

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ КОЛОЇДНОЇ ХІМІЇ ТА ХІМІЇ ВОДИ  
ІМ. А.В. ДУМАНСЬКОГО**

**КЛІЩЕНКО РОМАН ЄВГЕНІЙОВИЧ**

УДК 544.778.3:662.757

**КОЛОЇДНО-ХІМІЧНІ ПРИНЦИПИ РЕГУЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
КОНЦЕНТРОВАНИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ У СЕРЕДОВИЩАХ РІЗНОЇ  
ПОЛЯРНОСТІ**

02.00.11 – колоїдна хімія

Е Природничі науки, математика та статистика (Е3 Хімія)

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора хімічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у відділі фізико-хімічної механіки дисперсних систем Інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України

**Офіційні опоненти:** доктор хімічних наук, професор  
**Чумак Віталій Лукич,**  
Державне некомерційне підприємство  
«Державний університет «Київський авіаційний  
інститут»,  
професор кафедри хімії і хімічної технології

доктор хімічних наук, професор  
**Рульов Микола Миколайович,**  
Інститут біологічної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка  
НАН України,  
завідувач відділу фізико-хімічної гідродинаміки  
ультрадисперсних систем

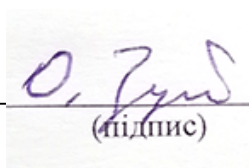
доктор хімічних наук, доцент  
**Приходько Роман Вікторович,**  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
доцент кафедри органічної хімії та технології органічних  
речовин хіміко-технологічного факультету

Захист відбудеться 10 грудня 2025 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.183.01 в Інституті колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України за адресою: 03142, м. Київ-142, бульв. Академіка Вернадського 42.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України за адресою: 03142, м. Київ-142, бульв. Академіка Вернадського 42 та на сайті <http://icwc.org.ua/disertatsii.html>

реферат розіслано «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор хімічних наук \_\_\_\_\_



Олег ЗУЙ  
(ім'я, прізвище)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проблема отримання, стабілізації та регулювання фізико-хімічних властивостей висококонцентрованих дисперсій різного ступеня гідрофобності є важливою колоїдно-хімічною проблемою, котра має велике теоретичне й практичне значення. Висококонцентровані дисперсні системи широко застосовуються у різних галузях народного господарства. Без знання основ їх отримання, стабілізації та регулювання реологічних властивостей неможливе розв'язання цілого ряду як теоретичних, так і прикладних завдань.

Хоча формування та стабілізація висококонцентрованих дисперсних систем уже давно є предметом досліджень у сфері колоїдної хімії, більшість наукових праць акцентує увагу переважно на класичних підходах. Незважаючи на великий обсяг накопиченого теоретичного та експериментального матеріалу, стверджувати про повне розуміння реологічної поведінки структурованих систем передчасно. Зокрема, недостатньо вивченими є механізми структуроутворення у багатокомпонентних системах з органоводними дисперсійними середовищами. Для комплексних систем (наприклад, сумішей різних типів вугілля, нанокарбону, мінеральних добавок, ПАР тощо) відмінності в природі компонентів створюють значні труднощі в розробці універсальних принципів стабілізації й регулювання реологічних властивостей.

Важливими прикладами застосування висококонцентрованих дисперсних систем є композиційні водовугільні суспензії паливного призначення, шлами гальванічного виробництва та осади, утворені у процесах очищення стічних вод. Комплексний, багатокомпонентний склад цих об'єктів, висока концентрація дисперсної фази на фоні різного ступеня полярності як дисперсної фази, так і дисперсійного середовища ускладнює їх утилізацію. Створення наукових засад розв'язання проблем отримання висококонцентрованих дисперсій різного ступеня гідрофобності та стабілізації і регулювання їх реологічних властивостей є запорукою їх успішного використання у різних галузях промисловості.

