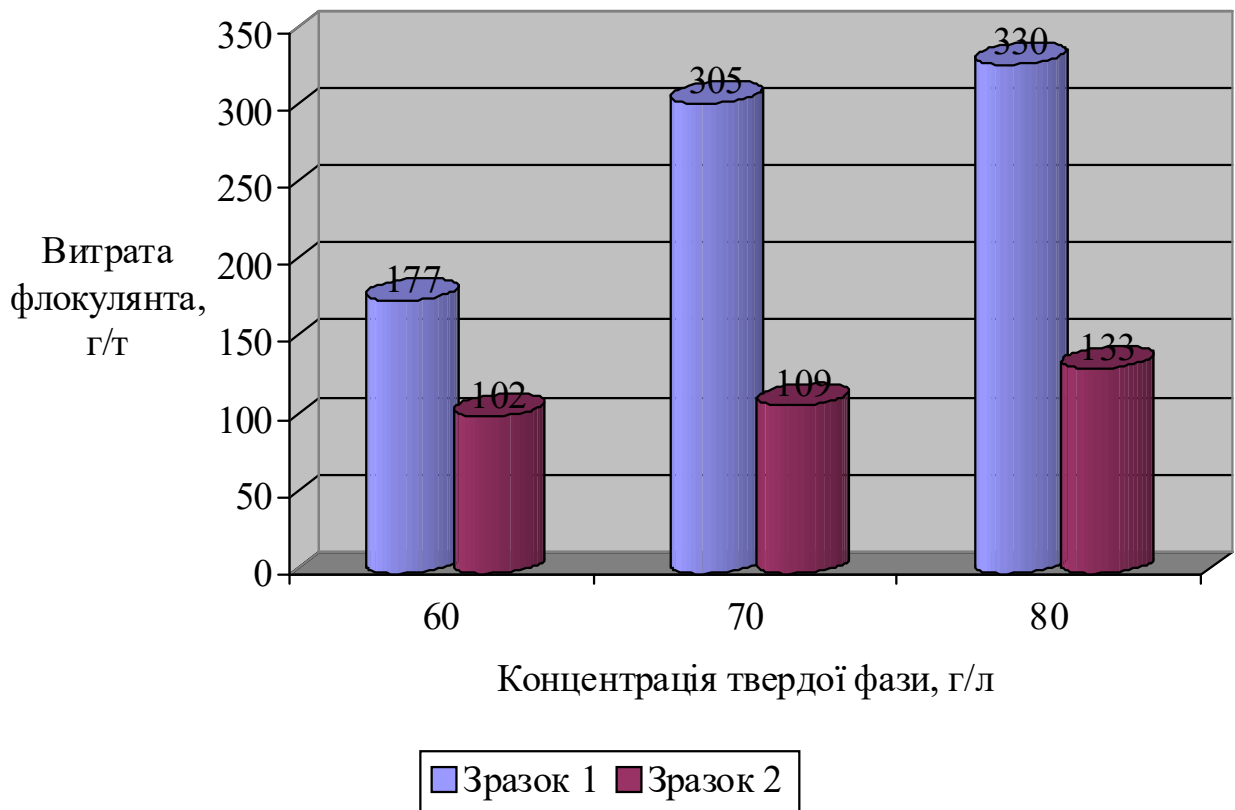


Рисунок 3.5 – Порівняльна характеристика витрати флокулянта (г/т) для зразків шламу №1 і №2, необхідного для досягнення швидкості 9 мм/с

Аналіз представлених на рис. 3.5 даних показує, що для утворення флокул з однаковою швидкістю осідання витрата флокулянта для проб № 1 і № 2 може відрізнятися в 3 рази (наприклад, при концентрації 70 г/дм³, середній стовпець рис. 3.5), хоча частка класу більше 40 мкм в зразках шламу відрізняється всього на 15 % (згідно рис. 3.2). Така непропорційна залежність може свідчити про відмінність не тільки у розмірі флокул, але і структурі агрегатів, утворених різними фракціями. Ймовірно, крупніша фракція (більше 40 мкм) активніше утворює крупні агрегати без додаткової витрати флокулянта, виступаючи флокулоутворювачем і активно агрегуючі дрібні частинки на своїй поверхні.

Інтерес викликає той факт, що із зростанням концентрації твердої фази одного і того ж за дисперсним складом шламу (проба №1 або проба №2) та-

кож збільшується витрата флокулянта в 1,5-2 рази для проби №1 і приблизно в 1,3 разу для проби №2. Ймовірно, при високій концентрації твердої фази процес дифузії полімеру в об'ємі ускладнений і адсорбція флокулянта на поверхні твердих частинок відбувається нерівномірно (утворення згустків флокулянту). В результаті цього агрегати утворюються лише з певної частини твердої фази. Причинами цього може бути збільшення в'язкості середовища зі зростанням концентрації твердої фази або стохастичний характер розподілу макромолекул флокулянту.

Таким чином, результати дослідження свідчать про існування оптимуму для процесу флокуляції і агрегатоутворення залежно від дисперсного складу і концентрації твердої фази в суспензії. Тобто, простим розбавленням початкового шламу до певної концентрації можна скоротити витрату флокулянту у декілька разів. Наприклад, у пробі №1 при розбавленні шламу з концентрації твердої фази 80 до 60 г/дм³ витрата флокулянта для досягнення швидкості осідання 9 мм/с зменшується майже в 2 рази. Іншим шляхом інтенсифікації утворення крупних агрегатів може бути коректування дисперсного складу шламу шляхом додавання в нього дисперсного матеріалу, що складається з частинок крупнішої більшого розміру, замість введення додаткової дози флокулянта.

Пошук шляхів оптимізації процесу флокуляції з метою зниження витрати дорогих реагентів залежно від дисперсного складу і концентрації шламу був предметом подальших досліджень.

Таким чином, в ході лабораторних досліджень зразків шламу різного гранулометричного складу і концентрації було встановлено:

– присутність класу розміром більше 40 мкм в кількості 22 % за масою в зразку №2 проти 6,1 % аналогічного класу в зразку №1 помітно збільшило швидкість осадження як твердої фази без додавання флокулянтів, так і сфлукуюваних агрегатів;

– при однаковій концентрації твердої фази у зразках №1 і №2, що відрізняються між собою лише гранулометричним складом, доза полімеру для до-

сягнення приблизно однакової швидкості осадження відрізняється майже в три рази (наприклад, при концентраціях 80 і 70 дм^3) і в 1,7 разів при концентрації 60 г/дм^3 ;

– при однаковому дисперсному складі шламу дозування флокулянта істотно збільшується із зростанням концентрації твердої фази в шламі (у 2 рази для проби №1);

– перспективними напрямками інтенсифікації процесу флокуляції і зменшення витрати полімеру є коректування шламу за концентрацією і дисперсному складу шляхом розбавлення до оптимальної концентрації твердої фази або добавки класу розміром більше 40 мкм.

Дані висновки вимагають додаткових експериментальних досліджень зі встановлення закономірностей впливу дисперсного складу та концентрації твердої фази на процес флокулоутворення. Для подальших лабораторних досліджень були зроблені наступні пропозиції:

– синтезувати модельний шлам з контрольованим гранулометричним складом з часткою класу більше 40 мкм від 0 до 30 %;

– розширити інтервал дослідження полідисперсних шламів за концентрацією від 3 до 100 г/дм^3 ;

– дослідити умови введення та тип флокулянта на флокулоутворення і міцність флокул;

– виявити закономірності зміни міцності утворених флокуляційних структур та розробити шляхи інтенсифікації процесу осадження твердої фази.

3.3 Результати дослідження процесу флокуляції полідисперсних шламів

Для досліджень був синтезований шлам з контрольованими параметрами за методикою, описаною в пункті 2.1 та проведені відповідні дослідження у декілька етапів.

Результати досліджень впливу умов введення флокулянта на міцність утворених агрегатів (рис. 3.6 на прикладі шламу з концентрацією твердої фази 30 г/дм^3 та вмістом класу більше 40 мкм 15%) показали, що для даного типу полідисперсного шламу найбільш ефективним є наступне поєднання флокулянтів: 20% неіоногенний і 80% аніонний флокулянти. Сумарна кількість флокулянтів у дослідях, наведених на рисунках складала 200 г/т твердої фази.

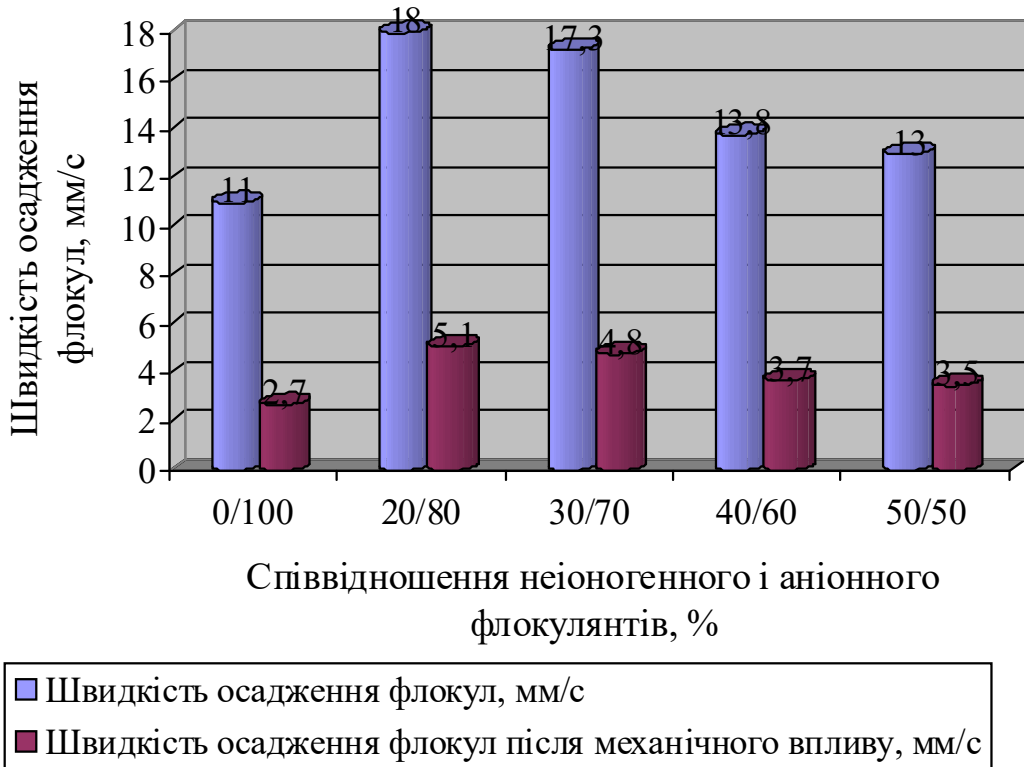


Рисунок 3.6 – Залежність швидкості осадження флокул до і після механічного впливу від співвідношення неіоногенного і аніонного флокулянтів

При введенні 100% аніонного флокулянта, рекомендованого для даного вугільного шламу, швидкість осадження флокул виявляється найменшою. Причому, як до механічного впливу, так і після нього. Підвищення дози неіоногенного флокулянта не призводить до подальшого підвищення ефективності флокулоутворення і збереженню стійкості утворених агрегатів до механічного впливу. Тому в подальших дослідженнях було прийняте співвідношення флокулянтів $20:80\%$.

Аналіз результатів дослідження, представлених на рис. 3.6, дозволяє судити про те, що флокуляція одноразовим введенням флокулянта має найменшу ефективність. Ймовірно, це пов'язано з механізмом флокуляції, який, як відомо, включає дві стадії: адсорбцію полімеру до поверхні частинок і потім утворення агрегатів за рахунок місткової флокуляції. Різні стадії вимагають і різних умов їх проведення. Використання неіоногенного флокулянта з низькою концентрацією в першій порції сприяє більш ефективній дифузії до поверхні розділу фаз та адсорбції без утворення флокул (можливо через те, що на дифузію неіоногенного флокулянта не здійснює вплив заряд часток). Чим ефективніше протікає цей етап, тим міцніше утворюються флокули. Потім аніонний полімер сприяє агрегації частинок, покритих адсорбованим на них неіоногенним полімером.

На наступному етапі експериментальних досліджень визначалась швидкість осідання сфлокульованого шламу з різними дисперсним складом та концентрацією твердої фази до і після механічного впливу.

Результати досліджень швидкості осадження флокул від концентрації твердої фази в шлам і вмісту класу більше 40 мкм в інтервалі 0-30 % (значення ліній на графіку) наведені на рис. 3.7.

З графіків видно, що із зростанням концентрації твердої фази ефективність флокуляції падає і оптимум для осадження флокул в полі гравітаційних сил знаходиться в інтервалі 20 – 50 г/дм³ при однаковій концентрації флокулянта.

В той же час із збільшенням вмісту середнього класу (40 – 100 мкм) твердої фази в шлам з 10 – 30 % істотно збільшується швидкість освітлення шламу.

Спостерігається утворення крупних агломератів з достатньо великою швидкістю осідання (більше 10 мм/с), що підтверджують і фотографії флокул, представлені на рис. 3.8.

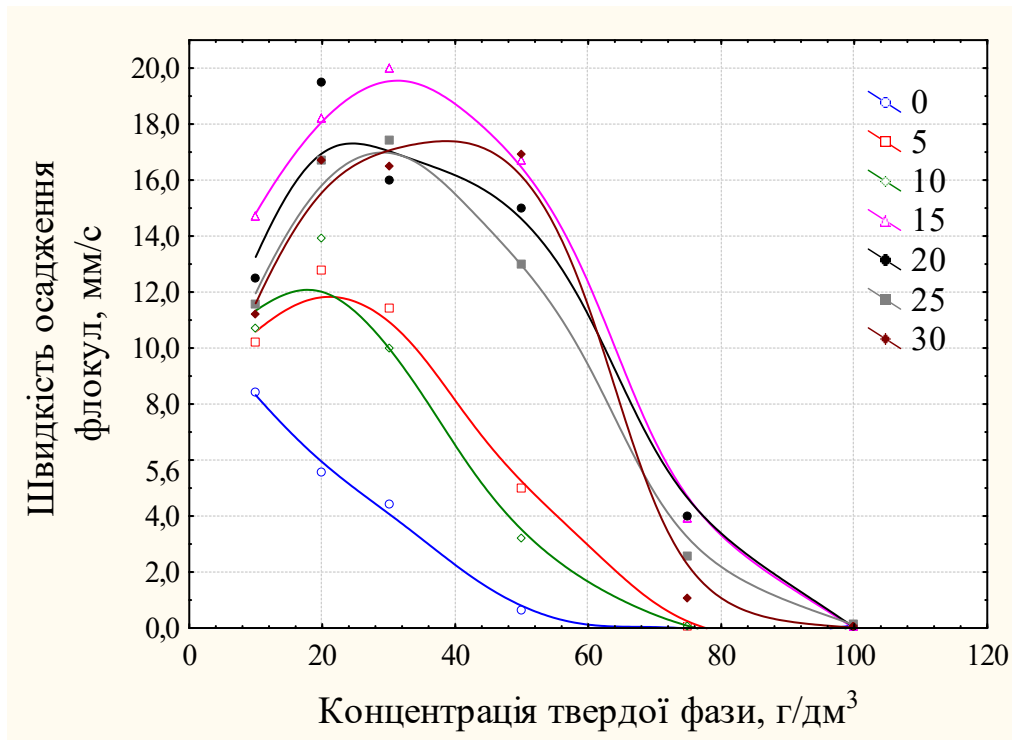


Рисунок 3.7 – Залежність швидкості осадження флокул від концентрації і дисперсного складу твердої фази в шламі: крапки на графіку – результати лабораторних дослідів; лінії на графіку – згладжена лінія розкиду експериментальних значень; позначення на лініях – частка вмісту твердої фази класу розміром більше 40 мкм, %

Із зростанням концентрації понад 60 г/дм³ замість стійких агрегатів утворюються флокули розпливчатої ниткоподібної форми рис. 3.9, а, б, які мають чіткі контури із зростанням концентрації класу твердої фази більше 40 мкм рис. 3.9, в, г.

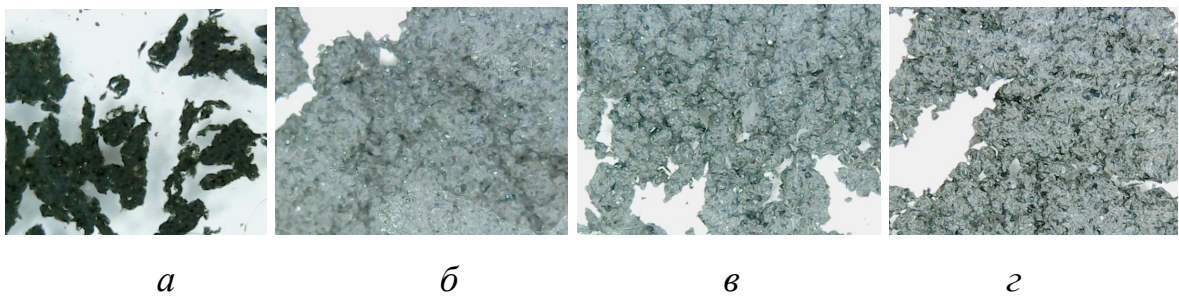


Рисунок 3.8. Фотографії утворених флокул при концентрації 20 г/дм³ і вмісті в шламі класу більше 40 мкм, %: а – 0, б – 10, в – 20, г – 30

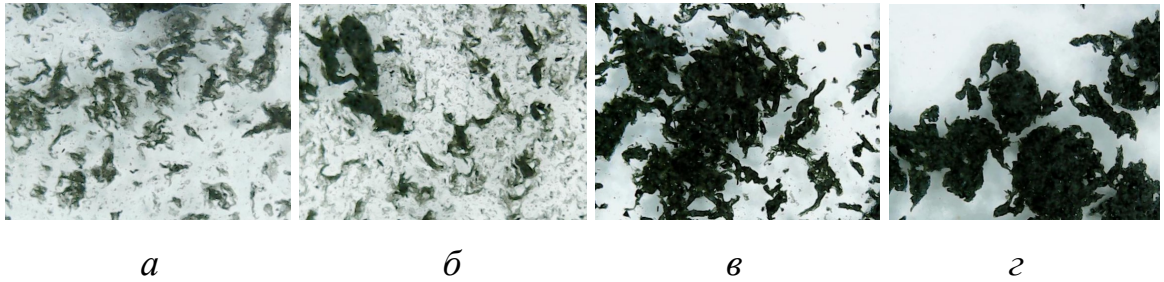


Рисунок 3.9 – Фотографії утворених флокул при концентрації 75 г/дм^3 і вмісті в шламi класу більше 40 мкм , %: *a* – 0, *б* – 10, *в* – 20, *г* – 30

Згідно уявленням про процес флокуляції утворення агрегатів за ортокинетичним механізмом відбувається в два етапи: адсорбція полімеру на поверхні частинки і потім місткоутворювання між частинками. При низьких концентраціях твердої фази флокулянт розподіляється рівномірно в об'ємі дисперсного середовища і добре адсорбується на поверхні твердих частинок. Підвищення концентрації твердої фази, скоріше за все, призводить до нерівномірного розподілу полімеру на поверхні частинок, зближення яких сприяють початку другого етапу – агрегації частинок. Це призводить до утворення неміцних зв'язків і відповідно нестійких флокул, що руйнуються при механічному впливі. В той же час при низьких концентраціях на одиницю площі розподілу фаз (на кожну частинку) доводиться більше макромолекул полімеру, що збільшує міцність зв'язку частинок в структурі агрегату.

Як показали дослідження, важливу роль в процесі утворення стійких до механічного впливу агрегатів грає також структура утворених флокул, яка залежить від присутності середнього класу (крупніших за розміром частинок). Очевидно, за рахунок більшої поверхні, такі частинки адсорбують більше макромолекул полімеру, а також ефективніше захоплюють дрібніші частинки, виступаючи флокулоутворювачими. За рахунок більшої маси і адсорбційної поверхні класу більше 40 мкм агрегує дрібні частинки з утворенням міцніших зв'язків, ніж при об'єднанні дрібних (розміром менше 40 мкм) частинок між собою.

Фотографії, зроблені на всіх етапах флокуляції, представлені на рис. 3.10, показують, що при однаковій концентрації твердої фази за наявності класу більше 40 мкм ще на першій стадії (після введення неіоногенного флокулянта) формуються яскраво виражені зародки майбутніх агрегатів (рис. 3.10, фотографії при 15-30 % класу більше 40 мкм). У відсутності середнього класу – просто скупчення невеликих згустків твердої фази (рис. 3.10, фотографії при 0 % класу більше 40 мкм).

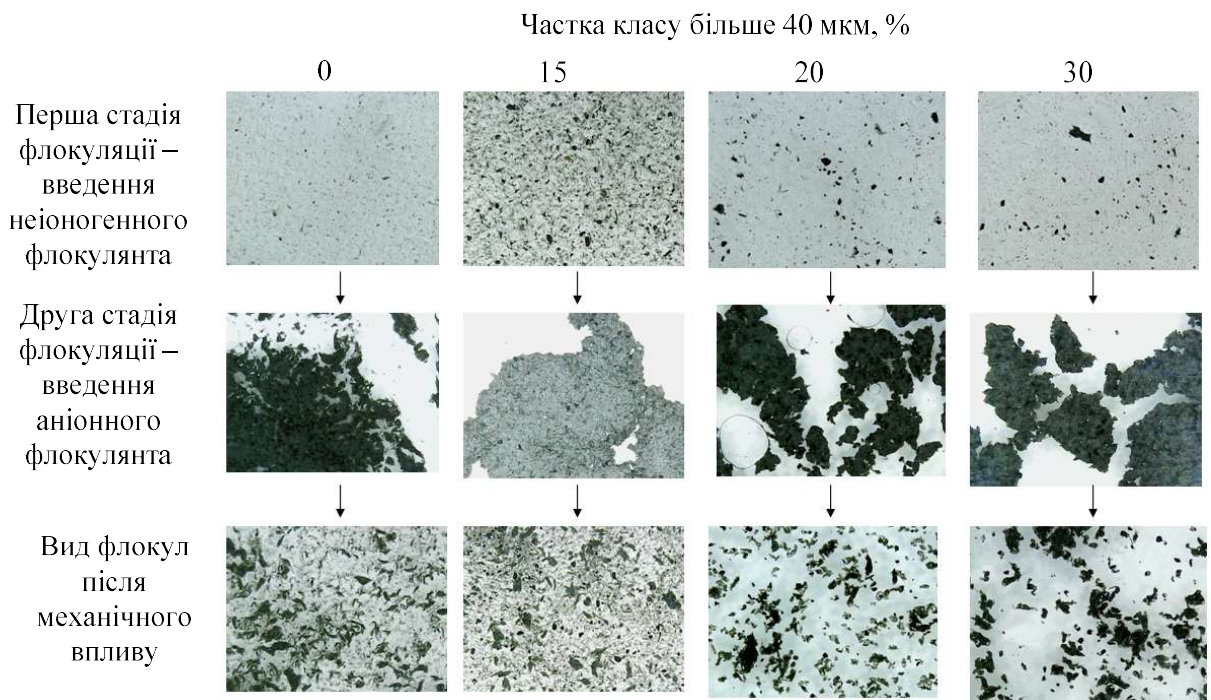


Рисунок 3.10 – Фотографії флокул після введення неіоногенного та аніонного флокулянтів до і після механічного впливу при концентрації 30 г/дм^3

Аналіз результатів дослідження (рис. 3.10), дозволяє судити про наступний механізм утворення флокул: адсорбція полімеру на поверхні частинок і потім утворення агрегатів за рахунок місткової флокуляції. При одній і тій же концентрації шламів з різним дисперсним складом спостерігається наступна особливість процесу утворення агрегатів. На першому етапі (введення неіоногенного флокулянта, див. рис. 3.10 верхні фотографії) відбувається утворення зародків агрегатів і мікрофлокул. За наявності частинок більшого розміру, які рухаються в рідині, створюється градієнт швидкості, пропорційний

масі частинок, що дозволяє крупнішій частинці ефективніше (з більшою вірогідністю) стикатися з дрібними частинками за рахунок різниці швидкостей руху. Тому агрегація дрібних частинок з крупними у присутності класу більше 40 мкм сприяє швидкому зменшенню кількості вільних дрібних частинок в об'ємі рідкої фази і утворенню чистої освітленої рідкої фази. Це явно видно при порівнянні фотографій флокуляції тільки дрібнодисперсних шламів з шламами, в яких присутній клас більше 40 мкм на рівні 20 – 30%.