Одним з перспективних видів альтернативного палива з невисокою вартістю та відповідністю підвищеним екологічним вимогам є композиційне концентроване водовугільне паливо (КВП). Воно базується на основі водовугільних дисперсій, де дисперсійною фазою слугує вугілля різного ступеня метаморфізму, а дисперсійним середовищем є вода або водні розчини. Спалювання КВП є більш екологічним, ніж використання традиційних карбоновмісних джерел енергії (нафта, вугілля, торф тощо).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у відділі фізико-хімічної механіки дисперсних систем Інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України відповідно до науково-дослідних тем НАН України: «Дослідження процесів структуроутворення у природних дисперсіях в присутності ПАР і полімерів з різними функціональними групами» (2010-2012 рр., № державної реєстрації 0110U001007, виконавець); «Дослідження впливу фізико-хімічних факторів на реологічні властивості композиційних вуглевмісних систем» (2013-2015 рр., № державної реєстрації 0113U003108, виконавець); «Дослідження колоїдно-хімічних властивостей

дисперсних систем на основі вугілля у середовищах різної полярності» (2016-2018 рр., № державної реєстрації 0115U006854, відповідальний виконавець); «Гідрофільні і гідрофобні взаємодії в структурованих дисперсних системах» (2019-2021 рр., № державної реєстрації 0121U109538, відповідальний виконавець); «Фундаментальні основи ефективного використання комплексу хімічних, фізичних і біологічних методів дослідження водних систем» (2017-2021 рр., № державної реєстрації 0118U100375, виконавець); «Дослідження впливу фізико-хімічних факторів на процеси структуроутворення у композиційних карбоновмісних дисперсних системах», (2022-2024) № держреєстрації 0122U000179, відповідальний виконавець.

**Мета роботи і завдання дослідження:** Мета даної роботи полягає у розвитку фундаментальних основ отримання та керування фізико-хімічними властивостями концентрованих дисперсних систем у середовищах різної полярності, а також у розширенні та поглибленні підходів до регулювання реологічних властивостей, процесів структуроутворення та стабілізації таких систем.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні завдання:

- комплексне експериментальне дослідження реологічних та електроповерхневих властивостей висококонцентрованих композиційних дисперсних систем на основі вугілля різного ступеня метаморфізму, до складу яких входять карбонові мікро- та наноматеріали, шунгіт, карбонові субмікронні матеріали, у дисперсійних середовищах різної полярності, зокрема на основі нижчих аліфатичних спиртів;

- встановлення залежностей між електрокінетичним потенціалом частинок дисперсної фази та реологічними властивостями КВП і визначення найкращих способів регулювання поверхневих властивостей;

- аналіз ефективності стабілізаторів на основі ПАР та поліелектролітів різної хімічної будови з метою оптимізації способів регулювання структурно-механічних властивостей КВП;

- визначення особливостей процесів структуроутворення в паливних дисперсних системах на основі вугілля та аліфатичних спиртів ряду C2-C5, встановлення залежності реологічних властивостей та седиментаційної стійкості таких систем від поверхневого натягу  $\sigma$  та діелектричної проникності  $\epsilon$  середовища;

- наукове обґрунтування принципів формування плинних композиційних дисперсних систем на основі вугілля різного ступеня метаморфізму шляхом оптимізації гранулометричного складу для підвищення концентрації твердої фази;

- вивчення можливості регулювання властивостей КВП шляхом введення до його складу плазмохімічно конвертованих органомісних стічних вод техногенного походження, що містять активні вуглецеві мікро- та наноструктури. Оцінка синергетичного ефекту поєднання добавок ПАР-диспергаторів із субмікронними вуглецевими компонентами для посилення механізмів стабілізації й регулювання властивостей КВП;

- дослідження та вдосконалення методів кондиціонування та утилізації гальванічних шламів з низькою гідравлічною проникністю.

**Об'єкт дослідження** – концентровані дисперсні системи на основі вугілля різного ступеня метаморфізму, шунгіту, пірокарбону, субмікронних вуглецевих

матеріалів, глинистих мінералів та гальванічних шламів у середовищах різної полярності. Концентровані дисперсії з сильнозарядженими (іони металів, ПАР, поліелектроліти) та слабкозарядженими компонентами (органічні речовини різного ступеня ліофобності).

**Предмет дослідження** – колоїдно-хімічні особливості формування, стабілізації та регулювання властивостей концентрованих дисперсних систем. Електроосмос у системах з дисперсійним середовищем різної полярності. Реологічні та структурно-механічні властивості концентрованих дисперсних систем. Фізико-хімічні особливості процесів плазмохімічної деструкції та конверсії органовмісних дисперсійних середовищ у субмікронні вуглецеві матеріали.