На другому етапі процесу (місткова флокуляція, див. рис. 3.10 середні фотографії) при вводиті аніонного флокулянта відбувається агрегація частинок і утворення макрофлокул. Характерним є те, що при подальшому механічному впливі на утворені флокуляційні структури (див. рис. 3.10 нижні фотографії) відбувається їх руйнування з утворенням вторинних флокул при вмісті класу більше 40 мкм вище 15% з достатньо високою залишковою швидкістю осадження (більше 2 мм/с). У відсутності крупних частинок агрегати флокул практично повністю руйнуються з утворенням ниткоподібних згустків без повторного відновлення флокул.

Таким чином, отримані результати дозволяють судити про структуроутворюючу функцію крупніших за розміром частинок. Внесення в шлам додаткового грубодисперсного класу дозволяє запобігти повному руйнуванню флокул і одержати міцні до механічних впливів агрегати з достатньо високою залишковою швидкістю осідання. Уточненню залежності стійкості утворених флокул після механічного впливу на них від концентрації та гранулометричного складу шламу присвячені подальші дослідження.

3.4 Дослідження залишкової швидкості осідання флокул після механічного впливу

Практичний інтерес представляє швидкість осадження сфлокульованого шламу після механічного впливу, який імітувався перемішуванням мішалкою в прямокутній ємності протягом 40 с згідно методики, викладеної в п. 2.1.

В результаті дослідження було виявлено, що при однаковій концентрації флокулянту залишкова швидкість осадження флокул після механічного впливу (критерій УМА) залежить від початкової концентрації і дисперсного складу шламу. Причому спостерігається підвищення значень критерію утворення міцних агрегатів в інтервалі концентрацій 3 – 10 г/дм³, потім поступове зменшення значення критерію УМА в інтервалі 10 – 50 г/дм³ та подальший різкий спад міцності флокул в інтервалі 50 – 100 г/дм³. Така динаміка схожа на залежності, отримані для швидкості осідання шламу до механічного впливу і наведені на рис. 3.7. Проте спостерігаються відсутність прямої залежності критерію УМА від швидкості осідання флокул до механічного впливу. З одного боку, залишкова швидкість завжди має нижче значення за рахунок руйнації флокул і зменшення їх розміру та змінення структури. З іншого боку, на який відсоток зменшиться швидкість осідання після механічного впливу залежить тільки від концентрації твердої фази та дисперсного складу і коливається на рівні від 30 до 80 % втрати швидкості.

В інтервалі концентрацій твердої фази 3 – 10 г/дм³ (рис. 3.11) при всіх варіантах вмісту класу більше 40 мкм) спостерігається близьке до лінійного зростання залишкової швидкості осідання флокул із зростанням концентрації з максимумом критерію УМА при 10 г/дм³. Це свідчить про найбільш сприятливі умови утворення міцних агрегатів

Фотографії флокул після механічного впливу на рис. 3.12 показують, що найбільш крупні флокули з чіткими контурами і прозорою рідкою фазою утворюються при вмісті класу 40 мкм більше 10 % і концентрації твердої фази в межах 7 – 10 г/дм³.

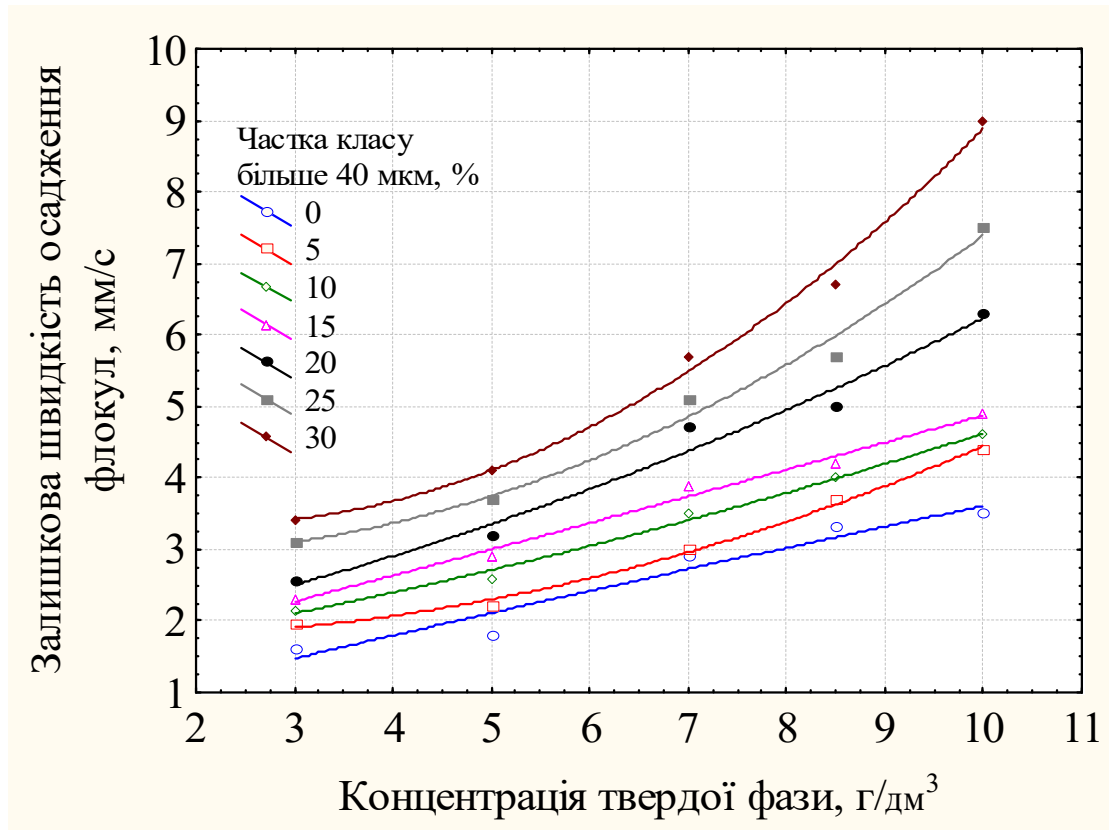


Рисунок 3.11 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації і дисперсності твердої фази в інтервалі концентрацій твердої фази 3 – 10 г/дм³

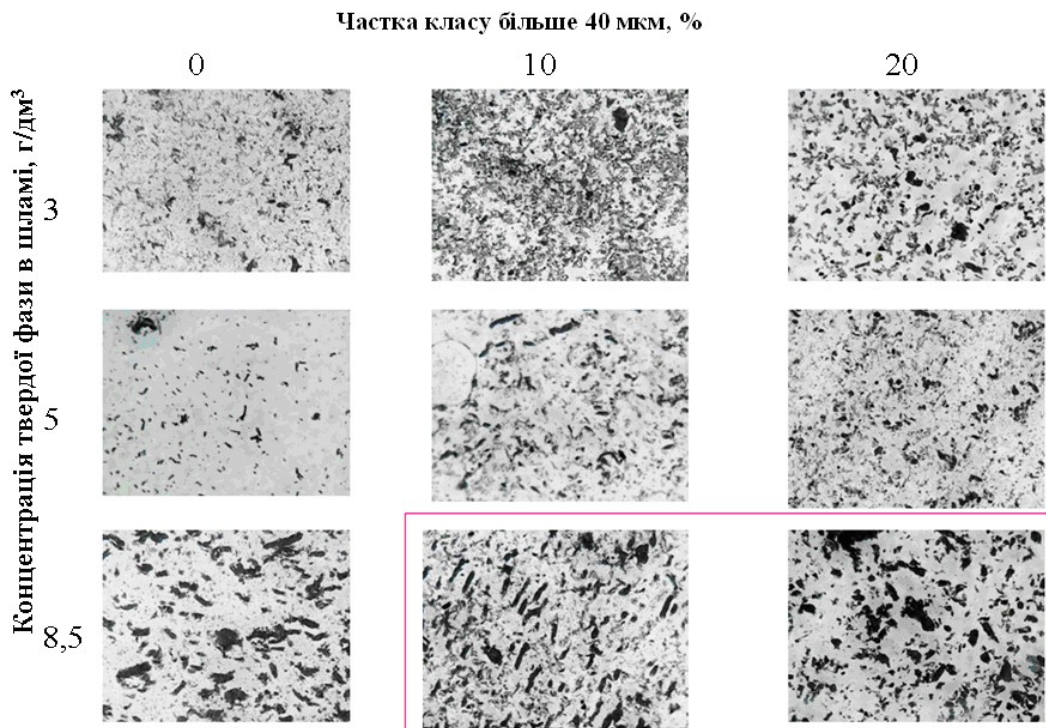


Рисунок 3.12 – Фотографії флокул після механічного впливу при різних концентраціях і дисперсності твердої фази

В інтервалі концентрацій 10 – 50 г/дм³ (рис. 3.13) при всіх варіантах вмісту класу більше 40 мкм спостерігається зниження залишкової швидкості флокул, що має характер, близький до лінійного.

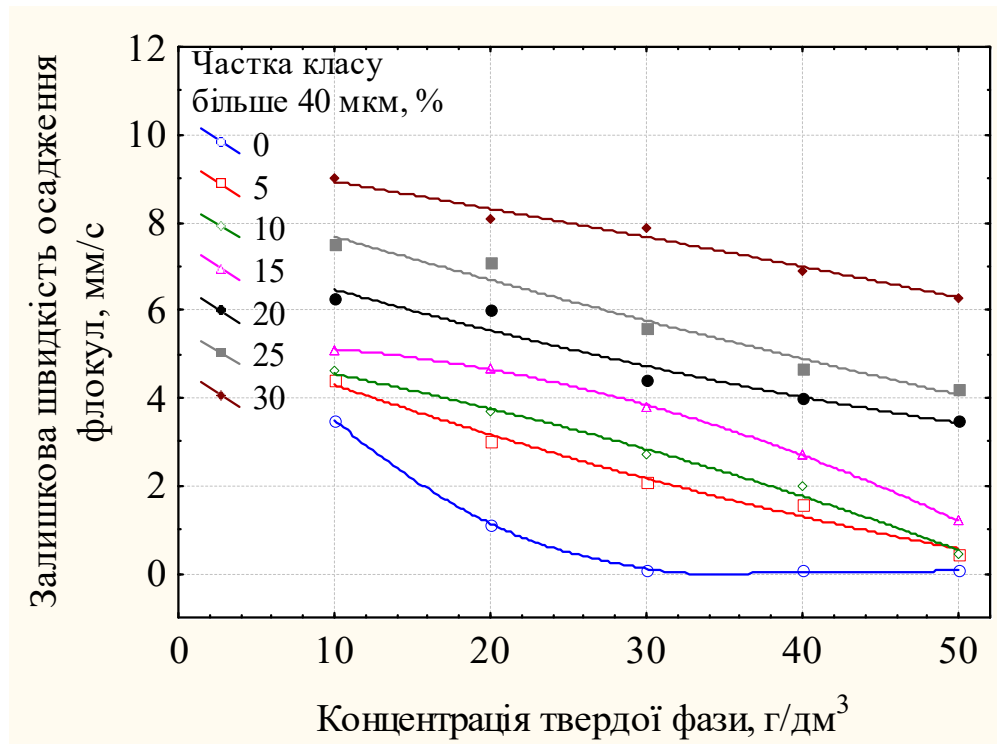


Рисунок 3.13 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації і дисперсності твердої фази в інтервалі концентрацій твердої фази 10 – 50 г/дм³

Фотографії на рис. 3.14 показують, що найбільш крупні 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. 3.15 представлені результати для концентрації твердої фази в межах від 50 до 100 г/дм³. При всіх варіантах вмісту класу більше 40 мкм спостерігається різке зниження швидкості в результаті практично повного руйнування флокул, що також помітно на фотографіях рис. 3.16. Починаючи з концентрації твердої фази 70 г/ дм³ після механічного впливу утворюється мутна суспензія, в якій рідка фаза навіть після осідання флокул залишається брудною за рахунок завислих дрібних часток.

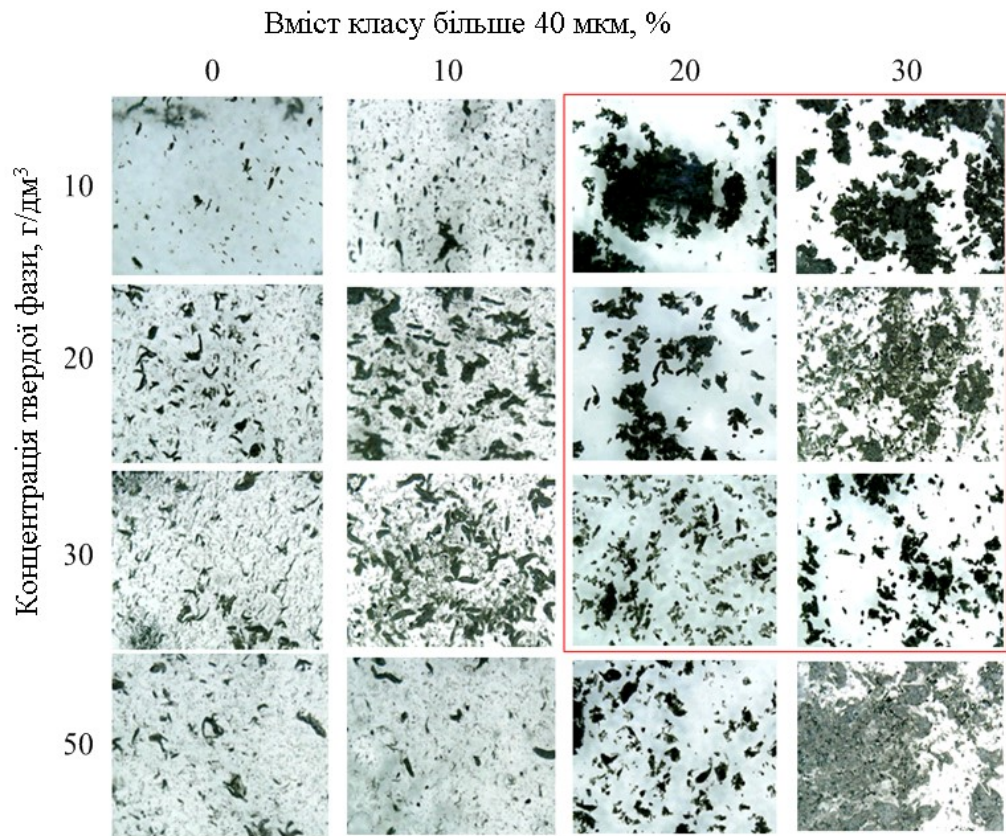


Рисунок 3.14 – Фотографії флокул після механічного впливу при різних концентраціях і дисперсності твердої фази

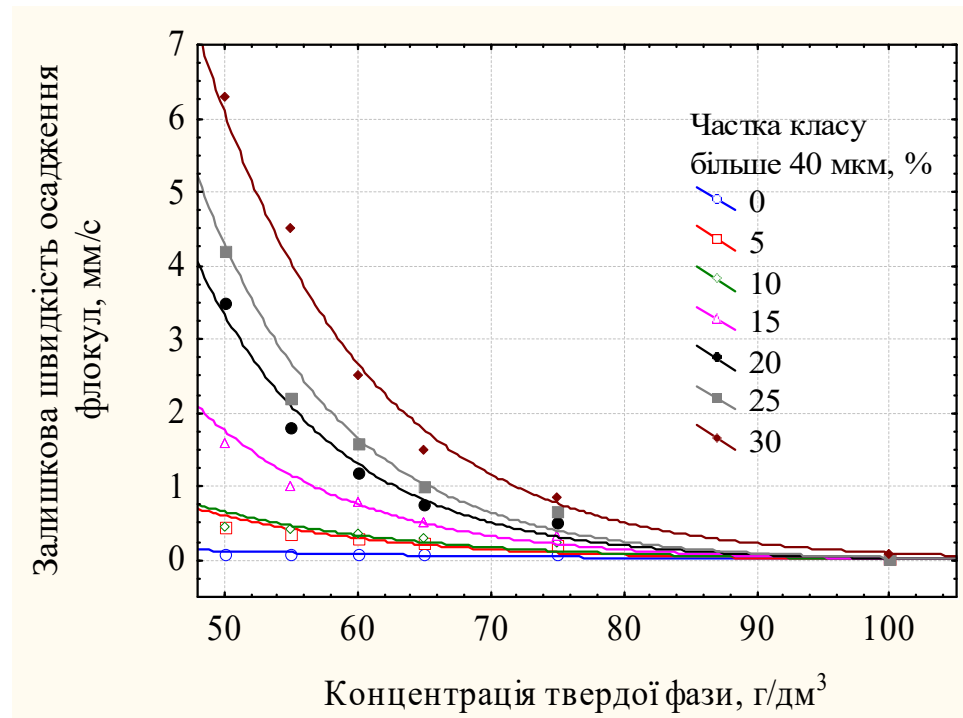


Рисунок 3.15 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації і дисперсності твердої фази в інтервалі концентрацій твердої фази 10 – 50 г/дм³

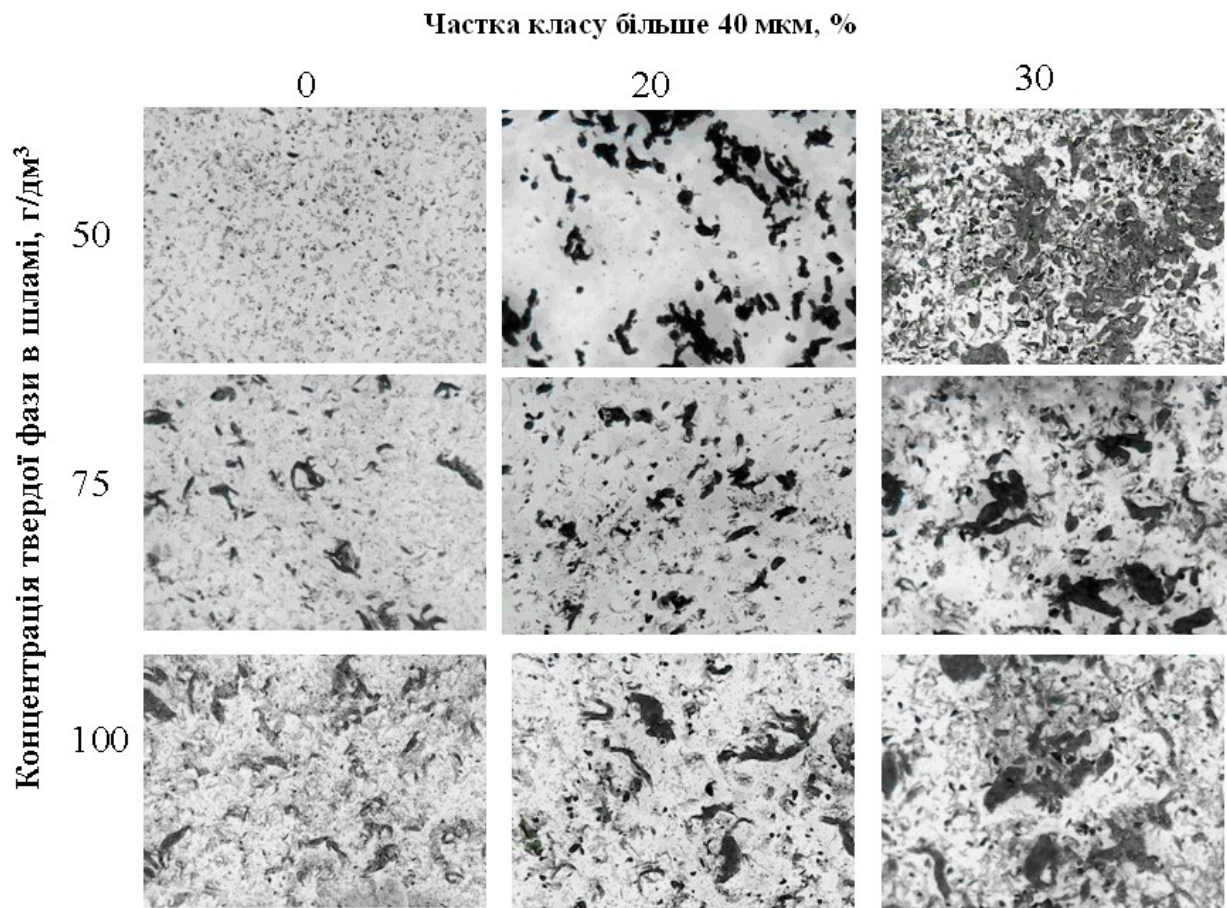


Рисунок 3.16 – Фотографії флокул після механічного впливу при різних концентраціях і дисперсності твердої фази

Дослідження впливу дисперсного складу твердої фази на швидкість осідання флокул після механічного впливу показали (рис. 3.17), що із зростанням вмісту середнього класу частинок (крупністю 40 – 100 мкм) збільшується швидкість осадження флокул при всіх концентраціях. Це є результатом збільшення міцності флокул. Із зростанням концентрації твердої фази шламу швидкість осадження знижується і при концентрації понад 50 г/дм³ вона мінімальна. При концентраціях 75 і 100 г/дм³ швидкість осідання шламу після механічного впливу практично незмінна, що свідчить про майже повне руйнування утворених агрегатів флокул.

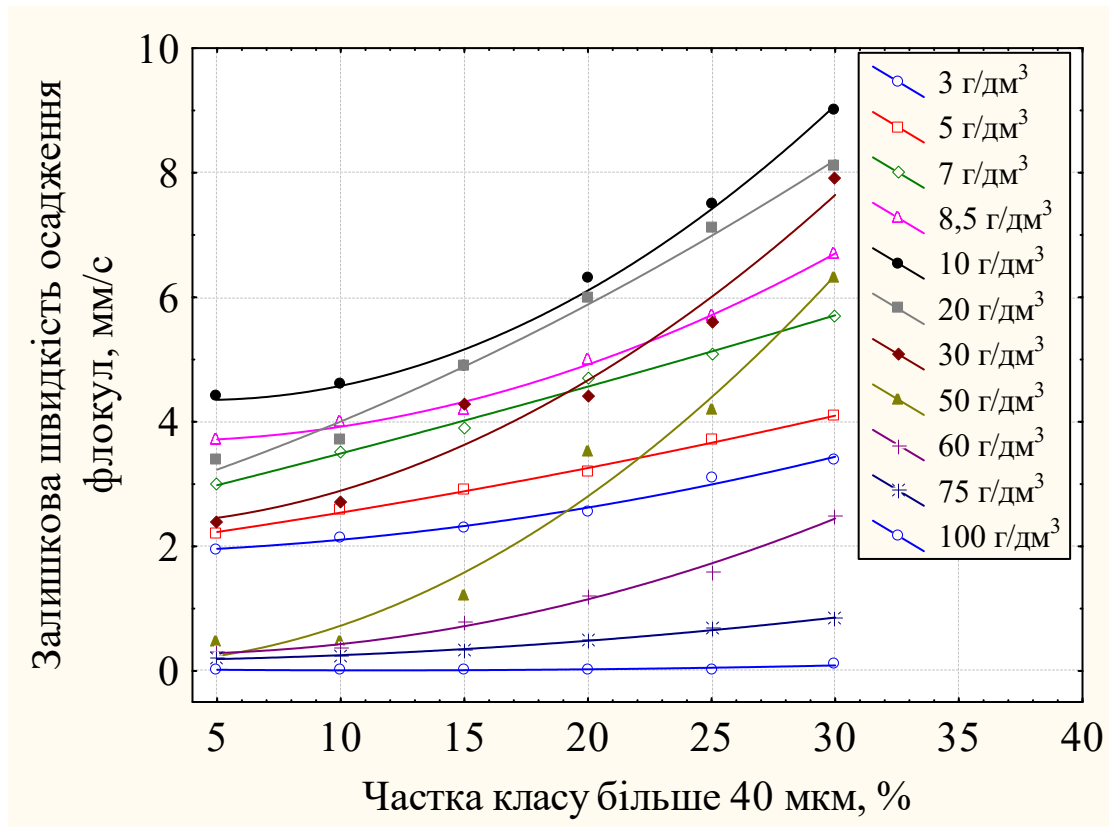


Рисунок 3.17 – Залежність швидкості осадження флокул після механічного впливу при різних концентраціях від вмісту частки класу твердої фази в шламi більше 40 мкм

При вмісті частки фракції 40 – 100 мкм до 15 % спостерігається незначне зростання значення критерію УМА, а понад 15 % – зростання швидкості стає істотним, особливо в інтервалі концентрацій твердої фази в шламi 7 – 30 г/дм³ (більше 1 мм/с на кожні 5 % класу більше 40 мкм).

Результати досліджень показали, що концентрація і дисперсний склад шламу істотно впливають на збереження міцності флокул по відношенню до механічного впливу. Цікавим є те, що, як при низьких концентраціях твердої фази (до 7 г/дм³, рис. 3.11), так і при високих (понад 50 г/дм³, рис. 3.15) спостерігається утворення нестійких до механічного впливу флокул. Механічний вплив призводить до деструкції таких флокул, що призводить до різкого зниження залишкової швидкості осадження. Це підтверджують і фотографії флокул, представлені на рис. 3.16. При концентрації, близькій до 10 г/дм³ (рис. 3.12) після механічного впливу на сфлокульовані агрегати зберігаються

флокули з чіткими контурами, коли при високих (рис. 3.16) концентраціях видно агрегати, розбиті на мікрофлокули.

Аналіз зміни швидкості осадження флокул, що зазнали механічного впливу, при різних концентраціях залежно від дисперсного складу твердої фази в шламі (рис. 3.13 та 3.14) дозволяє рекомендувати здійснення процесу флокуляції в межах концентрацій 10 – 30 г/дм³. Збільшення міцності сфлокульованих структур за рахунок введення в шлам додаткових крупнодисперсних частинок розміром більше 40 мкм дозволяє одержати стійкі до механічного впливу агрегати. Джерелом додаткового середнього класу (40 – 100 мкм) можуть служити будь-які тверді частинки відповідної фракції (наприклад, пісок).

Аналіз одержаних мікрофотографій (на рис. 3.14, виділені фотографії стійких агрегатів флокул з прозорою рідкою фазою) дозволяє судити про наступний механізм утворення міцних агрегатів. Очевидно, що при одній і тій же концентрації шламів, які розрізняються дисперсним складом і мають внаслідок цього різну величину поверхні розділу фаз, на одиницю поверхні твердого доводиться різна кількість макромолекул полімеру. В результаті, при однаковому дозуванні флокулянта в різних за ступенем дисперсності суспензіях, на крупніших частинках адсорбується більше число макромолекул, чим на дрібних. Величина сили взаємодії між частинками у флокулі залежить від міцності і кількості «містків», пропорційних кількості адсорбованих макромолекул флокулянта. Тому, якщо флокула утворена дрібними частинками з фракцією менше 40 мкм, то кількість зв'язків між окремими частинками в ній істотно менше, ніж у флокулі, що містить крупніші частинки з великою кількістю макромолекул флокулянта. Також важливим моментом є процес флокулоутворення. Адсорбція флокулянта на поверхні дрібних частинок визначається дифузійними процесами, і вимагає більшого часу, так само, як і утворення флокул з дрібних частинок, що вимагають зближення відповідних частинок на достатньо близьку для агрегації відстань. За наявності частинок більшого розміру створюється градієнт швидкості, пропорційний масі части-

нок, що дозволяє крупнішій частинці з більшою вірогідністю стикатися з дрібними частинками за рахунок різниці швидкостей руху. Тому агрегація дрібних частинок з крупними у присутності фракції більше 40 мкм сприяє швидкому зменшенню кількості вільних (неагрегованих) дрібних частинок в об'ємі і утворенню чистої освітленої рідкої фази. При відстоюванні це і призводить до утворення чистої освітленої рідини. Іншими словами, крупніші частинки ефективніше зв'язую на своїй поверхні дрібні, зближуючись з ними і захоплюючи їх.

Сила зв'язків між частинками при подальшому укрупненні флокул також залежить від кількості адсорбованих макромолекул полімеру. У флокулі, утвореної з дрібнодисперсною твердою фазою, сила взаємодії між окремими частинками усередині мікрофлокули і макрофлокули вищого порядку приблизно однакова. Тому при механічному впливі макрофлокули руйнуються на найдрібніші згустки дрібних частинок твердої фази. Наявність крупних частинок за рахунок більшої кількості полімеру на їх поверхні сприяє створенню стійких структур, які при механічному впливі хоч і розпадаються на флокули меншого порядку і розміру, але все таки залишаються досить крупними, тому і мають достатньо високу залишкову швидкість осадження. Підвищення швидкості осадження після механічного впливу за наявності частинок фракції більше 40 мкм також може бути пояснено повторною агрегацією мікрофлокул, за рахунок активних ланок, що збереглися при руйнуванні флокул, на поверхні крупних частинок.

На рис. 3.14, де представлені мікрофотографії проб суспензії після механічного впливу, явно видно, що при підвищенні вмісту частки класу більше 40 мкм до 20 – 30 % після механічного руйнування макрофлокул відбувається утворення флокул меншого порядку (див. фотографії зліва направо на рис. 3.14). Для суспензій з такою часткою твердих частинок фракції більше 40 мкм характерна відсутність забруднення освітленої рідини після впливу мішалки (виділено червоним на рис. 3.14).

Зниження концентрації твердої фази в шламi (див. фотографії знизу вгору на рис. 3.14) показує утворення стійких мікрофлокул за рахунок якісної адсорбції полімеру на першому етапі процесу флокуляції. При вищих концентраціях твердої фази відбувається нерівномірний розподіл полімеру на поверхні частинок, зближення яких сприяють початку другого етапу – агрегації частинок. Недостатня адсорбція флокулянта на частині твердої фази приводить до утворення неміцних зв'язків і відповідно нестійких флокул, що руйнуються при механічних впливах на суспензію.

Використовуючи критерій УМА можна суттєво зменшити витрату флокулянтів, якщо необхідно підтримувати певну залишкову швидкість, наприклад, для центрифуги не менше 2 мм/с (рис. 3.1). На рис. 3.18 наведено залежність сумарної витрати флокулянтів від концентрації і дисперсності твердої фази для критерію утворення міцних агрегатів $V_2 = 2$ мм/с, побудований за методикою, описаною в п. 2.6. Аналіз результатів дослідження показує наявність оптимуму, тобто складу шламу, за якого спостерігається мінімальна витрата флокулянту. За оптимальних умов складу шламу (концентрація 10 г/дм³ та частка класу більше 40 мкм на рівні 30 %) спостерігається мінімальна витрата флокулянту (приблизно 115 г/т) для досягнення заданої швидкості осадження флокул.

Згідно рис. 3.18 мінімальна витрата флокулянта для досягнення критерію утворення міцних агрегатів $V_2 = 2$ мм/с спостерігається при концентраціях твердої фази 7 – 30 г/дм³. Із зростанням вмісту фракції твердої фази більше 40 мкм витрата флокулянта для досягнення залишкової швидкості, рівної 2 мм/с зменшується приблизно на 50 г/т на кожні 10 % частки класу більше 40 мкм.

В практиці зневоднення шламів на діючих підприємствах найчастіше має місце первинне згущення шламу до концентрацій, які значно перевищують оптимальні. Так, наприклад, якщо на зневоднення подається шлам з концентрацією твердої фази 100 г/дм³ певного дисперсного складу, то витрата флокулянтів буде в 3-5 разів більше, ніж могла би бути після розбавлення

шламу перед флокуляцією. Додатково можна зменшити витрату флокулянту при внесенні додаткових часток класу більше 40 мкм, що підвищить частку грубодисперсної фракції, яка виступає центрами флокулоутворення міцних агрегатів.

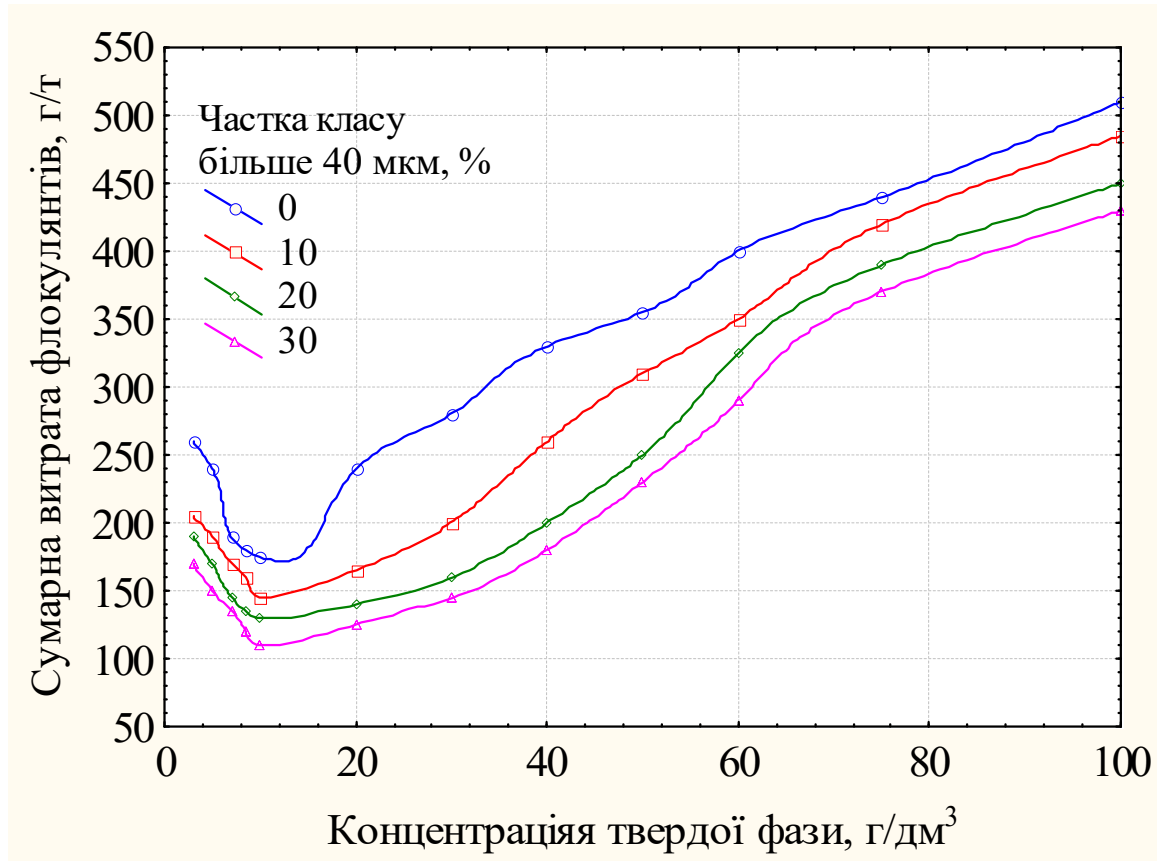


Рисунок 3.18 – Залежність сумарної витрати флокулянтів від концентрації і дисперсності твердої фази для критерію утворення міцних агрегатів

$$V_2 = 2 \text{ мм/с}$$

Аналізуючи одержані дані, можна рекомендувати проведення флокуляції шламів при концентрації твердої фази близької до 10 г/дм³, що є оптимальною концентрацією або в інтервалі концентрацій 7 – 30 г/дм³ – умови, близькі до оптимальних.

При даних концентраціях утворюються найбільш стійкі до механічних дій флокули, які зберігають достатньо високу швидкість осадження.

Зростання вмісту крупніших частинок в шламі (класу більше 40 мкм) призводить до утворення міцніших флокуляційних структур при будь-яких

концентраціях. Причому, якщо для шламів з концентрацією твердої фази в інтервалі $7 - 30 \text{ г/дм}^3$ зростання частки фракції розміром більше 40 мкм істотно впливає на міцність флокул та, відповідно на зменшення витрати флокулянту для досягнення заданої залишкової швидкості, то при низьких (менше 7 г/дм^3) і високих (більше 30 г/дм^3) концентраціях твердої фази цей вплив є незначним.

Зміцнення флокул істотно зростає (судячи із залишкової швидкості або витрати флокулянту для досягнення її певного значення) при вмісті класу $40 - 100 \text{ мкм}$ в шламі більше $10 - 15 \%$ навіть за оптимальної концентрації твердої фази (10 г/дм^3). Це явно видно на фотографіях флокул, представлених на рис. 3.19.

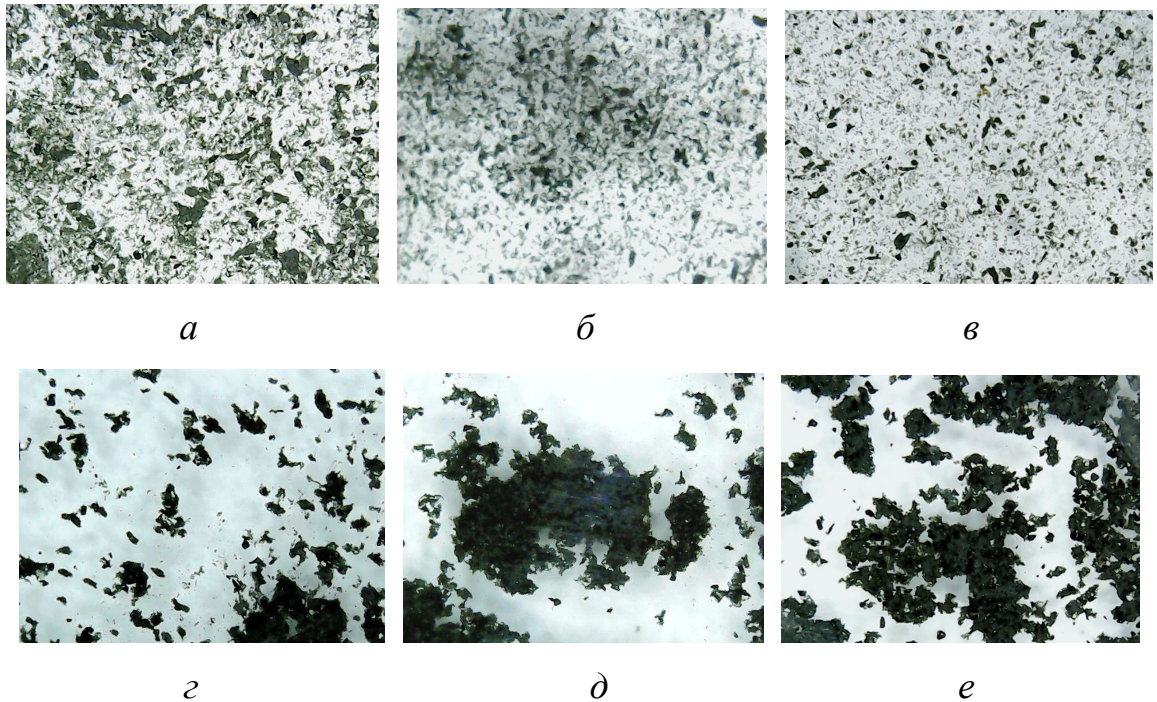


Рисунок 3.19 – Фотографії флокул після механічного впливу при концентрації 10 г/дм^3 і вмісті в шламі класу більше 40 мкм , %:

a – 5, *б* – 10, *в* – 15, *г* – 20, *д* – 25, *е* – 30.

При вмісті класу твердої фази $40 - 100 \text{ мкм}$ в шламі більше 15% утворюються достатньо крупні флокули з чіткішими контурами і прозорою рідкою фазою (рис. 3.19г, 3.19д и 3.19е), ніж при меншому вмісті твердих частинок фракції $40 - 100 \text{ мкм}$ (рис. 3.19а, 3.19б и 3.19в).

Результати виконаних лабораторних досліджень представляють практичний інтерес завдяки можливості коректування шламу для досягнення максимально сприятливих умов утворення міцних агрегатів флокул. Це дає можливість або підтримувати міцність флокул для подальшого зневоднення, або мінімізувати витрату флокулянтів.

Наприклад, шляхом згущування або розбавлення шламу можна коректувати концентрацію твердої фази для підтримки в межах найкращих значень 7 – 30 г/дм³. Другим шляхом інтенсифікації процесу утворення міцних агрегатів може бути додаткове внесення частинок шламу розміром від 40 до 100 мкм.

Дотримання умов оптимального співвідношення концентрації і дисперсного складу шламу на етапі утворення агрегатів (флокуляції шламів) дозволяє одержати достатньо міцні флокули, стійкі до механічного впливу, і звести до мінімуму деструкцію флокул при транспортуванні і зневодненні шламової суспензії.

3.5 Результати дослідження впливу згущення шламу на міцність флокул

На рис. 3.20 наведено залежності залишкової швидкості осадження флокул після механічного впливу від ступеня згущування суспензії перед зневодненням. Як видно з рис. 3.20, залишкова швидкість осадження флокул у міру згущення твердої фази падає, причому із зростанням концентрації твердої фази в початковому шламі залишкова швидкість набуває менших значень.

Це свідчить про утворення менш міцних агрегатів флокул при високих початкових концентраціях твердої фази в шламі і їх активнішому руйнуванні при механічному впливі у міру згущення.

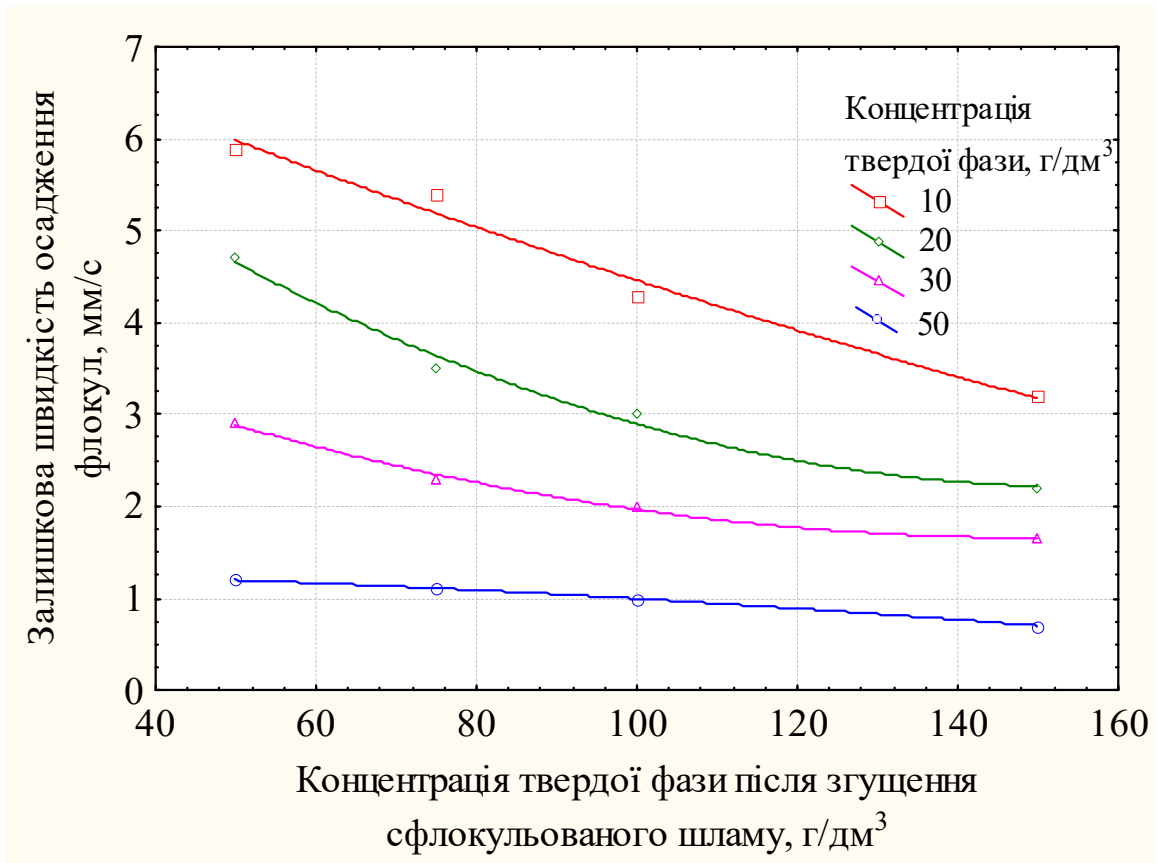


Рисунок 3.20 – Залежність залишкової швидкості осадження флокул від концентрації твердої фази після згущення шламу при різних початкових концентраціях (вміст класу більше 40 мкм – 15 %, сумарна витрата флокулянта – 200 г/т)

Результати, представлені на рис. 3.20, свідчать про необхідність згущувати шлам лише до певної межі, залежно від необхідної залишкової швидкості. Так, наприклад, для початкової концентрації твердої фази в шламі 30 г/дм³ при необхідності збереження залишкової швидкості перед зневодненням у центрифугі не менше 2 мм/с максимальна концентрація після згущення повинна бути не більше 100 г/дм³. Для шламу з нижчою початковою концентрацією твердої фази (наприклад, 10 – 20 г/дм³) згущення можна збільшити до концентрації 150 – 170 г/дм³.

Фотографії утворених при різному ступені згущення флокуляційних структур (рис. 3.21) показують зміну (зниження) міцностних характеристик

агрегатів при збільшенні концентрації твердої фази в об'ємі згущеного шламу.

Зниження міцності флокул може бути пов'язано з наступними процесами, що відбуваються при згущенні шламу. По-перше, під час згущення відбувається збільшення частки об'єму, зайнятого твердою фазою за рахунок відведення освітленої рідини. Це приводить до збільшення в'язкості рідкої фази за рахунок сил поверхневого натягу і утворенню різниці тиску між рідиною усередині флокул і ззовні. Це може приводити до зміни течії рідини і при механічному впливі створювати різницю швидкостей руху флокули і потоку рідкої фази, що її омиває, при різному ступені згущення.