**Методи дослідження** – Електрокінетичні методи (вимірювання електросмотичного потоку та визначення електрокінетичного ( $\xi$ ) потенціалу). Реологічні методи; вимірювання в'язкості, тиксотропії, седиментаційної стійкості. Плазмохімічні методи деструкції органічних забруднень та формування карбоновмісних мікро- та наноструктур. Спектроскопічні методи: УФ та ІЧ-спектрометрія. Адсорбційні: аналіз пористої структури вугілля та вуглецевих матеріалів, гравіметричні, оптико-електронні (аналіз розмірів та розподілу частинок дисперсної фази за методикою SOPAT), хроматографічні, рентгеноструктурний аналіз, електронна мікроскопія. Електрохімічні методи вимірювання напруги, сили струму, теплоти.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Вперше проведено комплексне експериментальне дослідження реологічних та електроповерхневих властивостей висококонцентрованих композиційних дисперсних систем на основі вугілля різного ступеня метаморфізму родовищ України, до складу яких входять карбонові субмікронні матеріали, у середовищах різної полярності. На основі експериментальних даних визначено найбільш ефективні методи отримання, стабілізації та регулювання властивостей концентрованих дисперсних систем з ліофобними компонентами. Удосконалено способи кондиціонування та утилізації глиновмісних та гальванічних шламів з низькою гідравлічною проникністю.

Вивчено електроповерхневі властивості висококонцентрованих композиційних дисперсних систем на основі вугілля різного ступеня метаморфізму у дисперсійних середовищах різної полярності, зокрема у аліфатичних спиртах. Встановлено зв'язок між  $\xi$ -потенціалом поверхні частинок дисперсної фази та реологічними властивостями КВП. Досліджено особливості взаємодії, ефективність широкого спектра хімічних добавок: ПАР, поліелектролітів, субмікронних анізотропних частинок на основі карбону та глинистих мінералів та визначено композиції для оптимального регулювання властивостей КВП.

Встановлено особливості процесів структуроутворення в паливних дисперсних системах на основі вугілля та аліфатичних спиртів ряду  $C_2$ - $C_5$ . Визначено залежність реологічних властивостей та седиментаційної стійкості таких систем від поверхневого натягу та діелектричної проникності середовища. Досліджено електрокінетичні процеси на межі розділу фаз вода-спирт-вугілля. Встановлено, що визначальну роль при структуроутворенні та стабілізації реологічних властивостей

КВП відіграють диспергуючі та стабілізуючі добавки, які модифікують поверхню частинок вугілля.

Показано, що важливу роль при регулюванні структурно-механічних властивостей КВП відіграє поєднання механохімічної активації, дотримання бімодального гранулометричного складу, модифікування поверхні дисперсної фази та дисперсійного середовища за допомогою добавок з метою регулювання сил міжчастинкової взаємодії та формування структурно-механічного бар'єра.

Науково обґрунтовано та запропоновано шляхи модифікації властивостей висококонцентрованих композиційних дисперсних систем на основі вугілля різного ступеня метаморфізму шляхом введення добавок кремнійорганічних ПАР.

Вперше показано можливість регулювання властивостей КВП шляхом введення до його складу плазмохімічно конвертованого дисперсійного середовища, з реакційно активними карбоновими мікро- та наноструктурами.

Поглиблено уявлення про механізм зневоднення та електрокінетичної ремедіації глинистих та гальванічних шламів з низькою гідравлічною проникністю. Запропоновано та експериментально досліджено шляхи інтенсифікації масоперенесення у системах такого типу.

**Практичне значення отриманих результатів.** Наукові результати, отримані в роботі, можуть знайти застосування при розробці та вдосконаленні способів отримання та регулювання властивостей концентрованих колоїдних систем широкого вжитку. Отримані у роботі експериментальні дані можуть слугувати підґрунтям для розширення та вдосконалення наявних теоретичних підходів до описання колоїдно-хімічних процесів у концентрованих системах з дисперсійним середовищем різного ступеня ліофільності. Запропоновано склад композиту на основі шунгіту для покриття сонячних колекторів, на винахід одержано патент. Розроблено ряд захищених патентами КВП різного складу з органомісним дисперсійним середовищем. Проведено практичну апробацію КВП на пілотних промислових зразках та доведено можливість використання суспензійного палива як заміника традиційних енергоносіїв. Таке суспензійне паливо має технологічні та екологічні переваги перед традиційним вугіллям та є перспективним заміником традиційних енергоносіїв – нафти та газу, що важливо в умовах дефіциту енергоносіїв в країні. Поєднання плазмохімічної обробки органомісних стічних вод з подальшим їх застосуванням у рецептурах композиційного палива дає змогу розробляти замкнені цикли водокористування і може бути застосоване при розробці та вдосконаленні систем очищення стічних органомісних вод з отриманням екологічно безпечних цінних і корисних вторинних компонентів. Ці підходи можуть бути покладені в основу подальшого теоретичного та експериментального вивчення плазми, збудженої низькою напругою, у водному середовищі.