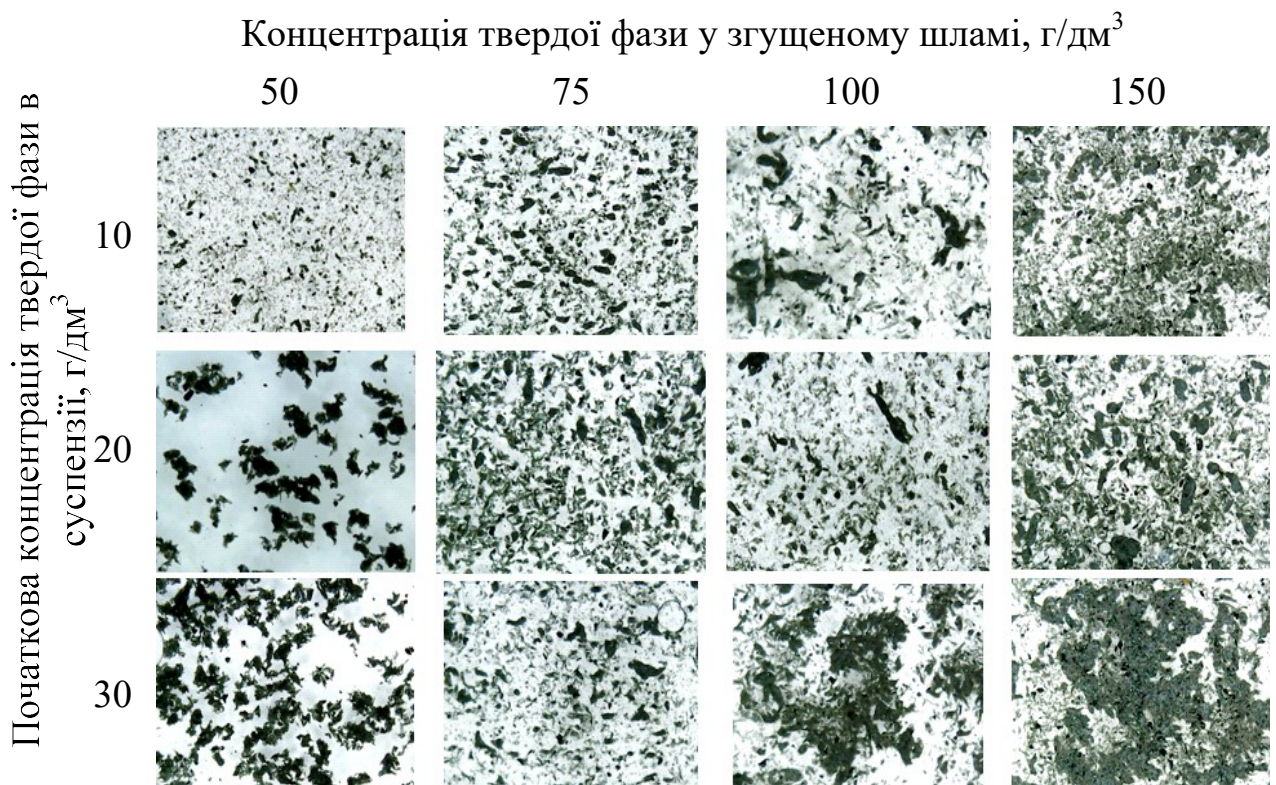


Рисунок 3.21 – Структури флокул після механічного впливу при різних концентраціях шламу і концентрації твердої фази після згущення сфлокульованого шламу

По-друге, при згущенні сфлокульованих агрегатів відбувається утворення коагуляційних структур – встановлення контактів між частинками і їх агрегатами. Із зростанням ступеня згущення і злипанням флокул збільшується і

їх маса, відбувається ущільнення флокул, втрата рідини, що знаходиться в ній, і руйнування флокул під дією їх ваги і осмотичного тиску в порах між агрегатами.

По-третє, із зростанням ступеня згущення флокул зменшується об'єм рідини, яка оточує флокулу. Тому при механічному впливі на більш згущену сфлокульовану суспензію відбувається частіше зіткнення і тертя флокул між собою, також з поверхнею перемішуючого пристрою і стінками ємності. Це викликає великі зсувні напруги на поверхні флокул, що приводять до їх руйнування.

Таким чином, із збільшенням ступеня згущення збільшуються псевдопластичні властивості сфлокульованих структур і зменшення міцності флокул до механічного впливу. Це дозволяє рекомендувати транспортування сфлокульованого шламу до зневоднюючого устаткування із ступенем згущення до 140-150 г/дм³.

Висновки до розділу 3

1. Вперше досліджена закономірність зміни ефективності зневоднення полідисперсних шламів від залишкової швидкості осадження флокул, що визначена перед центрифугою. Виявлено, що для ефективного осадження твердої фази в центрифугі залишкова швидкість осадження твердої фази повинна бути більше 2 мм/с [141].

2. Виявлено, що для утворення міцних агрегатів полідисперсного шламу рекомендується застосування поєднання неіоногенного і аніонного флокулянта, замість тільки аніонного. Присутність фракції розміром більше 40 мкм в шламі знижує витрату флокулянта у декілька разів і інтенсифікує процес флокулоутворення. Встановлено, що для досягнення однакових швидкостей осідання для різних за дисперсним складом або концентрацією твердої фази суспензій потрібна різна кількість флокулянта. Найкращі результати з флокуляції з мінімальною витратою полімеру отримані при нижчих концентраціях твердої фази [130].

3. Вперше експериментально досліджено вплив концентрації та дисперсного складу на міцність флокуляційних структур до механічних впливів. Встановлено, що критерій утворення міцних агрегатів флокул після механічного впливу має оптимум. Найбільше значення критерію УМА, а також найменша сумарна витрата флокулянтів, спостерігається при концентрації твердої фази в шламi $7 - 30 \text{ г/дм}^3$ і часткою фракції крупністю $40 - 100 \text{ мкм}$ більше $15 - 20 \%$ [131 – 133].

4. Вперше експериментально досліджено залежність згущення шламу перед його зневодненням на міцність флокуляційних структур до механічних впливів. Встановлено, що із зростанням концентрації твердої фази у згущеному шламi понад $140 - 150 \text{ г/дм}^3$ істотно зменшується міцність агрегатів до механічних впливів [133].

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ ШЛАМОВИХ ВОД З ПОЛІДИСПЕРСНОЮ ТВЕРДОЮ ФАЗОЮ

4.1 Основні завдання моделювання процесу для визначення оптимальних параметрів процесу зневоднення полідисперсних шламів

При роботі модуля зневоднення шламових вод, описаного в п. 2.2, ставилося завдання вилучення твердої фази з мінімальною витратою дорогих флокулянтів. У зв'язку з тим, що ступінь вилучення зі шламу твердої фази під час зневоднення залежить від критерію утворення міцних агрегатів (рис. 3.1), то у якості параметру, що обмежує, було обрано цей критерій, а оптимізація проводилась по витраті флокулянту для досягнення необхідного значення критерію УМА. Ці параметри задовольняють відповідним встановленим вимогам: кількісність, універсальність, повнота та однозначність у статистичному змісті – заданому набору значень факторів відповідає одне, з точністю до помилки експерименту, значення параметра оптимізації. Крім того, кожен із визначених параметрів оптимізації має фізичний сенс, легко обчислюється та оцінює ефективність зневоднення полідисперсного шламу [142].

При плануванні експерименту (див. розділ 3) задавалися управляючі фактори, до яких висувалися наступні вимоги: вимірюваність, керованість, точність, сумісність та незалежність [143].

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 (фракції) 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.

Виходячи з цього, загальний вигляд взаємовпливів вхідних (незалежних змінних, факторів впливу) та вихідних (залежних змінних, відгуків функції) потоків при вирішенні оптимізаційної задачі подано у вигляді схеми (рис. 4.1).

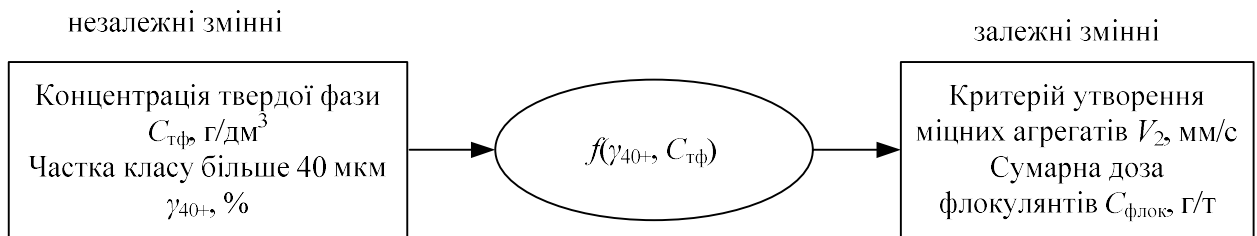


Рисунок 4.1 – Схема зв'язку незалежних і залежних змінних при вирішенні оптимізаційної задачі зневоднення полідисперсних шламів у центрифугах

За критерій відгуку приймали значення $V_2 \geq 2$ мм/с, що відповідає значенню достатньої міцності флокул до механічного впливу на них у центрифугах.

За критерій оптимізації приймали значення мінімальної витрати флокулянту ($C_{\text{флок}} \rightarrow \min$) за умов досягнення необхідної для зневоднення у центрифугі міцності флокул $V_2 \geq 2$ мм/с.

Для визначення граничних умов були задані такі обмеження на досліджені параметри:

$$3 < C_{\text{тф}}, \text{ г/дм}^3 < 100; \quad 0 < \gamma_{40+}, \% < 30 \quad (4.1)$$

Ці обмеження відповідають інтервалу концентрацій і дисперсного складу твердої фази реальних шламів більшості промислових виробництв.

Поставлена оптимізаційна задача вирішувалася за допомогою регресійного аналізу, що дозволяє на основі апроксимації експериментальних даних отримати залежності між факторами впливу та відгуком функції у вигляді математичних рівнянь, тобто, отримати регресійні моделі об'єкту дослідження.

дження. Перевага регресійної моделі порівняно з аналітичною полягає у вищому рівні адекватності експериментальним даним, а недолік – у нижчому ступеню інтерпретації, що пояснюється використанням вимірюваних даних, а не знань механізму досліджуваного процесу [142]. Отже, застосування регресійного аналізу, як статистичного методу обробки інформації, відповідає меті поставленого експериментального дослідження.

При регресійному аналізі ставилося завдання пошуку функціональної залежності математичного сподівання відгуку $M(Y)$ від значень заданих факторів X_i : $M(Y) = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$.

Математична обробка результатів експериментів виконувалася за допомогою програмного пакета Statistica, призначеного для статистичної обробки даних експериментальних досліджень, встановлення взаємозалежностей факторів впливу та відгуку, поданням їх у графічному вигляді та побудовою на основі цього регресійних моделей для заданих параметрів [143].

Для оцінки адекватності отриманих регресійних рівнянь використовуємо аналітичний метод аналізу. Гіпотезу про відтворюваність дослідів перевіряємо за допомогою розрахунку коефіцієнта детермінації та середньоквадратичної помилка розрахунків.

Одержані регресійні моделі передбачалось у подальшому використовувати під час проектних робіт стосовно встановлення оптимального складу шламу.

4.2 Залежність критерію утворення міцних агрегатів від концентрації та дисперсності твердої фази

Математична обробка експериментальних результатів методом регресійного аналізу дозволила отримати залежність критерію утворення міцних агрегатів після механічного впливу від дисперсності і концентрації твердої фази в шламі, яка охоплює весь досліджений діапазон параметрів:

$$\lg V_2 = 0,23 - 0,054 \lg C_{\text{тф}} + 0,70 (\lg C_{\text{тф}})^2 + 0,018 \gamma_{40+} \lg C_{\text{тф}}, \quad (4.2)$$

де V_2 – критерій утворення міцних агрегатів флокул, мм/с;
 $C_{\text{тф}}$ – концентрація твердої фази, г/дм³;
 γ_{40} – частка класу (фракції) більше 40 мкм у твердій фазі.

Коефіцієнт детермінації цієї залежності становив 0,94, середньоквадратична помилка розрахунку 0,091, що задовольняє вимогам адекватності та дає можливість прийняти рівняння (4.2) для використання.

Використовуючи рівняння (4.2) можна розраховувати невідомі параметри. Наприклад, , задавшись значенням критерієм утворення міцних агрегатів V_2 , підібрати необхідні для його досягнення концентрацію та дисперсний склад шламу, або, знаючи концентрацію та дисперсний склад шламу (коли з технологічних причин неможливо працювати зі шламом, що має концентрацію твердої фази близькою до оптимальної), розрахувати V_2 . Також рівняння дозволяє побудувати тривимірний графік залежності критерію утворення міцних агрегатів від дисперсності і концентрації твердої фази в шламі (рис. 4.2) в усьому дослідженому діапазоні параметрів, який дає більш повне уявлення про вигляд цієї залежності ніж графіки на рис. 3.11, 3.13 та 3.15.

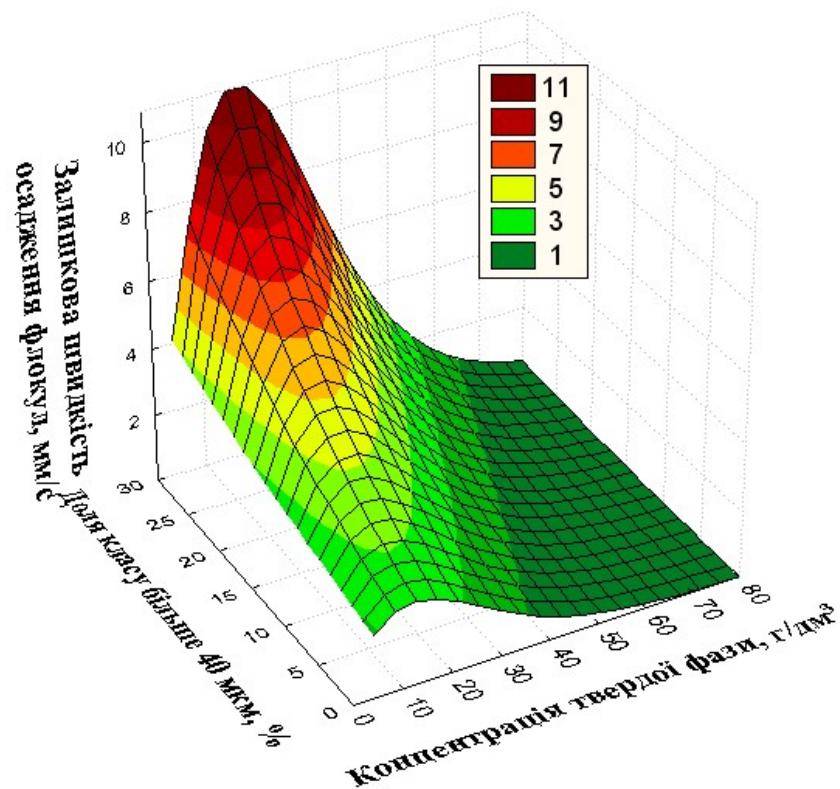


Рисунок 4.2 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів (V_2) після механічного впливу від дисперсності і концентрації твердої фази в шламi

Практичний інтерес мають ізолінії розподілу значення критерію утворення міцних агрегатів. Такі графіки, отримані після згладжування експериментальних результатів (проекція графку, зображеного на рис. 4.2 на площину x та y) (рис. 4.3). Якщо відібрати пробу шламу виробництва перед зневодненням і визначити концентрацію та дисперсний склад твердої фази в ній можна достатньо точно визначити значення критерію утворення міцних агрегатів та чи будуть досягненні умови $V_2 \geq 2$ мм/с без потреби виконувати лабораторні дослідження з флокуляції шламу.

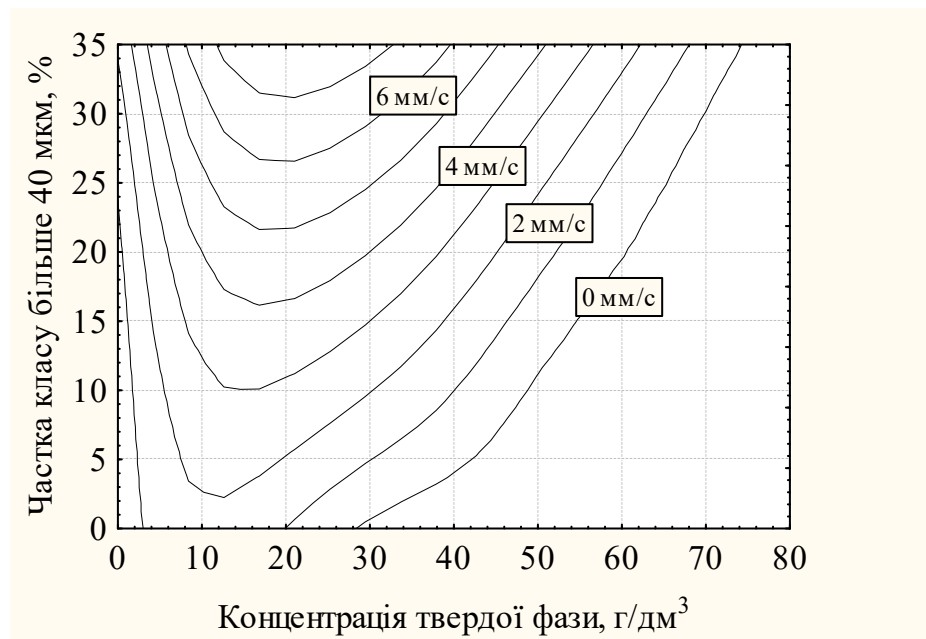


Рисунок 4.3 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів (V_2) після механічного впливу від дисперсності і концентрації твердої фази в шламi

Крім того, знаючи концентрацію і дисперсність шламу, можна управляти процесом флокуляції і утворенням міцних флокул шляхом корегування незалежних змінних $C_{тф}$ та γ_{40+} до відповідних значень на графіку або шляхом визначення їх при $V_2 = 2$ мм/с за рівнянням 4.2.

Згідно досліджень, наведених на рис. 3.1 значення критерію утворення міцних агрегатів для центрифуги задовольняє умовам $V_2 \geq 2$ мм/с. Тому доцільно (зручніше) використовувати спрощену площину в інтервалі робочих

значень $0 - 10 \text{ г/дм}^3$ та $10 - 50 \text{ г/дм}^3$, бо саме на цих інтервалах результати досліджень (відповідно рис. 3.11 а та 3.13) мають майже лінійний вигляд. Залежність критерію утворення міцних агрегатів ($V_2 \geq 2 \text{ мм/с}$) після механічного впливу від дисперсності і концентрації твердої фази в шламів в зазначених інтервалах наведено на рис. 4.4 та рис. 4.5.

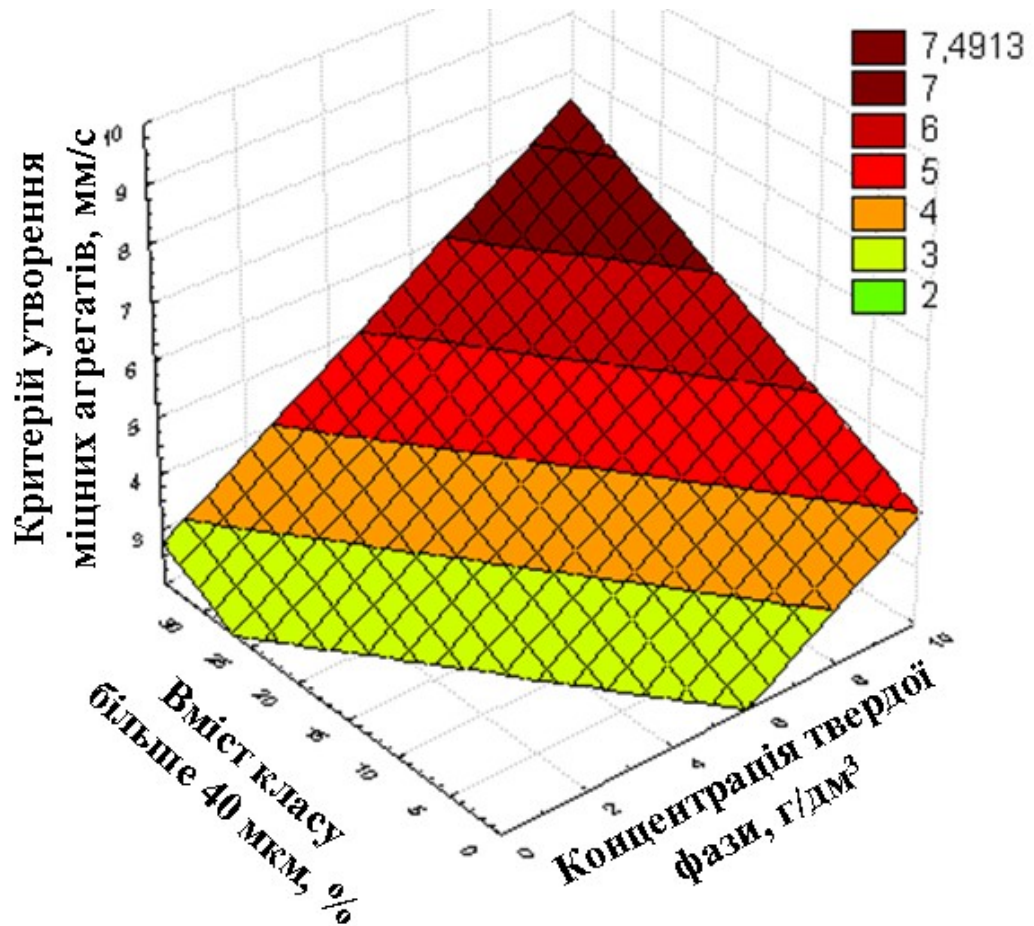


Рисунок 4.4 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів (V_2) після механічного впливу від дисперсності і концентрації твердої фази в шламів в інтервалі $0 - 10 \text{ г/дм}^3$

Залежність, наведену на рис. 4.4, описує рівняння:

$$V_2 = -0,7395 + 0,4735 \cdot C_{\text{тф}} + 0,1028 \cdot \gamma_{40+}. \quad (4.3)$$

Коефіцієнт детермінації цієї залежності становив 0,97, середньоквадратична помилка розрахунку 0,19 мм/с, що задовольняє вимогам адекватності

та дозволяє прийняти рівняння (4.3) для розрахунків в інтервалі зазначених концентрацій.

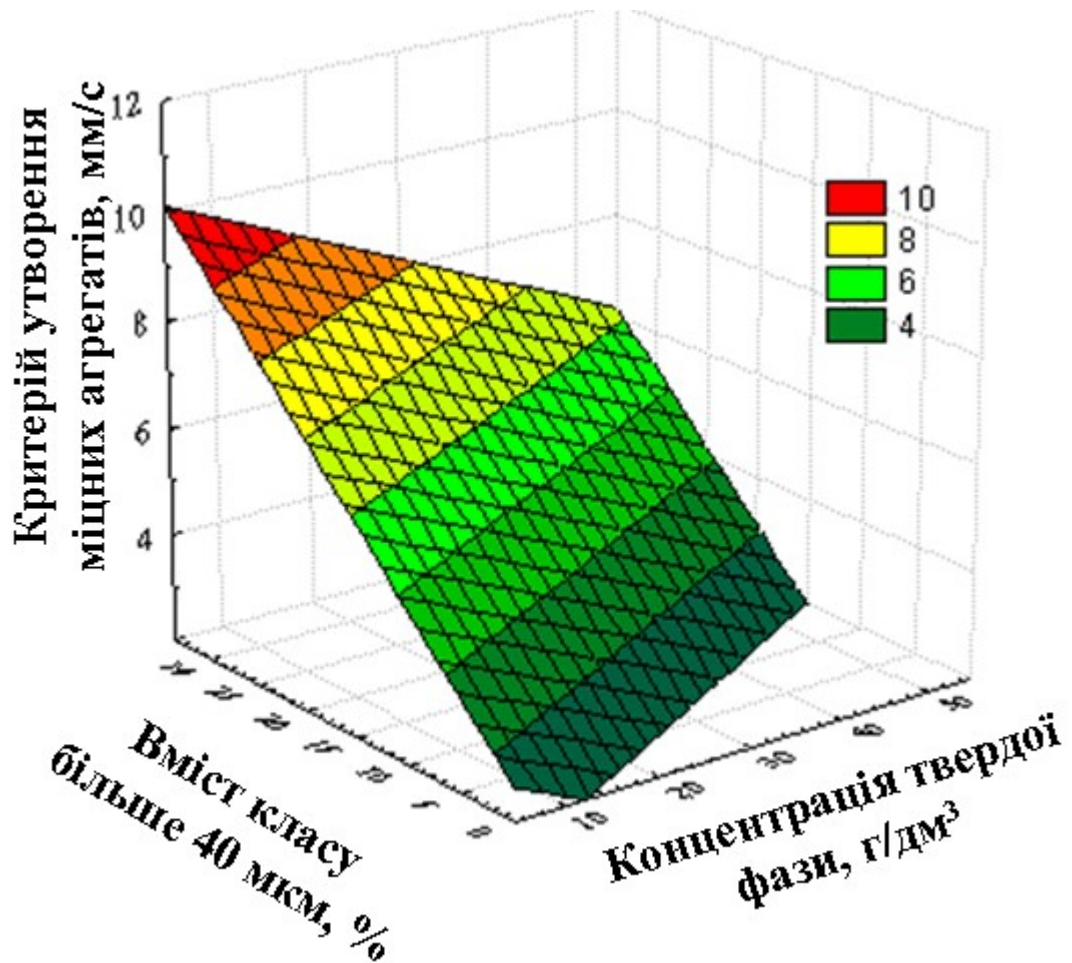


Рисунок 4.5 – Залежність критерію утворення міцних агрегатів (V_2) після механічного впливу від дисперсності і концентрації твердої фази в шламів в інтервалі 10 – 50 г/дм³

Залежність, наведена на рис. 4.4 описує рівняння:

$$V_2 = 2,9769 - 0,0786 \cdot C_{\text{тф}} + 0,2213 \cdot \gamma_{40+}. \quad (4.4)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (4.4) становив 0,97, середньоквадратична помилка розрахунку 0,17 мм/с, що задовольняє вимогам адекватності та прийняти залежності для розрахунків в інтервалі концентрацій твердої фази 10 – 50 г/дм³.

Отримані рівняння (4.3 – 4.4) простіші за рівняння (4.2), відповідно, більш точні та дозволяють прогнозувати значення критерію утворення міцних агрегатів для заданого шламу у відповідному інтервалі концентрацій, або розраховувати, як потрібно змінити концентрацію шламу чи його гранулометричний склад для досягнення потрібного значення критерію утворення міцних агрегатів ($V_2 \geq 2$ мм/с).

Таким чином, використовуючи отримані залежності, можна достатньо точно прогнозувати ефективність флокуляції та ступінь зневоднення даного типу шламу. Знаючи концентрацію і ситовий склад шламу, можна управляти процесом флокуляції і утворення міцних флокул шляхом доведення концентрації (розбавлення шламу) або вмісту класу більше 40 мкм (додатковим внесенням твердої фази відповідної фракції) до необхідного значення.

Наприклад, якщо шлам виробництва має концентрацію 60 г/дм³ та містить 10 % твердої фази більше 40 мкм, то використовуючи залежність (4.4) або графік рис. 3.15 можна констатувати, що значення критерію утворення міцних агрегатів матиме значення менше 2 мм/с. Відклавши відповідне значення складу шламу на графіку (рис. 4.6) можна покращити умови флокуляції з метою досягнення значення критерію УМА $V_2 \geq 2$ мм/с.

Для цього треба виконати один з наступних прийомів:

1) зменшити концентрацію твердої фази перед флокуляцією до концентрації 35 г/дм³ (рис. 4.6 стрілка вліво), шляхом розбавлення шламу освітленою рідиною, фугатом з центрифуги або водою;

2) збільшити частку твердої фази більше 40 мкм до 23 % (рис. 4.6 стрілка вгору), шляхом введення додаткової крупної фракції, наприклад, піску;

3) одночасно розбавити до 50 г/дм³ та додати твердої фази більше 40 мкм до 17 % (рис. 4.6 стрілка до розрахункової прямої), шляхом об'єднання потоків, наприклад, направленням на зневоднення додаткового стоку з грубодисперсними частками.

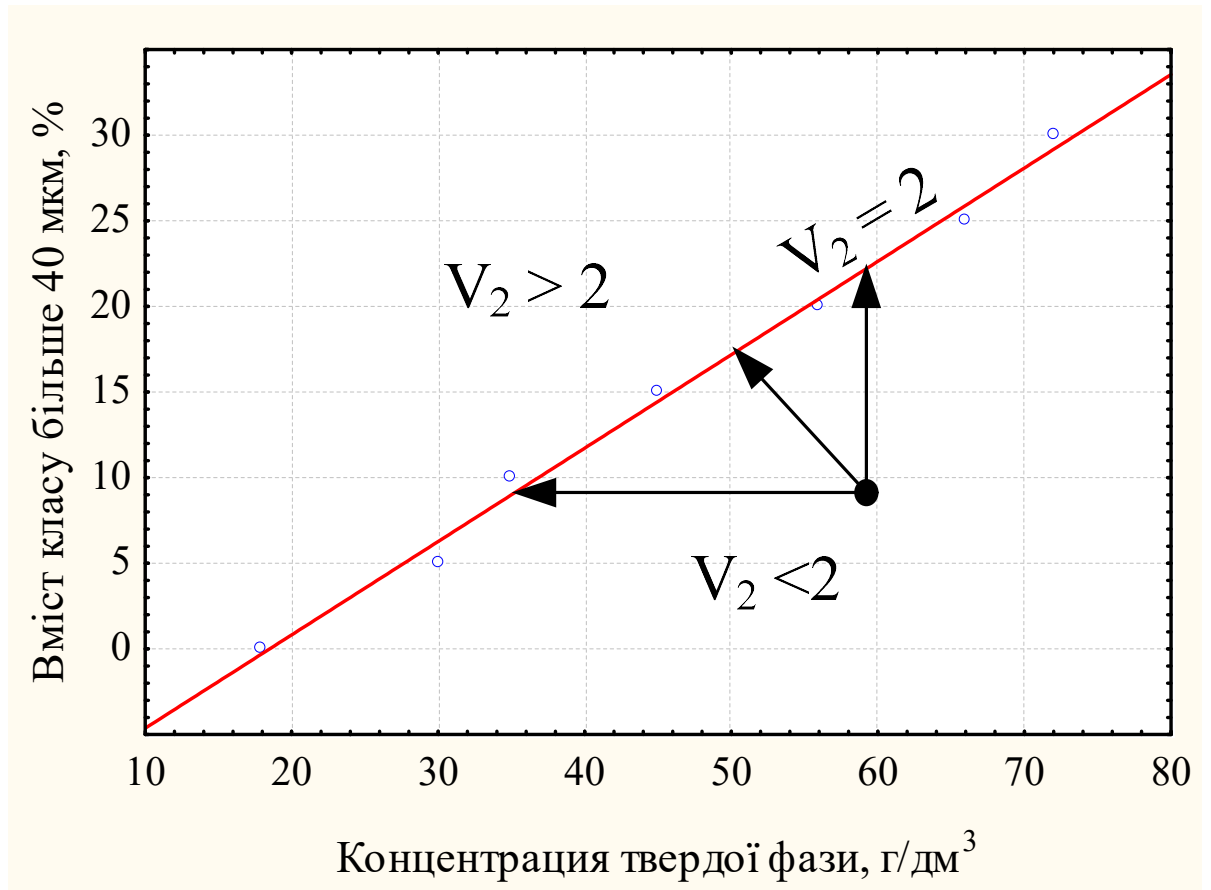


Рисунок 4.6 – Приклад управління процесом утворення міцних агрегатів в залежності від дисперсності і концентрації твердої фази в шламів в інтервалі 10 – 50 г/дм³: точки на графіку – експериментальні дані з рис. 3.13 та 3.15; пряма – результати розрахунку за формулою 4.4 або пряма перетину площини з осями x та y з рис. 4.5; стрілками позначено шляхи корегування шламу (управління незалежними змінними $C_{тф}$ та γ_{40+})

4.3 Залежність витрати флокулянтів від концентрації та дисперсності твердої фази

У зв'язку з тим, що критерій утворення міцних агрегатів залежить від витрати флокулянту, а умовами оптимізації є мінімальна витрата флокулянту при досягненні необхідного для ефективного зневоднення шламу значення критерію $V_2 \geq 2$ мм/с, то з використанням отриманих в експериментах даних (див. розділ 3) можна визначити залежність витрати флокулянта від дисперс-

ності та концентрації твердої фази при $V_2 = 2$ мм/с. Експериментальні дані, що наведені на рис. 3.18, дозволяють побудувати таку залежність у тривимірному просторі, яку представлено на рис. 4.7.

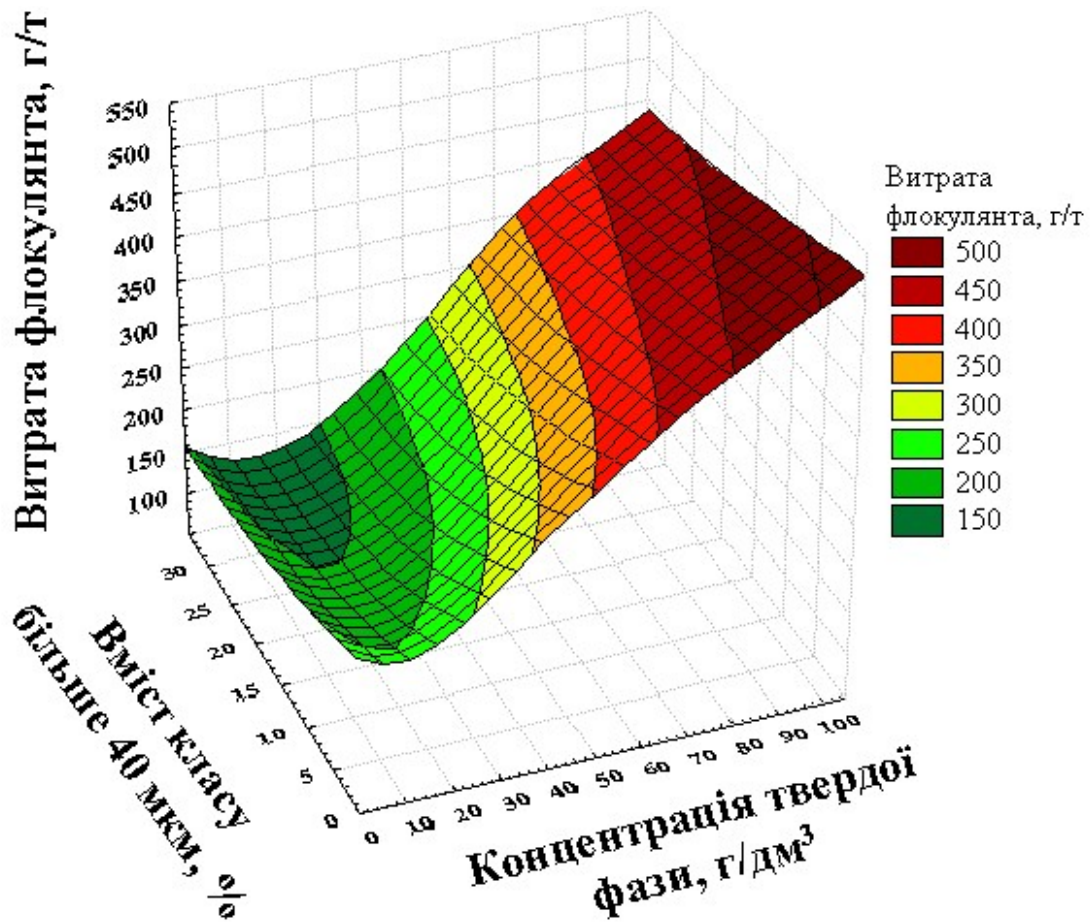


Рисунок 4.7 – Залежність витрати флокулянтів для досягнення критерію утворення міцних агрегатів рівному 2 мм/с від концентрації та дисперсності твердої фази

Аналіз графіку дозволяє визначити проекцію на осі x та y у вигляді ізо-ліній витрати флокулянтів, наведених на рис. 4.8.

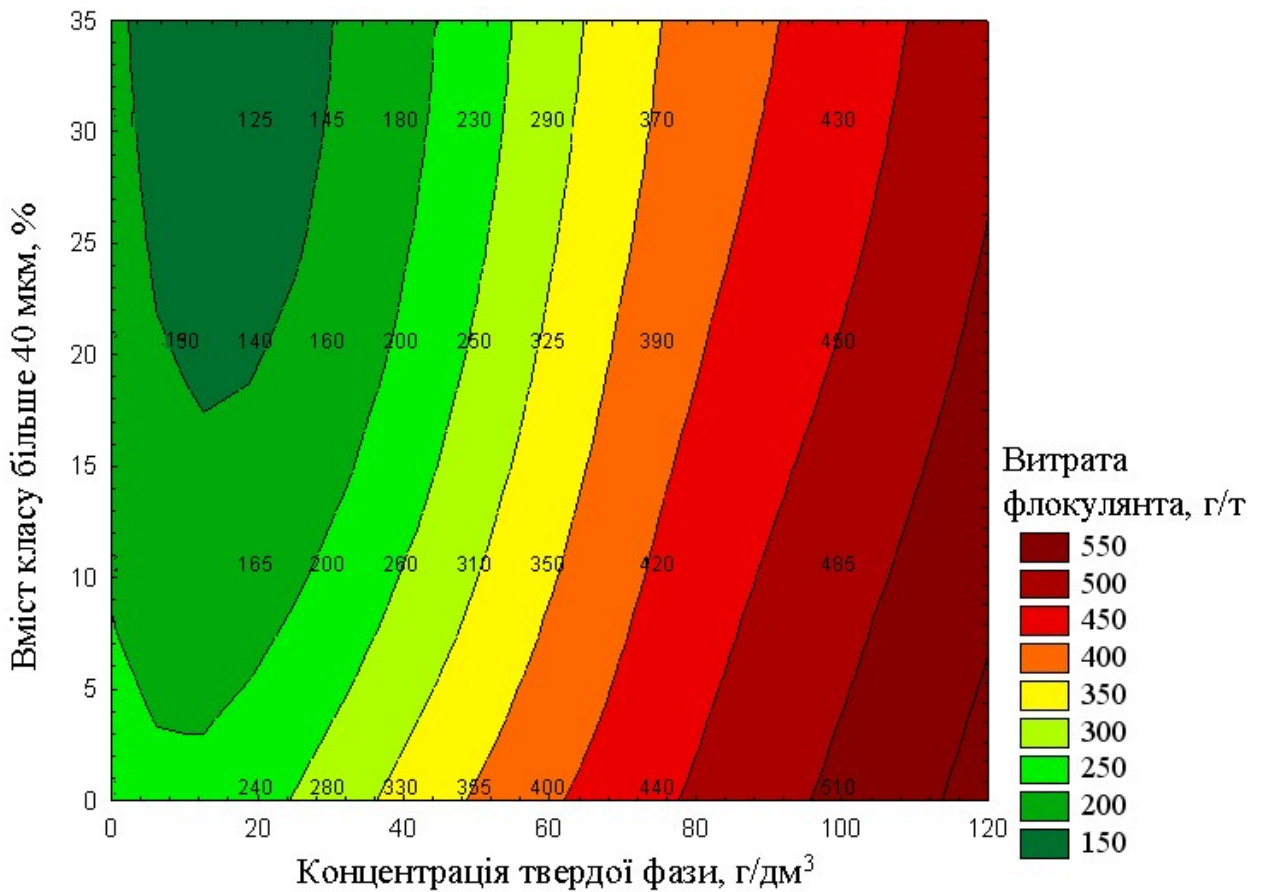


Рисунок 4.8 – Залежність витрати флокулянтів для досягнення критерію утворення міцних агрегатів рівному 2 мм/с від концентрації та дисперсності твердої фази

Математична обробка експериментальних результатів стосовно залежності витрати флокулянтів від факторів процесу флокуляції методом регресійного аналізу дозволила отримати наступне рівняння, з використанням якого відомими методами можна вирішити задачу оптимізації:

$$C_{\text{флок}} = 202 + 1,881C_{\text{тф}} - 4,88\gamma_{40+} + 0,0161C_{\text{тф}}^2 - 0,0068C_{\text{тф}} \cdot \gamma_{40+} + 0,0646 \cdot \gamma_{40+}^2 \quad (4.5)$$

Коефіцієнт детермінації цього рівняння 0,91, середньоквадратична помилка розрахунку – 23 г/т.

Використовуючи узагальнююче рівняння (4.5) можна розраховувати концентрацію флокулянтів для досягнення $V_2 = 2$ мм/с, або концентрацію та

дисперсність твердої фази (при заданій концентрації флокулянту), до яких треба корегувати шлам перед введенням флокулянтів.

Висновки до розділу 4

1. Вперше одержані математичні залежності критерію утворення міцних агрегатів від початкової концентрації і дисперсності твердої фази полідисперсних шламових суспензій, які дозволяють прогнозувати ефективність процесу зневоднення в центрифuzі.

2. Вперше встановлена залежність витрати флокулянту для досягнення критерію утворення міцних агрегатів, рівному 2 мм/с від концентрації та дисперсності твердої фази, знаходження значень якої дозволяє вирішити задачу мінімізації витрати флокулянту при заданому критерії УМА.

3. Отримані рівняння регресії дозволяють з високою достовірністю прогнозувати значення критерію УМА або витрату флокулянту в залежності від початкової концентрації і дисперсності твердої фази шламу.

4. Розв'язання знайдених рівнянь дозволяє управляти процесом утворення міцних агрегатів шляхом корегування складу шламу і мінімізувати витрату коштовного флокулянту при дотриманні оптимальних умов флокулоутворення.

РОЗДІЛ 5

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ШЛАМІВ

5.1. Рекомендації щодо апаратурно-технологічного оформлення процесу

Як вже вказувалося в розділі 1, руйнування вже утворених флокул при транспортуванні шламу від згущуючого устаткування до того зневоднюючого в сучасних водно-шламових схемах призводить до необхідності повторної флокуляції шламів перед кожним апаратом. Одним з важливих аспектів поліпшення економічних показників процесу очищення суспензій є зниження витрати дорогого флокулянту, який використовується для інтенсифікації процесу освітлення води. Тому, важливим є встановлення оптимальних умов роботи устаткування для зневоднення, які б дозволили одержати достатньо високий ступінь очищення без необхідності повторної флокуляції після транспортування.

Одним з найбільш проблемних місць в процесі зневоднення шламу є необхідність дофлокуляції шламу безпосередньо перед центрифугою (рис. 2.1). Це пов'язано з тим, що вивільнена при руйнуванні сфлокульованих структур дрібнодисперсна фаза не повністю осідає в центрифугу, виноситься з неї і забруднює фугат. Причиною цього є механічний вплив на флокули при транспортуванні згущеного шламу і його обезводнення в центрифугу. Додаткова флокуляція перед центрифугою призводить до збільшення витрати дорогих флокулянтів. З іншого боку, перефлокуляція шламу призводить до збільшення його в'язкості, що ускладнює роботу центрифуги.

Проведені експериментальні дослідження, що описані в 3 розділі, дозволяють підтримувати параметри процесу зневоднення таким чином, щоб залишкова швидкість осадження твердої фази зберігалась на рівні 2 мм/с. При такому або вищому значенні критерію УМА у дофлокуляції немає потреби.

Завдяки цьому, проведені дослідження, що їх описано у попередніх розділах, дозволяють сформулювати наступні рекомендації щодо вибору оптимальних технологічних параметрів здійснення процесу флокуляції полідисперсних шламів перед устаткуванням для згущення та зневоднення:

- найміцніші до механічного впливу агрегати утворюються при концентрації твердої фази в шламі $7 - 30 \text{ г/дм}^3$ (найкращі умови адсорбції флокулянта);

- найбільш міцні агрегати утворюються за присутності в шламі фракції більше 40 мкм понад 10% ;

- із зростанням концентрації твердої фази у згущеному шламі понад $140 - 150 \text{ г/дм}^3$ зменшується міцність агрегатів до механічного впливу;

- для флокуляції полідисперсного вугільного шламу рекомендується поєднання неіоногенного та аніонного флокулянта в співвідношенні $20:80 \%$ відповідно.

Отримані результати дозволяють управляти процесом утворення міцних агрегатів корегуванням концентрації і дисперсного складу шламу шляхом розбавлення або внесення додаткової фракції твердої фази перед введенням флокулянтів.

Результати експериментальних досліджень залежності можуть бути використані при оптимізації процесу флокуляції і отримання стійких до механічного впливу агрегатів. Це дозволяє управляти процесом зневоднення шламів з мінімальною деструкцією флокул, а отже економією витрати флокулянтів на етапі їх зневоднення.

Вищенаведені рекомендації впроваджено в удосконаленому способі очищення та зневоднення суспензій від завислих часток, який закладено в основу роботи розробленого для виконання цих операцій модуля. При його проектуванні ставилась технічна задача проведення очищення суспензії від завислих речовин з використанням флокулянту таким чином, щоб за рахунок використання нової операції – підготовки суспензії за концентрацією та дисперсним складом завислих речовин, вдалось би досягти технічного результа-

ту, який полягає в підвищенні ступеня очищення суспензії з одночасним зниженням вартості способу. Використання операції підготовки суспензії за концентрацією та дисперсним складом завислих речовин зумовлює інтенсифікацію процесу утворення і агрегації флокул.

При роботі модуля зневоднення шламів удосконаленої конструкції, наведеного на рис. 5.1, корегувати концентрацію твердої фази в шламі можливо шляхом згущування шламу у відстійнику до потрібних концентрацій або розбавлення шламу освітленою рідиною відстійника чи фугатом центрифуги.

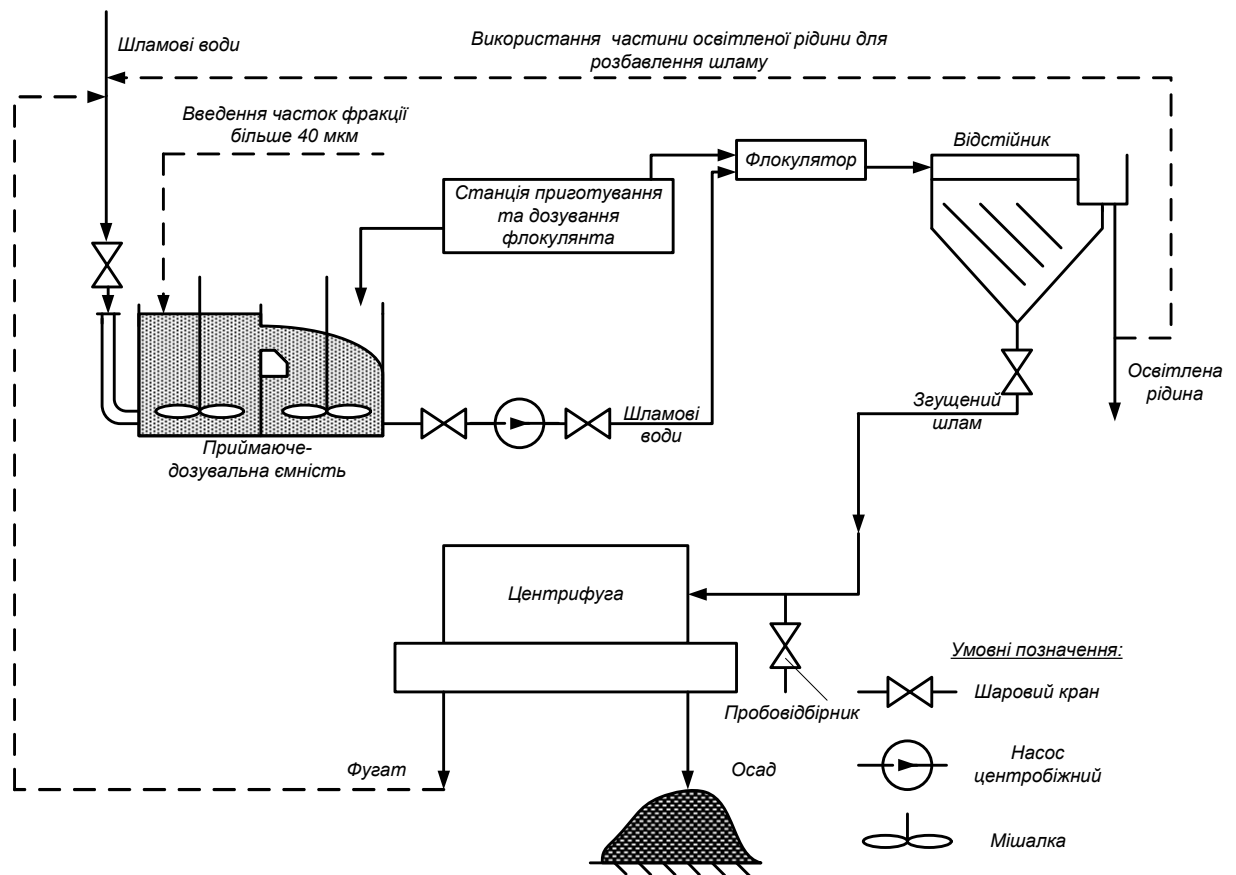


Рисунок 5.1 – Удосконалена схема ланцюга апаратів модуля зневоднення полідисперсних шламів

Зміна дисперсного складу шламу перед флокуляцією можлива шляхом додаткового внесення частинок шламу розміром від 40 до 100 мкм в змішувач-усереднювач. При підтриманні оптимальних умов за концентрацією та гранулометричним складом твердої фази у шламі можливо досягати мінімальної витрати флокулянтів, згідно кривих, наведених на рис. 3.18. Крім того,

значної економії флокулянту можливо досягти корегуванням шламу не до оптимальних умов, а до найбільш близьких величин концентрації та гранулометричного складу твердої фази, за яких критерій УМА набуває значень більше 2 мм/с.