**Особистий внесок здобувача** є визначальним на всіх етапах дослідження та полягав у формулюванні основних напрямків дослідження, виборі об'єктів і методів дослідження, обробці та аналізі експериментальних даних, які одержано як самостійно, так і в співпраці зі співавторами публікацій.

Аналіз літературних джерел за темою дослідження, на основі яких було сформульовано ідею та визначено мету, завдання та напрямки досліджень, особисто

виконані автором. Постановку основних етапів дослідження та обговорення результатів здійснено спільно з д.т.н., проф. Анатолієм МАКАРОВИМ. Автором особисто отримано дані структурно-механічних характеристик досліджуваних об'єктів за допомогою вимірювання в'язкості, тиксотропії, седиментаційної стійкості. Теоретичне обґрунтування та розробку концепції плазмохімічного методу було виконано спільно з академіком НАН України Владиславом ГОНЧАРУКОМ. Визначення електроповерхневих характеристик, вимірювання електроосмотичного потоку та визначення електрокінетичного ( $\xi$ ) потенціалу автором виконано особисто. Цінні методичні вказівки щодо дослідження електрокінетичних процесів у середовищах різної полярності та інтерпретації отриманих даних було надано д.х.н., проф. Наталією МІЩУК та д.х.н. Ларисою ЛИСЕНКО. Розробку, проектування, виготовлення плазмохімічної установки та основний обсяг експериментальної роботи плазмохімічним методом було проведено разом з к.х.н. Іваном КОРНІЄНКОМ, у дослідженнях седиментації та стабілізації КВП брали участь к.х.н. Олена ШКУТКОВА та м.н.с. Тетяна ПАХАР, дослідження утилізації гальванічних шламів проведено разом з к.х.н. Раїсою ЧЕБОТАРЬОВОЮ. Гранулометричний аналіз на приладі SOPAT, аналіз та пілотні випробовування КВП проведено за участю автора та з допомогою директора ЗАО АНА-ТЕМС, к.т.н. Олександра ЄГУРНОВА та директора ТОВ ІННОЧЕМ к.х.н. Петра БАРТОША. Аналіз результатів, написання та оформлення дисертаційної роботи виконано здобувачем особисто. Публікації підготовлено безпосередньо здобувачем або у співпраці зі співавторами. Автором одноосібно опубліковано п'ять статей.

**Апробація роботи.** Результати досліджень, наведених у дисертації, розглядалися та обговорювалися на міжнародних і українських конференціях: 8th International conference. Science and society – Methods and problems of practical application. Accent Graphics Communications & Publishing. Vancouver, Canada. 2019; IV Міжнародна науково-практичної конференція "Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки", 25-26 жовтня 2022 р. К.: НУХТ, 2022.; IV Міжнародна науково-практичної конференція "Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки", 25-26 жовтня 2022 р. К.: НУХТ, 2022.; XXXIX Наукова конференція з біоорганічної хімії та нафтохімії. Біоактивні сполуки, нові речовини і матеріали. Київ: Інтерсервіс, 30 травня 2024 р.; XII International Scientific and Practical Conference. Topical aspects of modern scientific research. Tokyo, Japan. 8-10 August 2024.; V Міжнародна науково-практична конференція "Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки", 14-15 листопада 2024 р. К.: НУХТ, 2024. С. 104–107.