Технічний результат, який досягається внаслідок використання даного способу роботи модуля, полягає в підвищенні ступеня видалення твердої фази із суспензії, зменшення вологості осаду з одночасним зниженням його вартості.

На підставі описаних вище рекомендацій, можливо управляти процесом і формувати достатньо міцні флокули з мінімальною витратою флокулянта при корегуванні шламу по концентрації (шляхом розбавлення) і гранулометричному складу (шляхом внесення додаткової фракції твердої фази відповідної крупності). Але в реальних умовах не завжди є можливість корегування шламу через відсутність джерела грубодисперсної твердої фракції або додаткової рідкої фази. Тому, другим шляхом поліпшення схеми роботи модуля очищення шламів може бути зміна конструктивних особливостей центрифуги, спрямованих на зниження механічного впливу на флокули та запобігання їх деструкції. Вирішення цієї задачі дозволить у сукупності з вищенаведеними рекомендаціями підвищити технологічну ефективність зневоднення шламу і, разом з тим, поліпшити техніко-економічні показники всього процесу видалення вологи з шламу і подальшої переробки твердої фази.

Цьому питанню і присвячений наступний підрозділ.

5.2 Шляхи зниження механічного впливу на флокули в центрифугі та напрямки її удосконалення

Створення принципово нового типу зневоднюючого устаткування, що значно перевершує за техніко-економічними показниками існуючі зразки, наприклад, такого, що описані в [125], є важливою науково-практичною задачею сьогодення.

Для виявлення особливостей процесу зневоднення полідисперсних шла-мів, з точки зору мінімізації деструкції флокул в центрифугі, проводилися ек-спериментальні дослідження, що мали на меті визначення способів зниження механічного впливу на флокули, зменшення виникаючих зсувових наванта-жень і, відповідно, підвищення ефективності зневоднення шламу в центри-фугах.

У сучасному зневоднюючому устаткуванні неможливо повністю позба-витися механічного впливу. В центрифугах під час роботи відбуваються про-цеси руйнування флокул при русі внутрішньороторних потоків. В той же час ефективно розділення відбувається тільки при збереженні розміру флокул, що забезпечує осадження в центрифугі.

Загальні рекомендації щодо зменшення руйнування флокул зводяться до зниження деформації зсуву [117, 124]. Так, наприклад, для запобігання про-цесам руйнування флокул автори публікації [125] пропонують зменшувати частоту обертання ротора центрифуги з урахуванням ослаблення дії відцент-рових сил. Але для застосування центрифуг необхідно мати гнучку схему управління швидкостями ротора і шнека для задавання таких режимів роботи агрегату, при яких стає можливим понизити фактор розділення центрифуги в 2 – 4 рази, щоб запобігти руйнування флокул в перенапруженому силовому полі. Проте, зі зниження фактору розділення одночасно і зменшується сту-пінь видалення вологи з осаду.

Окрім режимів руху самого потоку, істотний вплив мають процеси виті-кання шламу з труби живлення, розбризкування в барабані шнека і зіткнення з рухомим потоком на поверхні ванни ротора. Ці процеси настільки складні, що методологія їх кількісної оцінки на теперішній час недостатньо розробле-на і не дозволяє отримувати достовірні результати. Тому будь-які конструк-тивні вдосконалення вимагають експериментальної перевірки.

У центрифугах стандартної конструкції потік суспензії з труби живлення зустрічається з поверхнею барабана шнека практично під прямим кутом, як це ілюструє схема рис. 5.2.

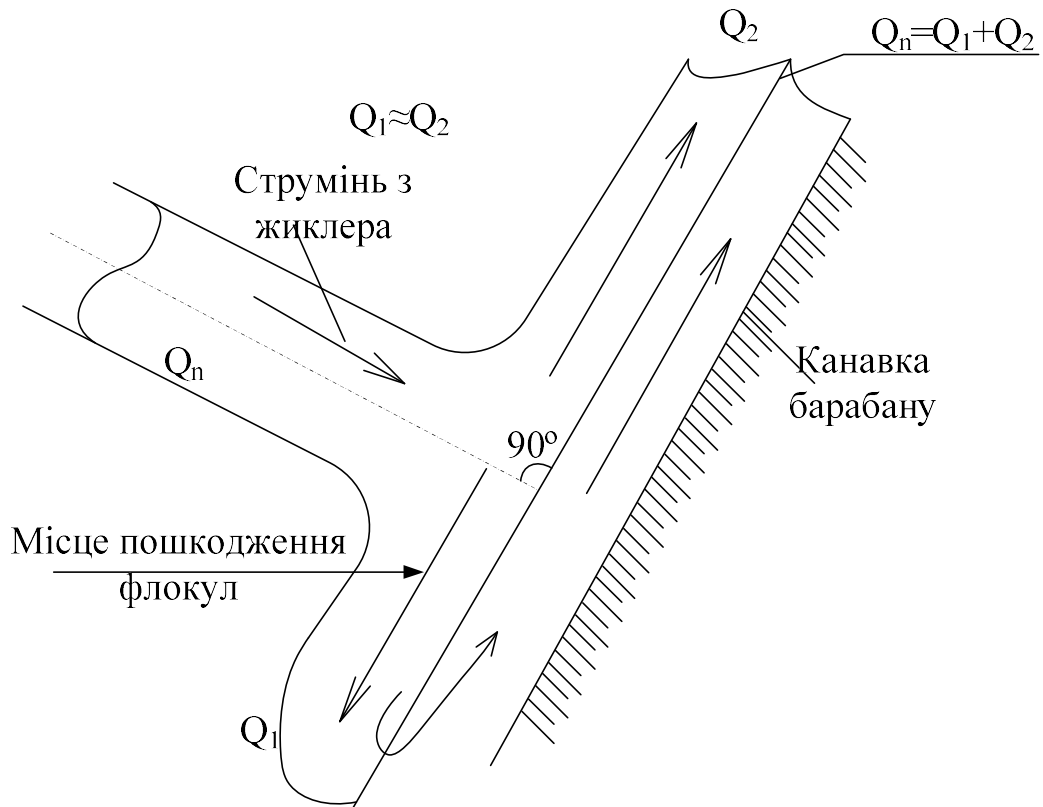


Рисунок 5.2 – Рух струменя суспензії з труби живлення та його зіткнення з суспензією в барабані шнека

При цьому, на частину потоку пульпи впливає зсувний градієнт швидкості. В результаті цього, значна частина (майже половина) потоку піддається підвищеному механічному впливу, який призводить до руйнування сфлукуюваних агрегатів.

В основу дослідження, яке проводилося на базі ТОВ «НТЦ «Екомаш» (Україна) з використанням реального шламу і устаткування модуля зневоднення шламових вод, було поставлено технічну задачу створення такої центрифуги, у якій за рахунок нової конструкції труби живлення вдалось би забезпечити зниження енергетичних витрат на розгін суспензії у роторі та мінімізувати деструкцію флокул. Технічний результат, який досягається при використанні даної конструкції центрифуги, полягає у зниженні енергетичних витрат на розгін суспензії у роторі центрифуги та підвищення ступеня зневоднення осаду.

Цей результат досягається тим, що центрифуга для розділення суспензій має наступні удосконалення: уздовж бокової поверхні труби живлення виконані канали, що направлені тангенційно до кола бокової поверхні труби живлення таким чином, щоб напрямок течії суспензії з каналів співпадав з напрямком обертання ротора. При цьому, розміщення каналів по довжині труби живлення рознесено.

Дослідження механічного впливу на флокули проводили на спрощеній схемі роботи модуля очищення, представленого на рис. 5.3. На схемі вказані розміри ділянок трубопроводу живлення центрифуги, на яких є різні умови руху суспензії, внаслідок яких флокули руйнуються і перед центрифугою мають залишкову швидкість (V_2 , мм/с). Наведена на рис. 5.3 промислова установка з високою точністю імітує роботу модуля (рис. 5.1) [134].

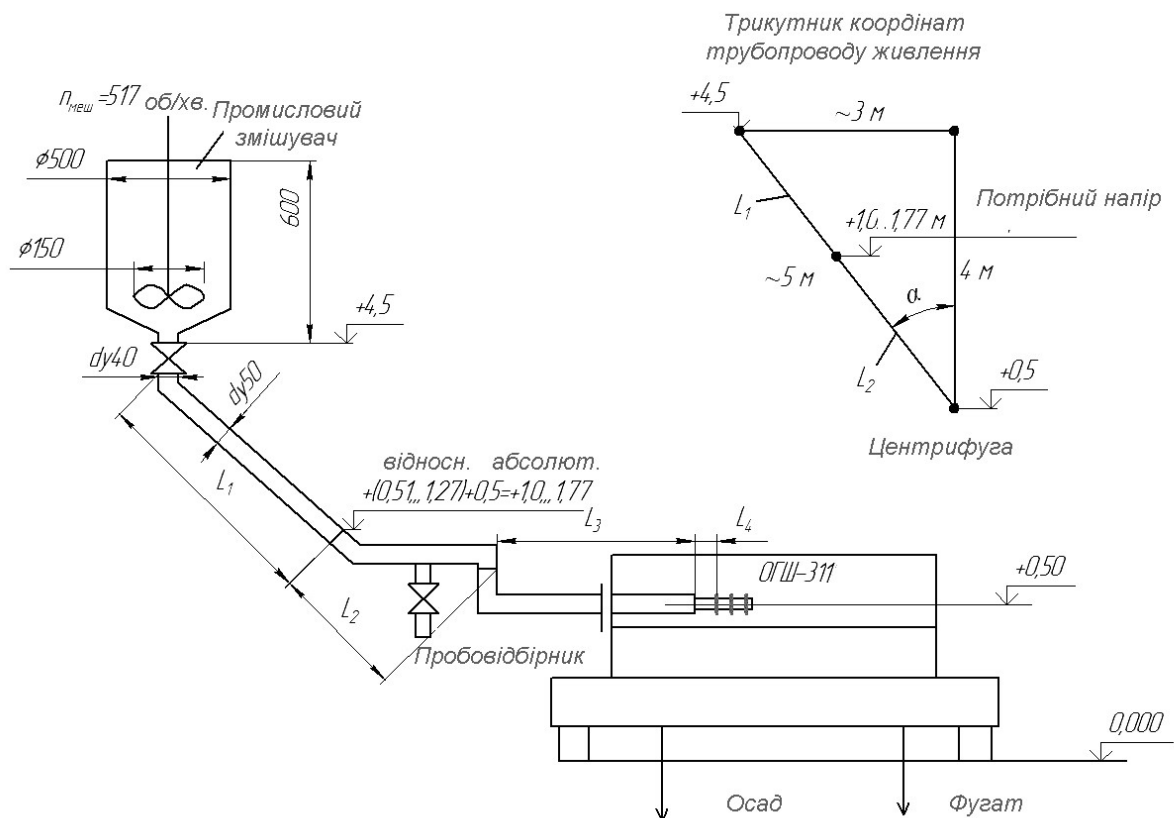


Рисунок 5.3 – Схема ланцюга апаратів промислового експерименту

Флокуляцію проводили на шламi одного з виробництв при різному вмісті твердої фази в пробі в інтервалі 60 – 150 г/дм³. Перед дослідями в лабора-

торному хімічному посуді підібрали флокулянт і його концентрацію так, щоб залишкова швидкість осадження флокул за методикою, описаною в розділі 2, склала приблизно 2 мм/с. Як вже вказувалось вище, при менших значеннях залишкової швидкості істотно падає ефективність зневоднення суспензії і спостерігається забруднення фугата дрібнодисперсною фазою шламу.

Через 15 секунд після дозування флокулянта одержані флокули почали осідати в мішалці, через 30 секунд після дозування флокулянта було відкрите живлення з промислової мішалки в центрифугу (рис. 5.3). Перед центрифугою був встановлений пробовідбірник, що дозволяв відбирати проби шламу і досліджувати значення критерію УМА перед центрифугою шляхом визначення швидкості осадження флокул в мірному циліндрі. В процесі промислового експерименту якість фугата центрифуги контролювалася постійно.

Дослідження механічного впливу на флокули проводили на стандартній центрифусі ОГШ-461 (Україна), а також на центрифусі ОГШ-311 (Україна), яку в ході експерименту модернізували шляхом зміни наступних конструкційних особливостей [136].

По-перше, була змінена конструкція труби живлення (рис. 5.4) таким чином, щоб пульпа стікатала по дотичній до поверхні барабана у напрямі його руху. Протягом експериментів при різній частоті обертання ротора в трубі живлення був відкритий перший перетин жиклерів (рис. 5.4).

Перший перетин жиклерів труби має три патрубки $\text{Ø} 12$ мм (довжина $l \approx 15$ мм).

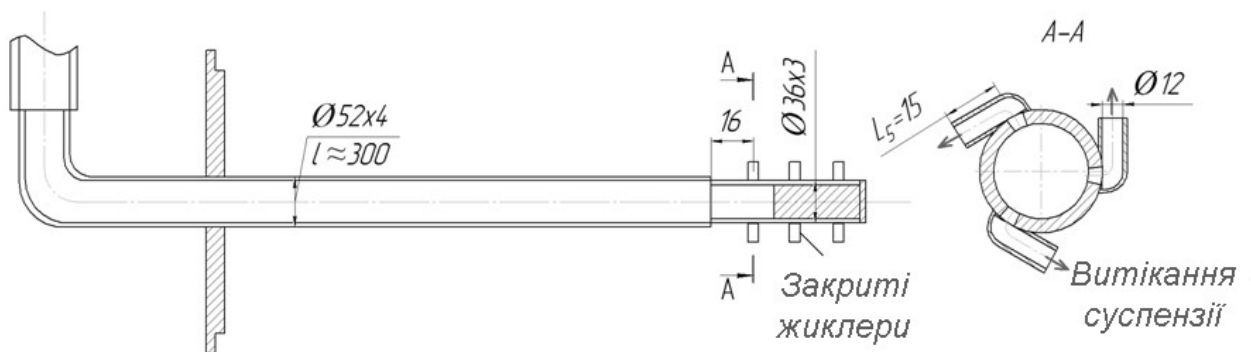


Рисунок 5.4 – Ескіз труби живлення центрифуги

По-друге, барабан шнека модернізованої центрифуги ОГШ-311 був обладнаний розгінною втулкою із направляючими трубками (рис. 5.5), які забезпечували плавну подачу суспензії спочатку в канавку розгінної втулки (рис. 5.5а), а потім її перетікання без розбризкування на поверхню ванни ротора (рис. 5.5б).

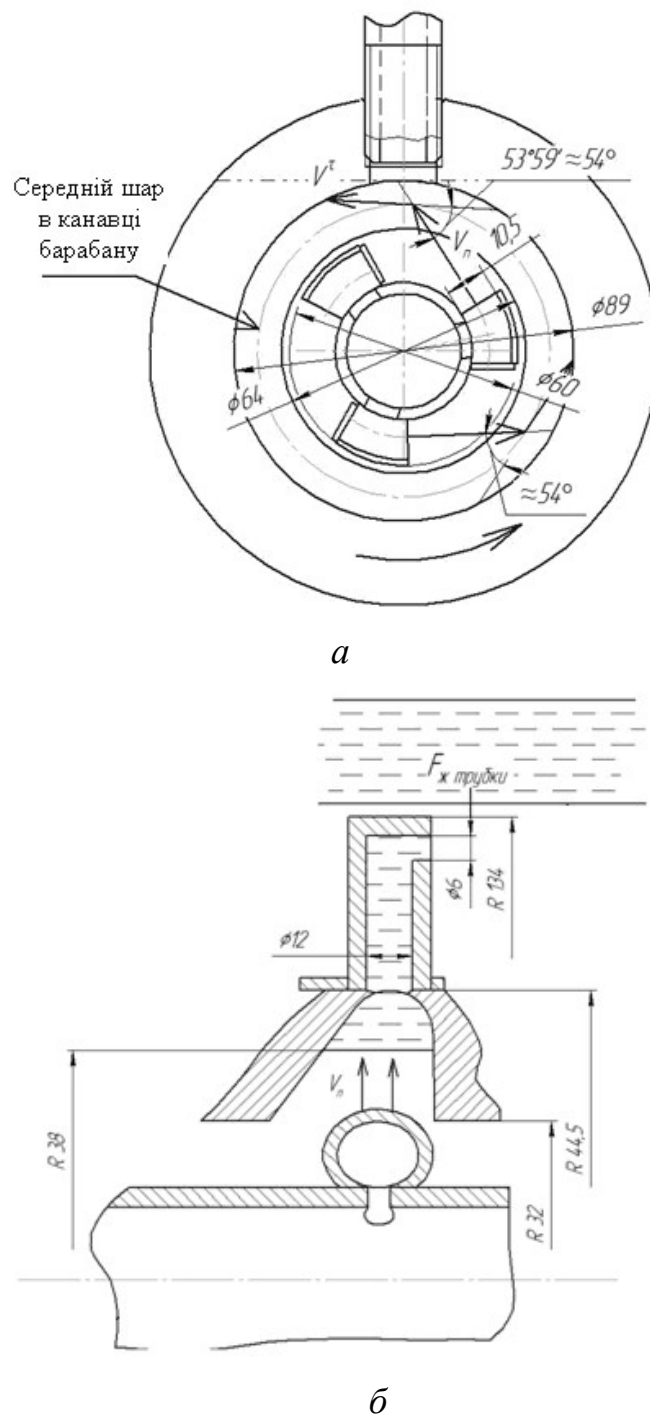


Рисунок 5.5 – Рух суспензії з жиклерів труби живлення в канавку розгінного барабана шнека і далі по спрямовуючій трубці

Таке рішення повинне перешкоджати розбризкуванню суспензії і направляти її відразу на поверхню ванни ротора, тим самим, зменшуючи зсувні напруги на флокули та їх руйнування.

В результаті експериментальних досліджень із застосуванням центрифугальної установки ОГШ-461 (без удосконалень) і ОГШ-311 (з розгінною втулкою) при різній частоті обертання ротора було виявлено, що вказані вище конструктивні зміни позитивно впливають на ефективність роботи центрифуг (табл. 5.1).

Аналіз даних табл. 5.1 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 сфлокульовані агрегати.

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 – 28 – 30 %.

В той же час, слідвидзначити, що ефективність центрифуги без зміни конструкції труби живлення і розгінної втулки (навіть при залишковій швидкості осадження флокул 2 мм/с) не сильно відрізняється від її ефективності без флокулянта. Це свідчить про те, що утворені флокули практично повністю руйнуються в центрифугі стандартної конструкції за рахунок механічного впливу, що перевищує їх міцність.

Таблиця 5.1 – Порівняльна характеристика випробувань центрифуг

Найменування параметра	Центрифуга ОГШ-461 (без зміни конструкції)			Центрифуга ОГШ-311 (з удосконаленням)		
	1600	1900	2400	2500	3000	3500
Частоті оборотів ротора, об/хв.	1600	1900	2400	2500	3000	3500
Фактор розділення (Fr)	654	923	1470	1080	1550	2110
Величина струму холостого ходу електроприводу ротора, А	29,7	32,5	34	10,4	11,5	12,6
Витрати електроенергії на 1 м ³ води, кВт/м ³	0,66	0,68	0,82	0,27	0,38	0,655
Ступінь затримання твердої фази суспензії без обробки флокулянтном, %	60	58	86	80	90	85
Витрати електроенергії на зневоднення 1 м ³ суспензії (при концентрації твердої фази 100 – 150 г/дм ³) без обробки флокулянтном, кВт/м ³	0,7	0,72	0,93	0,6	0,765	0,98
Ступінь затримання твердої фази суспензії з використанням флокулянту при залишковій швидкості осідання твердої фази 2 мм/сек, %	26	47	91,6	99	98	80
Витрати електроенергії на зневоднення 1 м ³ суспензії (при концентрації твердої фази 70 – 100 г/дм ³) з використанням флокулянту, кВт/м ³	0,66	0,71	0,75	0,535	0,76	1,336

На другому етапі досліджень було проаналізовано режимні параметри руху рідини в центрифuzі модернізованої конструкції ОГШ-311. Для розрахунку приросту швидкості при зустрічі струменів з жиклерів труби живлення і шарів суспензії, що знаходяться на внутрішній поверхні барабана шнека ви-

користовуємо тангенціальну швидкість на внутрішній поверхні барабана шнека і проекцію швидкості витікання суспензії з жиклера, а саме:

$$|V_{\text{внт.}} \cdot \sin 36^\circ - V_{\tau \text{ бар}}| = \Delta V \text{ м/с.} \quad (5.1)$$

Для виключення пошкодження флокул необхідно мінімізувати ΔV .

З жиклерів труби живлення пульпа напірним струменем потрапляє в канавку розгінного барабана шнека (рис. 5.4а), яка заповнена частково пульпою. Кут зустрічі струменя визначений з графічного аналізу фактичної конструкції, який складає $\approx 54^\circ$.

Швидкість витікання пульпи з жиклера труби живлення при різних напорах визначається формулою:

$$V_n = \varphi \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (5.2)$$

де φ – коефіцієнт швидкості = 0,815;

H – напір, м.

Значення швидкостей витікання з жиклера труби живлення, визначені при напорах 0,51, 1,27 та 2,94 м складають відповідно 2,58, 4,1 та 6,2 м/с.

Окружні швидкості на середньому радіусі канавки в розгінному барабані шнека при різних значеннях обертів ротора (1500 – 3000 об/хв.) наведені в табл. 5.2.

$$V_{\text{окр}} = \omega \cdot R_{\text{ср}}, \quad (5.3)$$

де ω – кутова швидкість барабана шнека, рад/с;

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (5.4)$$

де n – частота обертів шнека, об/хв.

$$R_{cp} = 38 \text{ мм} = 0,038 \text{ м}, \quad \sin 36^\circ = 0,588.$$

В ході експериментальних досліджень центрифугування сфлоккульованого шламу мінімального значення вмісту твердої речовини у фугаті було набуто при напорах 0,51 м і 1,27 м, тобто приріст швидкості руху пульпи в місці контакту струменя з поверхнею пульпи в розгінному барабані шнека до 8 м/с (табл. 5.2, виділено жирним).

Таблиця 5.2 – Значення швидкості на середньому радіусі канавки в розгінному барабані шнека

ω , рад/с	n , об/хв.	$V_{окр} = \omega \cdot R_{cp}$, м/с	$ V_n \cdot \sin 36^\circ - V_{окр} $, м/с			$Fr = \frac{0,31 \cdot n^2}{1800}$
			При витраті $Q_{п}$, м ³ /годину			
			3	5	7,3	
150	1500	5,7	4,2	3,3	2,1	388
200	2000	7,6	6,1	5,2	4,0	689
250	2500	9,5	8,0	7,1	5,9	1076
300	3000	11,4	9,9	9,0	7,8	1550

Характер розподілу витрат і характер руху суспензії при зустрічі струменя з поверхнею пульпи в розгінному барабані в осаджувальній центрифугі з модернізованою трубою живлення показаний на рис. 5.6.

Згідно рис. 5.6, при зустрічі струменів пульпи з жиклерів труби живлення з пульпою в канавці розгінного барабана шнека під кутом, значно менша частина потоку (порівняно зі центрифугами стандартної конструкції, схему потоків, наведених на рис. 5.2) сфлоккульованої суспензії Q_1 отримує градієнт зсуву швидкості порядку 11 – 12 м/с.

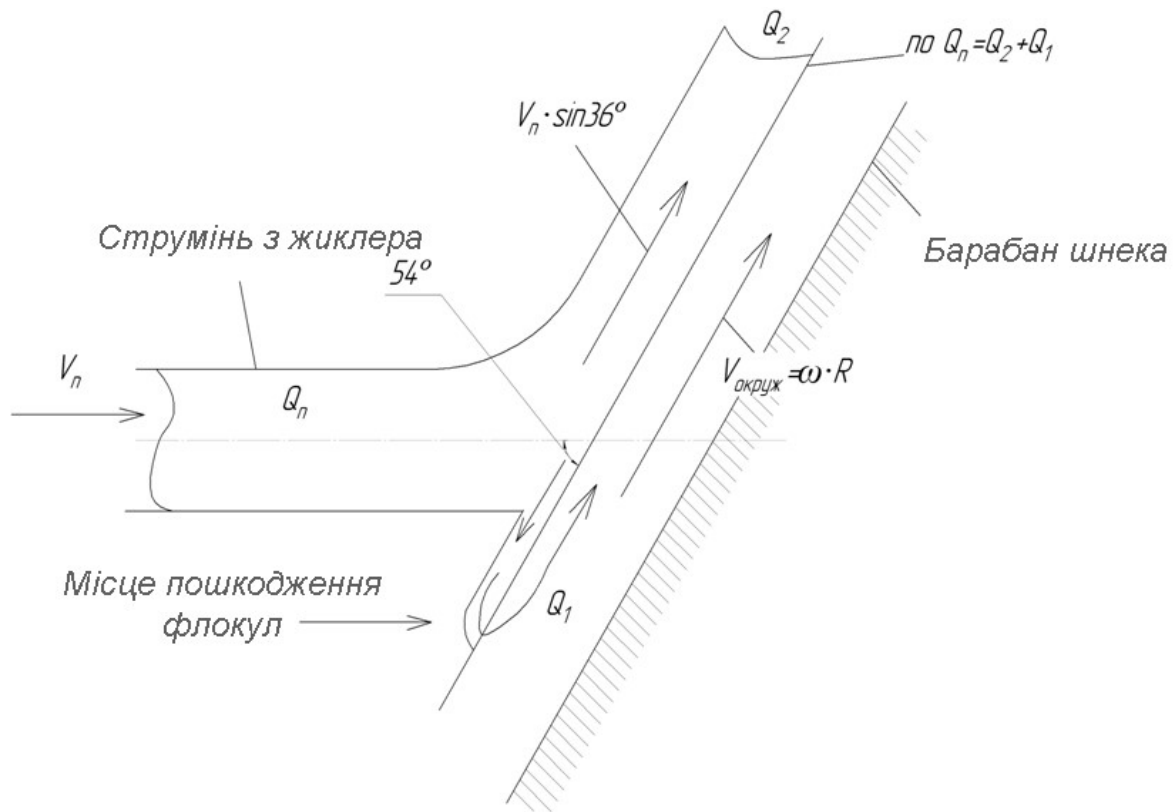


Рисунок 5.6 – Схема зустрічі струменів суспензії з жиклерів труби живлення з пульпою в канавці розгінного барабана шнека в модернізованій центрифугі ОГШ-311

За відсутності каналів, які закручують потік у напрямку руху барабану шнека, в центрифугах стандартної конструкції потік пульпи з жиклерів зустрічається з поверхнею барабана шнека практично під прямим кутом (рис. 5.2). Тому, бажано, в пульпі, обробленій флокулянтном, мати його надлишок для відновлення пошкоджених флокул, що призводить до додаткових витрат.

Таким чином, зміна конструкції центрифуги забезпечує додаткове (окрім рекомендацій, наведених в розділі 5.1) конструкторсько-технологічне забезпечення міцності флокул суспензії за рахунок зниження гідромеханічного впливу на сфлукуювані агрегати в процесі зневоднення в полі відцентрових сил.

На підставі проведених досліджень були розроблені, випробувані та впроваджені у виробництво (Додаток А) модернізовані осаджувальні горизонтальні центрифуги.

нтальні шнекові машини ОГШ 461Л-01 (Додаток Б) та ОГШ 311К-111 (Додаток В). Зміна профілю ротора центрифуги дозволила потроїти продуктивність за осадом, а саме: з 1,5 т/год (як у відомих аналогів з діаметром ротора 500 мм – центрифуга ОГШ 501К-04) до 5,5 т/год, що фактично означає скорочення питомого енергоспоживання на 1 т зневодненого продукту в три рази.

Якщо порівняти ступінь зневоднення шламів у модернізованій центрифугі ОГШ 461Л-01, який характеризується залишковою вологістю на рівні 28 – 30 % проти 40 – 45 % при зневоднення аналогічних за складом шламів у США на вуглезбагачувальній фабриці Rockspring [13] (рис. 5.7), то стають очевидними переваги запропонованих удосконалень конструкції.

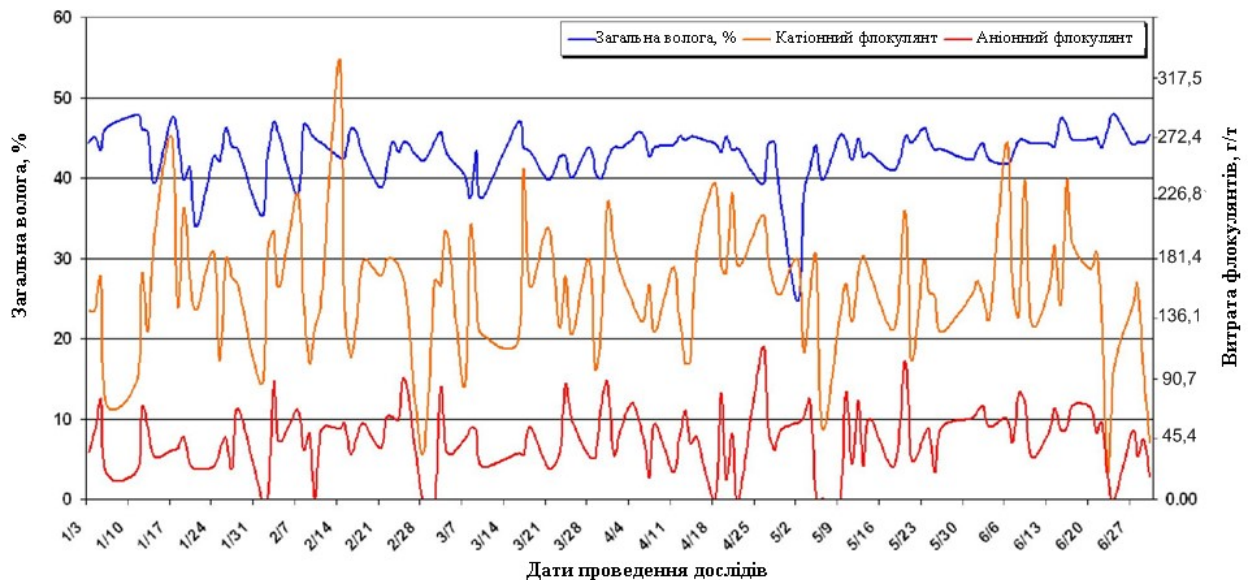


Рисунок 5.7 – Результати зневоднення полідисперсних шламів на вуглезбагачувальній фабриці Rockspring (середня вологість осаду 45%)

Зовнішній вигляд зневодненого шламу на модернізованій осаджувальній центрифугі ОГШ 461Л-01 при роботі впровадженого на виробництві модуля (Додаток Б) представлений на рис. 5.8, а злив очищеної води із ступенем видалення твердої фази на рівні 98 – 99 % – на рис. 5.9



Рисунок 5.8 – Вигляд осаду центрифуги ОГШ 461Л-01 на промисловому майданчику (середня вологість 30%): *а* – вид зверху; *б* – вид збоку.



Рисунок 5.9 – Вигляд освітленої води: *а* – після гравітаційного осадження в тонкошаровому відстійнику; *б* – після зневоднення на центрифугах ОГШ 461Л-01.

Таким чином встановлено, що можливим шляхом зниження гідромеханічного впливу на флокули може бути конструкторсько-технологічна зміна умов руху сфлокульованої суспензії. Модернізація конструкції центрифуги дозволяє понизити механічну дію на утворені флокули і зберегти їх розмір, що підвищує ефективність зневоднення суспензії до 99% та забезпечити високий рівень зневоднення осаду до 28 – 30 %.

Висновки до розділу 5

1. Розроблені рекомендації щодо вибору оптимальних технологічних параметрів флокуляції полідисперсних шламових вод.

2. Розроблена удосконалена схема зневоднення шламів з урахуванням можливості корегування його складу за концентрацією та гранулометричним складом.

3. Досліджено шляхи зниження механічного впливу на сфлукуювані агрегати полідисперсного шламу. Визначено, що шляхом зміни конструкції труби живлення і умов подачі шламу в центрифугу можна знизити гідромеханічний вплив на флокули, забезпечивши їх мінімальну деструкцію. Встановлено, що модернізація центрифуги призводить до підвищення ефективності очищення сфлукуюваного шламу до 99 % і зменшення винесення твердої фази з фугатом, а також підвищення ступеня зневоднення осаду до 28 – 30 %. Порівняльний аналіз роботи стандартної і модернізованої центрифуг показав також зниження витрати електроенергії на зневоднення шламу в результаті зменшення гідравлічного опору руху суспензії.

4. Максимальна ефективність роботи флокуляційного методу осадження твердої фази в центрифугах досягається при сукупності дотримання зазначених в п. 5.1 рекомендацій та використанні осаджувальних машин удосконаленої конструкції.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу виявлення закономірностей і вибору раціональних режимів процесу зневоднення полідисперсних шламових 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 шламі понад 140 – 150 г/дм³ суттєво зменшується міцність флокул під механічним впливом.

4. Запропоновано конструктивні зміни центрифуги, що дозволяють зменшити механічний вплив на сфлокульований шлам. Проведені випробування модернізованої за цими рекомендаціями обладнання показали зменшення енерговитрат та підвищення ступеню зневоднення шламів у порівнянні з існуючим устаткуванням.

5. Результати роботи, отримані закономірності та модернізоване устаткування впроваджені в ДУ «Науково-дослідний і проектний інститут основної хімії» (м. Харків) в процес проектування технологічних установок з утилізації рідких і твердих відходів содового виробництва. Наукова розробка впроваджена ТОВ «Науково-технічний центр Екомаш» (м. Харків) при проектуванні технологічних установок з утилізації рідких і твердих відходів металургійного виробництва. Приватне підприємство «Науково-виробнича фірма «Добробут» (м. Олександрія) впровадила центрифугу ОГШ 311К-111 для зневоднення гуматних добрив.

6. Результати виконаних досліджень впроваджено в навчальний процес при викладанні спеціальних дисциплін, у курсовому та дипломному проектуванні за спеціальностями 101 «Екологія» та 133 «Галузеве машинобудування» на кафедрі хімічної техніки і промислової екології НТУ «ХП».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андронов В. А. Екологічно безпечні системи оборотного водопостачання коксохімічних, металургійних і машинобудівних підприємств: автореф. дис ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Володимир Анатолійович Андронов; В.о. Донец. нац. ун-т.– Донецьк, 2006.– 32 с.
2. Пантелят Г. С. Создание замкнутых систем оборотного водоснабжения на предприятиях черной металлургии / Г. С. Пантелят, В. А. Андронов, Л. Н. Кузнецова, Д. А. Царенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – №9. – С. 6-8.
3. Олійник Т. А. Техногенні родовища та їх класифікація / Т. А. Олійник, Н. В. Кушнірук, Л. Н. Саїтгарєєв, І. О. Нагнибіда // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 50(91). – С. 213-217.
4. Атаманюк А. А. К вопросу сгущения суспензий железосодержащих взвесей сточных вод металлургического комбината «Запорожсталь» / А. А. Атаманюк, А. М. Касимов // Научно-технический и производственный журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 2012. – №5(227). – С. 95-97.
5. Атаманюк А. А. Изучение процесса сгущения сточных вод содержащих твердые взвеси/ А. А. Атаманюк, А. М. Касимов // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення. Збірник наукових статей VIII науково-практичної конференції Т.2 / УкрНДІЕП. – 2012. – С. 28-31.
6. Четверик М. С. Технологии и технологические схемы разработки действующих техногенных месторождений / М. С. Четверик, Е. А. Бубнова, А. П. Семенов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2009. – Вип. 82. – С. 122-130.
7. Войтович С. Шахтні води як один із чинників забруднення довкілля Червоноградського гірничопромислового району //: Мінералогічний збірник. - Львів: Львів. нац. ун-т ім. І. Франка, 2013. – № 63, вип. 1. – С. 94.

8. Пилов П. И. Гравитационная сепарация полезных ископаемых / П. И. Пилов.– Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003. – 123 с.
9. Справочник по гидравлике / В. А. Большаков и др. – Киев.: Вища школа, 1984. – 343 с.
10. Туктаров Д. Х. О работе систем очистки буровых растворов / Д. Х. Туктаров, Д. Н. Корчагин, П. Н. Корчагин, А. Б. Охотников // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – №1. – С. 47-52.
11. Копанева Н. Г. Сгустители с наклонными пластинами типа ЗГНГД / Н. Г. Копанева, В. И. Дробченко, А. С. Кофанов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 50(91). – С. 186-191.
12. Полулях А. Д. Технологические регламенты углеобогачительных фабрик. Справочно-информационное пособие / А. Д. Полулях. – Днепропетровск, НГУ. – 2000. – 855 с.
13. Operation of belt filter presses at the rockspring development preparation plant // С. Murphy, С. Bennett, G. Olinger, В. Cousins. http://www.corrxan.com/Coalprep_2012_Paper.pdf
14. Deberdeev I. Kh.. Study of Interaction of Flotation Reagents with Fine Particles of Highly Mineralized Coal Slimes / I. Kh. Deberdeev, В. I. Linev, Melik-Gaykazian at al. // Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. – China. – 2006. – Vol. 1. – p. 378-384.
15. Буравчук Н. И. Перспективные направления утилизации отходов добычи и сжигания углей / Н.И. Буравчук, О.В. Гурьянова, Е.П. Огороков, Л.Н. Павлова // ОРТ– Москва – 2009. – Вып. № 28 – С. 10-11.
16. Серегин А. И. Разработка технологических схем переработки угольных шламов в товарную продукцию / А. И. Серегин, Е. Г. Горлов // Горный информационноаналитический бюллетень.— 2008. – №5. – С.241-244.
17. Динчук В. А. Комплексная переработка отходов углеобогащения / В. А. Динчук, Б. Б. Потапов // ОРТ– Москва – 2008. – Вып.№ 27 – С. 46-47.

18. Серегин А. И. Прогрессивный алгоритм создания технологий производства брикетов из угольных шламов / А. И. Серегин, Е. Г. Горлов // Горный информационно-аналитический бюллетень.– МГГУ.– 2008.– №3.– С.244.
19. Лучка О. М. Перспективні шляхи утилізації кеку / О. М. Лучка, З. С. Одноріг, В. В. Сухопляс // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2013. – № 761. – С. 300-302.
20. Егурнов А. И. Получение и перспективы применения композиционного углеродного топлива на основе вторичных топливных энергоносителей / А. И. Егурнов, С. Д. Борук, Н. Н. Трояновская // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 50(91). – С. 204-208.
21. Сокур А. К. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов нефлотационной крупности / А. К. Сокур // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – С. 126-136.
22. Касабекова Г. Т. Выбор эффективных типов отстойников для осаждения дисперсных примесей / Г. Т. Касабекова, К. Д. Тойбаев // Вестник КазНТУ имени К.И. Сатпаева. – Алматы: 2014. –, №3. <http://vestnik.kazntu.kz/files/newspapers/81/2713/2713.pdf>
23. Хмеленко И. П. Анализ объемов, состава и способов переработки шламов углеобогатительных фабрик / И. П. Хмеленко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – Вып. №82. – 2009. – С. 176-181.
24. Технологическо-екологический инжиниринг при обогащении полезных ископаемых: Учеб. пособие / А. Д. Полулях, П. И. Пилов, А. И. Егурнов и др. – Д.: НГУ, 2012. – 712 с.
25. Еремеев И. В. Анализ результатов обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности / И. В. Еремеев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – С. 178-184.

26. Надутый В. П. Оптимизация процесса вибрационной классификации угольных шламов / В. П. Надутый, А. М. Эрперт, И. П. Хмеленко // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінніца. – 2008. – Вип. №2(51).– С. 85-89.

27. Надутый В. П. Тонкое вибрационное грохочение при переработке угольных шламов / В. П. Надутый, А. Ф. Нагорский, А. И. Шевченко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. труд. ИГТМ НАН Украины. – Днепрпетровск.– Вип. № 58. – 2005. – С.176-181.

28. Шевченко Г. А. Поличастотные грохоты для разделения тонких сыпучих материалов / Г. А. Шевченко, В. Г. Шевченко, А. Р. Кадыров // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 38(79). – С. 44-50.

29. Маслов С. Г. Инновационные решения в области тонкого грохочения сыпучих материалов / С. Г. Маслов // Машиностроение и техносфера: сб. трудов XVII международной научно-технической конференции. Донецк. – 2010. – С. 169-171.

30. Букин С. Л. Разработка высокоэффективного виброгрохота с бигармоническим режимом работы для тонкой классификации угольных шламов / С. Л. Букин, А. Н. Корчевский, С. Г. Маслов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 41 (82) – 42 (83). – С. 121-126

31. Надутый В. П. Исследование работы валкового вибрационного грохота в промышленных условиях / В. П. Надутый, А. И. Егурнов, В. Ф. Ягнюков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – С. 70-73.

32. Еремеев И. В. Изменение структуры механических свойств угольногошлама в процессе обезвоживания на сите грохота / А. Д. Полулях, И. В. Еремеев //Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 52(93). – С.96-106.

33. Гарус В. К. Удосконалення технології тонкого грохотіння вугільних шламів Західного Донбасу, що містять мул / Автореф. дис... канд. техн. наук. – Дніпропетровськ. – 2004. – 19 с.

34. Франчук В. П. Мелкоячеистые резиновые сита: расчет и опыт применения / В. П. Франчук, А. В. Анциферов, А. И. Егурнов // 5 Конгресс обогатителей стран СНГ, Москва, 23-25 марта, 2005: Сборник материалов. – Т. 2. – М.: Альтекс. – 2005. – С. 22-25.
35. Морус В. Л. Исследование процесса обезвоживания угольного концентрата на дуговом грохоте типа "перекат" / В. Л. Морус, Е. Ф. Земляной, Д. К. Овчаренко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2013. – Вип. 111. – С. 130-139.
36. Томилин В. Б. Перспективное оборудование и технология обогащения угля / В. Б. Томилин, В. И. Хайдакин, В. Н. Корнеева, Н. И. Абакумов // Уголь–2005. – Москва – №12– С. 58-61.
37. Анисимов Н. Т. Разработка многофункционального устройства для обработки угольных шламов в схемах обогащения / Н. Т. Анисимов, В. С. Мочков, З. В. Багмут, Г. Н. Дмитров, С. А. Воронин // Збагачення корисних копалин: Науч.-техн. зб. НГУ. – Днепропетровск. – 2002. – Вип. № 15(56). – С. 66-70.
38. Еремеев И. В. Складирование жидких отходов углеобогащения в породных отвалах / А. Д. Полулях, А. Н., Корчевський, И. В. Еремеев // Уголь Украины. –2015. – № 6. – С. 48-51.
39. Егурнов А. И. Технология контейнерной обработки жидких отходов ЦОФ "Павлоградская": Тендерное предложение / А. И. Егурнов. – Д.: ООО "АНА-ТЕМС", 2011. – 30 с.
40. Полулях А. Д, Техничко-екологический анализ технологических решений по обработке жидких отходов ЦОФ "Павлоградская" / А. Д. Полулях, Д. А. Полулях // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн.зб. – 2012. – №52 (93). – С. 145-154.
41. Вертола Л. Т. Внедрение центрифуги для обезвоживания угольного шлама углеобогатительных предприятий / Л. Т. Вертола, С. Ф. Абрамюк // Збагачення корисних копалин. – 2005. – □□Вип. 24(65).

42. Котюк Ф. А. Современные методы и оборудование для обезвоживания осадков сточных вод / Ф. А. Котюк // Коммунальное хозяйство городов Научно-технический сборник. – 2004. – №55. – С. 37-40
43. Parekh V. K. *Mechanic Dewatering* / V. K. Parekh, J. P. Matoney // *Coal Preparation*, 5th Edition, Chapter 8 (Leonard J.W.), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Littleton, Colorado. – 1991. – P. 499-580.
44. Gallagher E. *Dewatering of Fine Coal by Screen-Bowl Centrifuges* / E. Gallagher, J. E. Lewis, J. J. Post, A. R. Swanson, L. W. Armstrong // *Proceeding 1st Australian Coal Preparation Conference*, Newcastle, Australia, 1981. – P. 135-154.
45. Records A. *Decanter Centrifuge Handbook* / A. Records, K. Sutherland // 1st Ed., Elsevier Science Inc., New York, 2001. – P. 421.
46. Hart G. *Improving Fine Coal Centrifuging – Stage 3* / G. Hart, P. Townsend, G. Morgan, B. Firth // *Australian Coal Association Research Program*, Project C9047, 2005.
47. Козлов В. А. Осадительно-фильтрующие центрифуги «Декантер» техническая основа обезвоживания Угольного шлама / В. А. Козлов, В. И. Новак // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2011. – №7 – С.229-237.
48. Bethell P. J. *Froth Flotation – To Deslime or Not to Deslime?* / P. J. Bethell // *CPSA Journal*, Vol.3, No. 1, Spring 2004. – p.12-15.
49. Пономарева Н. Г. Направления усовершенствования процесса обезвоживания полидисперсных материалов в осадительных центрифугах со шнековой выгрузкой осадка / Н. Г. Пономарева, А. Г. Трошин, В. Ф. Моисеев. // *Вісник НТУ «ХП»*. – Х.: НТУ «ХП». – 2005. – № 26. – С. 150 – 156.
50. Трошин Г. П. Обогащение угольного шлама на осадительных центрифугах / Г. П. Трошин // *Уголь Украины*. – 2003. – № 5. – С. 44.
51. Пономарьова Н. Г. Переробка сховищ стічних вод із застосуванням відстійних центрифуг зі шнековим вивантаженням осаду / Н. Г. Понома-

рева, А. Г. Трошин, В. Ф. Моисеев // Вісник сумського державного університету. – № 5(89). – 2006. – С. 97 – 102.