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано у 25 статтях у фахових наукових вітчизняних та зарубіжних виданнях (5 із них відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports відносяться до третього квартиля та зараховуються як  $5 \times 2 = 10$  публікацій, що разом відповідає 30 публікаціям), 3 патентах України та 4 патентах на корисну модель, 6 тезах доповідей на 5 конференціях та 7 публікаціях у не фахових виданнях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 379 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, семи розділів, загальних

висновків, додатків і списку використаних джерел. Обсяг основного тексту дисертації складає 287 сторінок друкованого тексту. Робота містить 81 рисунок, 60 таблиць, 4 акти випробовування й список цитованої літератури, що налічує 401 посилання.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

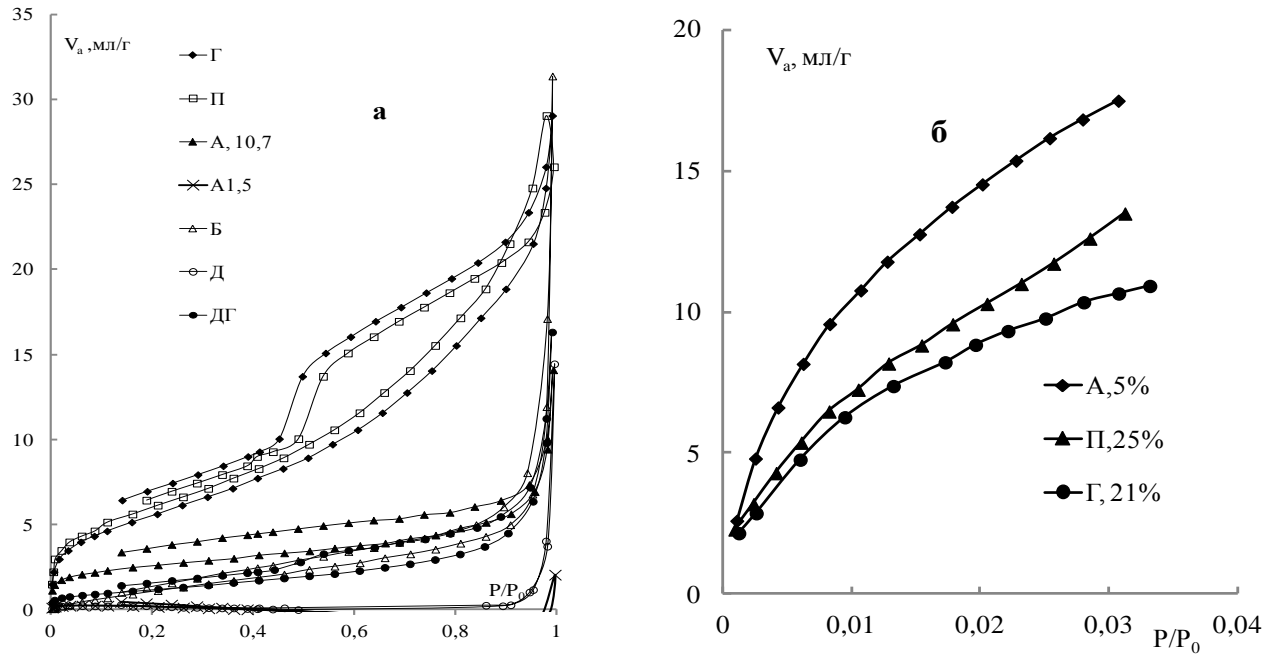
**У вступі** наведено сучасний стан дослідження проблеми, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, окреслено наукову новизну, практичну значущість, внесок автора та наведено інформацію про публікації та апробацію результатів.

**У першому розділі** розглянуто та проаналізовано наявну інформацію щодо вирішення проблеми стабілізації КВП. У концентрованих високонаповнених системах тепловий (броунівський) рух істотно обмежений і не може забезпечити агрегативну та седиментаційну стійкість. Для комплексних систем (наприклад, сумішей різних типів вугілля, нанокарбону, мінеральних добавок, ПАР тощо) відмінності в природі фазових компонентів створюють значні труднощі в розробці універсальних принципів стабілізації й регулювання реологічних властивостей. Окремої уваги заслуговує недостатньо досліджене застосування сучасних реагентів, зокрема поверхнево-активних речовин на основі заміщених силоксанів. Ці речовини мають низьку токсичність, високу хімічну інертність і стабільність у широкому діапазоні фізико-хімічних умов, що робить їх перспективними для модифікації поверхні частинок у КВП та інших дисперсних системах.

Перспективним напрямом регулювання властивостей колоїдних систем є також використання мікро- та нанодисперсних карбонових матеріалів (наприклад, шунгіту, пірокарбону, графену, вуглецевих нанотрубок). Завдяки високій поверхневій активності й здатності до утворення структурованих систем, вони сприяють підвищенню стабільності та покращенню реологічної поведінки концентрованих водовугільних суспензій.

**У другому розділі** наведено основні дані щодо об'єктів дослідження, методів їх підготовки та аналізу. Основними об'єктами дослідження є композиційне концентроване вугільне паливо та його компоненти: вугілля різного ступеня метаморфізму, субмікронний карбон, пірокарбон. Наведено дані про дисперсійні середовища та реагенти, використані для модифікації властивостей КВП. Наведено фізико-хімічні характеристики об'єктів на основі глинистих мінералів та гальванічних шламів. Подано опис експериментальних методів дослідження, використаних у роботі.

**У третьому розділі** досліджено фізико-хімічні характеристики поверхні вугілля та субмікронних карбонових матеріалів. На рис. 1 наведено ізотерми адсорбції  $N_2$  та  $CO_2$  для зразків вугілля різного ступеня метаморфізму. За класифікацією IUPAC, всі ізотерми належать до типу III, що свідчить про формування полімолекулярних шарів за умови переважання взаємодії адсорбат–адсорбат над адсорбент–адсорбат. Для всіх зразків характерна наявність десорбційного гістерезису, що вказує на полімолекулярну конденсацію.



**Рис. 1.** Ізотерми сорбції/десорбції  $N_2$  (а) та  $CO_2$  (б) зразків вугілля різного ступеня метаморфізму. Число біля назви сорту вугілля показує зольність зразка.

Структурно-сорбційні характеристики мезопорової структури вугілля, отримані на основі адсорбції азоту, наведено у таблиці 1.

**Таблиця 1**

Структурно-сорбційні характеристики вугілля, отримані з аналізу сорбції/десорбції  $N_2$

Марка вугілля, зольність, %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$S_{\text{пит}}$ , м <sup>2</sup> /г	$V_{\text{поре}}$ , см <sup>3</sup> /г	$d_{\text{поре}}$ , нм
Б, 20	1,14	5,17	0,019	23,3
Д, 11	1,26	1,34	0,0034	17,8
ДГ, 29	1,28	5,01	0,013	25,9
Г, 21	1,32	21,4	0,037	25,0
П, 25	1,52	5,02	0,011	25,9
А, 10,7	1,76	2,47	0,0025	14,5
А, 1,5	1,77	0,92	0,0006	16,8

Використання  $N_2$  для визначення адсорбції охоплює лише пори розміром 2-50 нм, для аналізу мікропор ( $d < 2$  нм) застосовувалася адсорбція  $CO_2$ . На відміну від ізотерм  $N_2$ , де антрацит демонструє найменшу адсорбційну здатність, при адсорбції  $CO_2$  спостерігається зворотна картина (таблиця 2). Найвища ємність мікропор відзначається саме для цього виду вугілля. Можна пояснити це тим, що у найбільш метаморфізованого антрациту під впливом геологічних чинників формування