52. Панфилов, В. К. Обогащение антрацитового шлама на центрифугах / В. К. Панфилов, А. Ф. Мацак, Г. П. Трошин // Уголь Украины. – 2003. – № 5 (557). – С. 35–42.

53. Мацак, А. Ф. Обогащение угольного шлама на осадительных центрифугах [Текст] / А. Ф. Мацак, А. В. Мишанина, А. А. Шкоп // Горная промышленность. – 2007. – № 2(71). – С. 42–48.

54. Хайдакин В. И. Применение центробежных аппаратов в угольной промышленности [Текст] / В. И. Хайдакин, В. Н. Корнеева, А. Г. Трошин // Збагачення корисних копалин. Наук. техн. зб. – 2003. – Вип. 17(58). – С. 85–89.

55. Новак В. И. СЕТСО – 15 лет в углеобогащении / В. И. Новак, В. А. Козлов, // Уголь: ежемес. науч.-производ. журнал (Россия)., 2009. – №6. – С. 15-19

56. Визиковски К. 1994–2004. "СЕТКО" в Кузбассе – этапы большого пути. Осадительно-фильтрующие центрифуги "Декантер" (США) / К. Визиковски // Уголь: ежемес. науч.-производ. журнал (Россия). – 2004. – №8. – С. 72–77.

57. Кинебас А. К. Обезвоживание осадков сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга / А. К. Кинебас, Г. А. Панкова, Б. В. Васильев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 9 .– С. 54-59.

58. Шибитов Н. С. Промышленные испытания декантерной установки фирмы «Флоттвег» на шламовых сточных водах ОАО «Химпром» / Н. С. Шибитов, Н. В. Шибитова, Н. В. Воронович // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – №3. – С. 42-46

59. Назимко Е. И. К вопросу об исследовании перемещения влаги в порах осадков при их переменной проницаемости / Е. И. Назимко,

Е. Е. Гарковенко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2005. – Вип. 21(62). – С. 86–92.

60. Кофанов А. С. Пути снижения влажности флотоконцентрата и тонкого шлама / А. С. Кофанов, Л. Т. Вертола, С. Ф. Абрамюк, В. П. Франчук // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2005. – Вип. 23(64). – С. 142–146.

61. Олійник М.О. Аналіз впливу різноманітних факторів на процес флокуляції частинок / М. О. Олійник, Ф. Г. Татаринів // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 50(91). – С. 218-223.

62. Дерягин Б. В. Вода в дисперсных системах / Б. В. Дерягин, И. В. Чураев, Ф. Д. Овчаренко. – М.: Химия, 1989. – 288 с.

63. Мягченков, В. А. Сополимеры акриламида с функцией флокулянтов: монография / В. А. Мягченков, В. Е. Проскурина. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2011. – 290 с.

64. Lee K. E. Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review / K. E. Lee et al // Chemical Engineering Journal. – 2012. – V.203. – P. 370–386.

65. YYu J. Flocculation of kaolin particles by two typical polyelectrolytes: a comparative study on the kinetics and floc structures / J. Yu, D. Wang, X. Ge, M. Yan, Y. Min // Colloid. Surf. A. – 2006. – V.290. – P. 288–294.

66. Guibal E. Coagulation and flocculation of dye-containing solutions using a biopolymer (chitosan) / E. Guibal, J. Roussy // React. Funct. Polym. – 2007. – V.67. – P. 33–42.

67. Сергеев П. В. Селективна флокуляція вугільних шламів органічними реагентами / П. В. Сергеев, В. С. Білецький. – Донецьк : Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, Редакція гірничої енциклопедії, 2010. – 240 с.

68. Борц М.А. Принципы расчета осадительных центрифуг для угольной промышленности / М. А. Борц, Е. М. Гольдин, В. С. Каминский. – М.: Недра, 1966. – 103 с.

69. Sabah E. Interaction mechanism of flocculants with coal waste slurry / E. Sabah, Z. E. Erkan // *Fuel*. – 2006. – Volume 85, Issue 3. – Pages 350–359.
70. Qian J. W. Flocculation performance of different polyacrylamide and the relation between optimal dose and critical concentration / J. W. Qian, X. J. Xiang, W. Y. Yang, M. Wang, B. Q. Zheng // *Eur. Polym. J.* – 2004. – V.40. – P. 1699–1704.
71. Куренков В. Ф. Интенсификация водоочистки полиакриламидными флокулянтами / В. Ф. Куренков, Н.-Г. Hartan, Ф. И. Лобанов // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2008. – № 5. – С. 28-49
72. Байченко А. А. Интенсификация процесса агрегирования частиц отходов флотации при очистке сточных вод углеобогащения / А. А. Байченко, А. В. Кардашов // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2005. – №4.2. – С.31-33.
73. Фролов В. С. Высокомолекулярные флокулянты в процессах сгущения и обезвоживания угольных шламов / В. С. Фролов, Л. Н. Меркушева, А. В. Сидоров // *Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды международной научно-практической конференции (8-11 октября)*. – Кемерово: 2013 – С. 209 – 210.
74. Пантелеев А. А.. Оборудование для осадительных методов очистки воды. Ч. 1. Направления совершенствования отечественного оборудования / А. А. Пантелеев, Б. Е. Рябчиков, С. Ю. Ларионов и др. // *Водоснабжение и канализация*. – 2013. – №3-4. – С. 100-113.
75. Пантелеев А. А. Оборудование для осадительных методов очистки воды. Ч. 2. Наиболее эффективные зарубежные решения / А. А. Пантелеев, Б. Е. Рябчиков, С. Ю. Ларионов и др. // *Водоснабжение и канализация*. – 2013. – № 5–6. – С. 68–77.
76. Драгинский В. Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод / В. Л. Драгинский, Л. П. Алексеева, С. В. Гетманцев. – М.: Научное издательство, 2005. – 576 с.

77. Вольфтруб Л. И. Опыт модернизации отстойников и осветлителей на станциях водоподготовки / Л. И. Вольфтруб, В. М. Корабельников, А. Е. Гудошникова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 5. – С. 47–52.

78. Первые результаты эксплуатации осветлителя новой конструкции с рециркуляцией шлама / В. В. Панченко, А. М. Храмчихин, Е. В. Чернышев и др. // Энергетик. – 2001. – № 2. – С. 32-33.

79. Технология высокоскоростного осветления воды с использованием микропеска / Ю. В. Шемякин, В. П. Подковыров, Ю. В. Стрихар и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. № 10. – С. 12-19.

80. Виноградов В. Н. Повышение эффективности осветлителей для коагуляционной обработки воды / В. Н. Виноградов, Б. А. Смирнов, А. В. Жадан, В. К. Аван // Теплоэнергетика. – 2010. – № 8. – С. 14-16.

81. Ларионов С. Ю. Исследование интенсифицированной коагуляционной очистки воды с использованием микропеска / С. Ю. Ларионов, А. А. Пантелеев, Б. Е. Рябчиков, М. М. Шиллов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 5. – С. 14–22

82. Серегин А. И. Разделение угольных шламов воздействием ультразвука / А. И. Серегин, В. В. Малькова, Ю. Г. Пименов, Е. Г. Горлов // Российская научная конференция (с международным участием) «Глубокая переработка твердого ископаемого топлива – стратегия России в 21 веке: Тез. докл. Звенигород. – 2007. – С.78.

83. Вейцер Ю. И. Высокомолекулярные флокулянты в процессах очистки природных и сточных вод / Ю. И. Вейцер, Д. М. Минц. – М. : Стройиздат, 1984. – 200 с.

84. Новаков И. А. Закономерности флокуляции водных каолиновых дисперсий бинарными композициями катионных полиэлектролитов / И. А. Новаков, С. С. Дрябина, Ж. Н. Малышева, А. В. Навроцкий, А. В. Купцов // Коллоидный журнал. – 2009. – Т.71. – №1. – С. 94–100.

85. Zeng D. Application of a chitosan flocculant to water treatment / D. Zeng, J. Wu, J. F. Kennedy // *Carbohydrate Polymers*. – 2008. – V.71. – N.1. – P. 135–139.
86. Larson A. Flocculation of Cationic Amylopectinstarch and Colloidal Silicic acid. The Effect of Various Kinds of Salt / A. Larson, S.Wall // *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 1998. – V.139. – N.2. – P. 259–270.
87. Gao B.-Y. The size and coagulation behavior of a novel composite inorganic–organic coagulant / B.-Y. Gao, Y. Wang, Q.-Y. Yue, J.-C. Wei, Q. Li // *Sep. Purif. Technol.* – 2008. – V. 62. – N.3. – P. 544–550.
88. Lee K. E. Comparative study on the effectiveness of hydrophobically modified cationic polyacrylamide groups in the flocculation of kaolin / K. E. Lee, N. Morad, B. T. Poh, T. T. Teng // *Desalination*. – 2011. – V.270. – N.1–3. – P. 206–213.
89. Wang Y. The characterization and flocculation efficiency of composite flocculant iron salts-polydimethyldiallylammonium chloride / Y. Wang, B.-Y. Gao, Q.-Y. Yue, J. Wei, Q. Li // *Chem. Eng. J.* – 2008. – V.142. – P. 175–181.
90. Wu J. Q. Flocculating capacity of polyferric silicate sulfate with high ferric concentration and related influencing factors / J. Q. Wu, N. S. Zhang // *Oil-field Chemistry*. – 2004. – V.21. – N.3. – P. 237–240.
91. Qian J. W. Flocculation performance of different polyacrylamide and the relation between optimal dose and critical concentration / J. W. Qian, X. J. Xiang, W. Y. Yang, M. Wang, B. Q. Zheng // *Eur. Polym. J.* – 2004. – V.40. – P. 1699–1704.
92. Sun W. Study of $\text{Al}(\text{OH})_3$ -polyacrylamideinduced pelleting flocculation by single molecule force spectroscopy / W. Sun, J. Long, Z. Xu, J. H. Masliyah // *Langmuir*. – 2008. – V.24. N.24. – P. 14015–14021.
93. Yu J. Flocculation of kaolin particles by two typical polyelectrolytes: a comparative study on the kinetics and floc structures / J. Yu, D. Wang, X. Ge, M. Yan, Y. Min // *Colloid. Surf. A*. – 2006. – V.290. – P. 288–294.

94. Roussy J. Influence of chitosan characteristics on the coagulation and the flocculation of bentonite suspensions / J. Roussy, M. V. Vooren, B. A. Dempsey, E. Guibal // *Water Res.* – 2005. – V.39. – P. 3247–3258.

95. Guibal E. Coagulation and flocculation of dye-containing solutions using a biopolymer (chitosan) / E. Guibal, J. Roussy // *React. Funct. Polym.* – 2007. – V.67. – P. 33–42.

96. Yang Z. H. Optimization of flocculation conditions for kaolin suspension using the composite flocculant of MBFGA1 and PAC by response surface methodology / Z. H. Yang, J. Huang, G. M. Zeng, M. Ruan, C. S. Zhou, L. Li, Z. G. Rong // *Bioresour. Technol.* – 2009. – V.100. – P. 4233–4239.

97. Lee K. E. Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review / K. E. Lee et al // *Chemical Engineering Journal.* – 2012. – V.203. – P. 370–386.

98. Липатов Ю. С. Адсорбция полимеров / Ю. С. Липатов, Л. М. Сергеева. – Киев : Наук. думка, 1972. – 195 с.

99. La Mer V. K. Flocculation, subsidence and filtration of phosphate slime / V. K. La Mer, R. H. Smellie // *J. Colloid Sci.* – 1956. – V. 56. – N.4. – P. 480–485.

100. Куренков В. Ф. Влияние анионных и катионных флокулянтов Праестолюв на флокуляцию суспензий каолина / В. Ф. Куренков, С. В. Снигирёв, Е. А. Дервиедова, Ф. И. Чуриков // *Журнал прикладной химии.* – 1999. – Т.72. – №.11. – С. 1892–1896.

101. Tolman L. S. Water Conditioning by Flocculation / L. S. Tolman // *J. AWWA.* – 1942. – V. 34. – 404 p.

102. Haney P. D. Principles of Flocculation Related to Water Treatment / P. D. Haney // *Proceedings of American Society of Civil Engineers: Hydraulics div.* – 1956. – 82: HY 4. – 1036 p.

103. Camp T. R. Flocculation and Flocculation Basins / T. R. Camp // *Proceedings of American Society of Civil Engineers.* – 1953. – 283 p.

104. Hudson H. E. Physical Aspects of Flocculation / H. E. Hudson // J. AWWA. –1965. – №7. – P. 885-892.
105. Harris H. S. Orthokinetic Flocculation in Water Purification / H. S. Harris, W. J. Kaufman, R. B. Krone // J. SED, ASCE. - 1966. – V. 92. – № SA-6. – P. 95.
106. Сапожников С. Ю. Оценка эффективности флокуляции взвешенных глинистых частиц в сточных и оборотных водах при регулировании величины градиента скорости массопотока / С. Ю. Сапожников // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2011. – №3 – С.85-91.
107. Yoon R.-H. Application of extended DLVO theory. IV. Derivation of flotation rate equation from first principles / R.-H. Yoon, L. Mao // Journal of Colloid and Interface Science. – 1996. – V. 181. – №2. – P. 613–626.
108. Fellows C. M. Insights into Bridging Flocculation / C. M. Fellows, W.O.S. Doherty // Macromol. Symp. – 2006. – V. 231. – P. 1–10.
109. Баран А. А. Полимерсодержащие дисперсные системы / А. А. Баран. – Киев: Наукова думка, 1986. – 204 с.
110. La Mer V. K. Filtration of colloidal dispersions flocculated by anionic and cationic polyelectrolytes / V. K. La Mer // Disc. Farad. Soc. –1966.–V.42.– P.248–254.
111. Sabah E. Interaction mechanism of flocculants with coal waste slurry / E. Sabah, Z. E. Erkan // Fuel. – 2006. – Vol. 85, Issue 3. – P. 350–359. doi: 10.1016/j.fuel.2005.06.005
112. Ofori P. Shear-induced floc structure changes for enhanced dewatering of coal preparation plant tailings / P. Ofori, A. V. Nguyen, B. Firth, C. McNally, O. Ozdemir // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Vol. 172, Issue 2–3. – P. 914–923. doi: 10.1016/j.cej.2011.06.082
113. Ji Y. Effect of solution salinity on settling of mineral tailings by polymer flocculent / Y. Ji, Q. Lu, Q. Liu, H. Zeng // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2013. – Vol. 430. – P. 29–38. doi: 10.1016/j.colsurfa.2013.04.006

114. Boylu, F. The effect of carboxymethyl cellulose (CMC) on the stability of coal–water slurries / F. Boylu, G. Atesok, N. Dincer // *Fuel*. – 2005. – V. 84, N 2–3. – P. 315–319.

115. Гольберг Г. Ю. Физико–химические проблемы флокуляции тонкодисперсных продуктов обогащения углей / Г. Ю. Гольберг // *Горный информационно–аналитический бюллетень*, 2006. – №1. – С. 346–348.

116. Sun W. Study of Al(OH)₃–Polyacrylamide–Induced Pelleting Flocculation by Single Molecule Force Spectroscopy / W. Sun, J. Long, Z. Xu, J. H. Masliyah // *Langmuir*. – 2008. – Vol. 24, Issue 24. – P. 14015–14021. doi: 10.1021/la802537z

117. Гольберг Г. Ю. Образование, существование и разрушение флокуляционных структур / Г. Ю. Гольберг, А. А. Лавриненко // *Горный информационный бюллетень*. – 2015. — №11. – С. 47–54.

118. Коновалова Т. А. Применение флокулянтов для повышения экологической безопасности водно–шламовых схем углеобогачительных фабрик / Т. А. Коновалова, Г. Б. Векслер, А. А. Лавриненко, Г. Ю. Гольберг // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2014. – № 1(19), т. 3. – С. 5 – 10.

119. Heller H. Anionic Polyacrylamide Polymers Effect on Rheological Behavior of Sodium–Montmorillonite Suspensions / H. Heller, R. Keren // *Soil Science Society of America Journal*. – 2002. – V. 66, № 1. – P. 19–25.

120. Макарова Е. В. Влияние концентрации водорастворимых полимеров на реологические свойства водоугольных суспензий антрацита / Е. В. Макарова, А. С. Макаров, Д. П. Савицкий, Н. И. Боровик // *Хімія, фізика та технологія поверхні*. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 236–240.

121. Полулях А. Д. Техничко–экологический анализ технологических решений по обработке жидких отходов ЦОФ «Павлоградская» / А. Д. Полулях, Д. А. Полулях // *Збагачення корисних копалин*. – 2013. – Вип. 52 (93). – С. 145–154.

122. Шкоп А. А. К обоснованию технологии обезвоживания мелкодисперсного угля / А.Ф. Мацак, А.Г. Трошин, А. А. Шкоп // *Науково-*

технічний збірник Національного гірничого університету. – 2009. - Вип. 36-37, – С. 177-187.

123. 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.

124. Evmenova G. L. Influence of deformation of a medium on flocculation of coal dispersions / G. L. Evmenova // Journal of Mining Science. – 2008. – Vol. 44, № 3. – P. 298–301. doi:10.1007/s10913-008-0020-3

125. Колодников, И. А. Очистка растворов урансодержащих соединений от механических примесей методом центрифугирования / И. А. Колодников, С. Н. Кладиев, С. И. Кривопустов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – № 2. – С. 50–54.

126. Методологічні положення зі статистики / Редкол.: О.Г.Асауленко та ін. // Держ комстат. України. – К.: ЗАТ „Август”, 2006. – Вип. 1. – 552 с.

127. Колемаев В.А. Теория вероятностей и математическая статистика/ Колемаев В.А., Калинина В.Н. – М.: ИНФРА-М, 1997. – 302 с.

128. Шкоп А. А. Обезвоживание угольных полидисперсных суспензий / А. А. Шкоп // Східно-Європейський журнал передових технологій. Харків: Технологічний центр. – 2015 – 2/6 (74), – С. 44–49.

129. 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.

130. 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.

131. Shkop A. Exploring the ways to intensity 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.

132. 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.

133. 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.

134. Шкоп А. А. Исследование путей снижения механического воздействия на флокулы в центрифуге / А. А. Шкоп, М. А. Цейтлин, А. В. Шестопалов, В. Ф. Райко // Технологический аудит и резервы производства – Харьков: Технологический центр. – 2017. – № 1/3 (33). – С. 39 – 45.

135. 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.

136. 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.

137. 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.

138. 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 ста-

тей. 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.

139. Шкоп А. А. 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.

140. Шкоп А. А. Шляхи інтенсифікація 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.

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


142. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ / Норман Дрейпер, Гарри Смит. – М.: Диалектика-Вильямс, 2016. – 912 с.

143. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Издательство “Наука”, 1976. – 278 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Перший заступник
 директора-головний інженер
 ДУ «НІОХІМ»
 Ю.М. Кузенко
 2016 р.

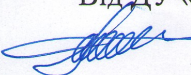


АКТ

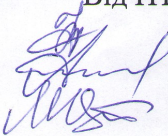
впровадження наукової розробки в проектування

Комісія у складі: від державної установи «Державний науково-дослідний і проектний інститут основної хімії» (ДУ «НІОХІМ») в особі начальника науково-технічного відділу, д.т.н., проф. Панасенка В.О. та представників від виконавця – Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») – в особі к.т.н., проф. кафедри охорони праці та навколишнього середовища Райко В.Ф., виконавця дисертаційної роботи Шкопа А.О. та д.т.н., проф. кафедри хімічної техніки та промислової екології Цейтліна М.А., склали акт про те, що на підставі договору № 113 від 12.03.2013р. про науково-технічне співробітництво розроблено рекомендації по розділенню тонко дисперсних суспензій, зокрема, виділенню шламу дистилерної рідини содового виробництва, з використанням установки, що включає систему з відстійника-сгущувача та осаджувальної центрифуги, з впровадженням цієї установки в процес проектування. Видані рекомендації науково обґрунтовані та можуть бути використані у проектуванні технологічних установок з утилізації рідких або твердих відходів содового виробництва.

Від ДУ «НІОХІМ»
 Панасенко В.О.



Від НТУ «ХПІ»
 Райко В.Ф.
 Шкоп А.О.
 Цейтлін М.А.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Заступник начальника
 конструкторсько-технологічного
 відділу
 ТОВ «НТЦ «Екомаш»
 Іванов М.І.
 2017 р.



АКТ

впровадження наукової розробки в проектування


Комісія у складі: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-технічний центр «Екомаш» в особі інженера Макаренко Ю.В. та представників від виконавця - ТОВ «НВП «Машинобудівник» в особі директора Шкопа А.О., інженера-механіка Бондарчука С.Л., склали акт про те, що на підставі договору № 5 від 10.06.2016р. про науково-технічне співробітництво розроблено рекомендації по розділенню тонкодисперсних суспензій, зокрема, виділенню шламу високодисперсної суспензії металургійного виробництва з використанням установки, що включає систему з відстійника-згущувача та осаджувальної центрифуги, з провадженням цієї установки в процес проектування.

Видані рекомендації науково обґрунтовані та можуть бути використані у проектуванні технологічних установок з утилізації рідких або твердих відходів металургійного виробництва.

Від ТОВ «НТЦ «Екомаш»

 Макаренко Ю.В.

Від ТОВ «НВП «Машинобудівник»

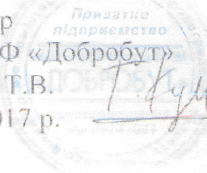
 Шкоп А.О.

 Бондарчук С.Л.

Додаток В

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
ЧП «НПФ «Добробут»
Кушнір Т.В.
02.02.2017 р.

**АКТ***внедрения оборудования***Комиссия в составе:**

Частное предприятие «Научно-производственная фирма «Добробут» в лице директора Кушніра Т.В., инженера Конограя В.П.

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-практическое предприятие «Машиностроитель» в лице директора Шкопа А.А., инженера-механика Бондарчука С.Л., инженера Гринько М.И.

Составили настоящий акт:

На основании договора №7 от 26 апреля 2016г. на предприятии ЧП «НПФ «Добробут» была внедрена Центрифугальная установка ОГШ-311К-111 для обезвоживания гуматных удобрений.

От ЧП «НПФ «Добробут»

Т. Кушнір Кушнір Т.В.
В. Конограй Конограй В.П.

От ООО «НПФ «Машиностроитель»

Шкоп А.А. Шкоп А.А.
Бондарчук С.Л. Бондарчук С.Л.
Гринько М.И. Гринько М.И.





«Затверджую»

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

Мигущенко Р. П.

26. 01. 2017 р.

АКТ

Даним актом посвідчується, що результати дисертаційної роботи Шкопа Андрія Олександровича впроваджені в навчальний процес на факультеті «Інтегрованих технологій та хімічної техніки» НТУ «ХПІ» при професійній підготовці фахівців другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальностями 101 «Екологія» (спеціалізація 101.01 «Інженерна екологія»), 133 «Галузеве машинобудування», у курсовому та дипломному проектуванні та при викладанні навчальних дисциплін «Устаткування та основи проектування екологічно безпечних технологій з використанням САПР» і «Основи створення маловідходних технологій».

Декан факультету ІТ,
к.т.н., проф.

Зав. каф, ХТПЕ
д.т.н., проф.

Рассоха О.М.

Шапоров В.П.