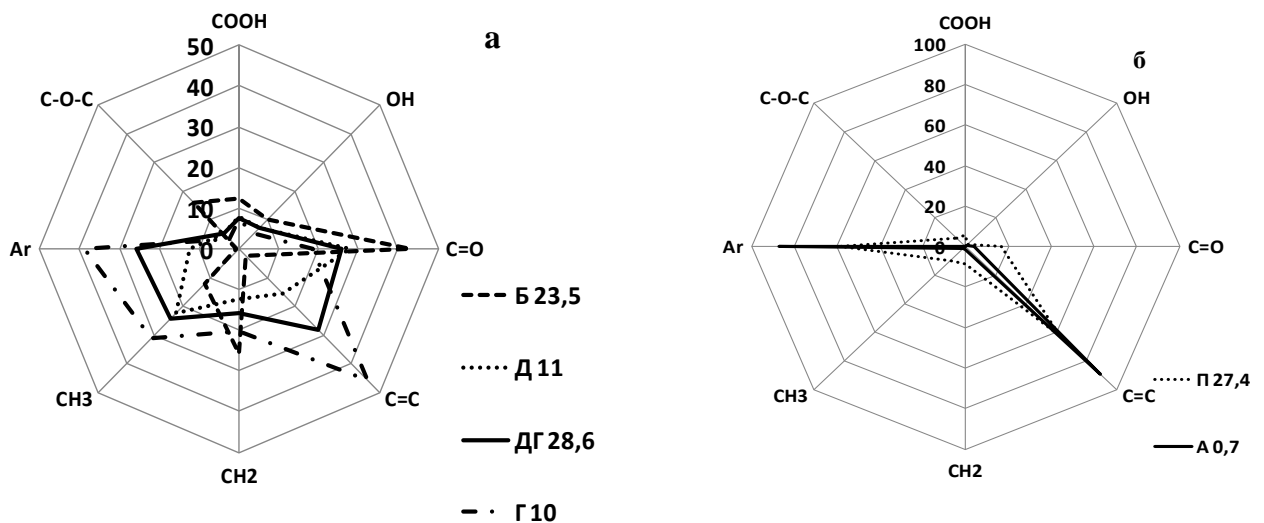
(високий тиск, висока температура) відбувається стискання вугільної матриці, що сприяє трансформації мезопор у мікропори.

Таблиця 2

Характеристики мікропорової структури вугілля за адсорбцією CO<sub>2</sub>

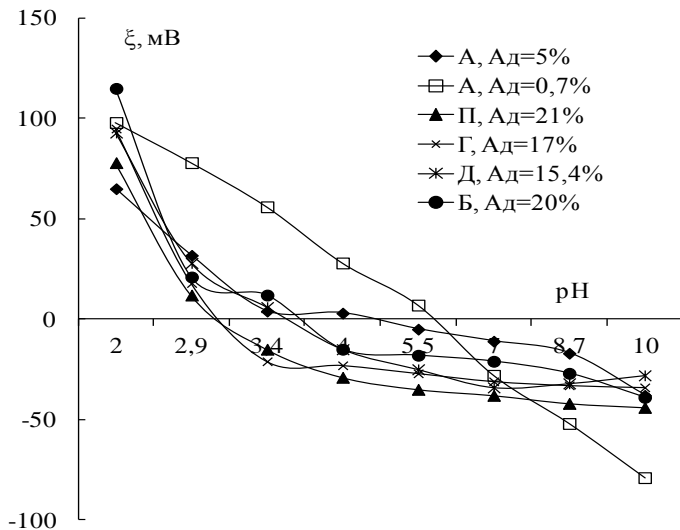
Марка вугілля, зольність, %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$S_{\text{пит}}$ , м <sup>2</sup> /г	$V_{\text{поре}}$ , см <sup>3</sup> /г	$d_{\text{поре}}$ , нм
Г, 21	1,32	89±2,5	22,7±0,8	15,65±0,05
П, 25	1,52	102±2,5	24,1±0,8	15,19±0,05
А, 5	1,77	139±3	27,8±0,8	11,82±0,05

Дослідження хімічної будови поверхні вугілля за допомогою ІЧ-спектроскопії показали, що функціональні групи локалізуються в чотирьох основних областях спектра: ОН- структури в області 3800~3000 см<sup>-1</sup>, СН<sub>3</sub>-, СН<sub>2</sub>- структури в 3000~2800 см<sup>-1</sup>, оксигенвмісні функціональні групи в 1800~1000 см<sup>-1</sup> та ароматичні структури в 900~700 см<sup>-1</sup>. Для більш детального вивчення кількісних характеристик ІЧ-ІЧ спектрів було проаналізовано полосу 1000-1800 см<sup>-1</sup>. У цьому проміжку лежать характерні лінії поглинання найбільш важливих та цікавих у контексті нашого дослідження атомних груп, котрі визначають характеристики поверхні (рис. 2).



**Рис. 2.** Розподіл основних функціональних груп на поверхні вугілля марок Б, Д, ДГ, Г (а) та марок П та А (б) (% від сумарного вмісту). Число біля назви сорту вугілля показує зольність зразка.

Рисунок 3 ілюструє залежності  $\xi$ -потенціалу вугілля різного ступеня метаморфізму від рН.



**Рис. 3.** Залежності  $\xi$ -потенціалу вугілля різного ступеня метаморфізму у діапазоні рН 2-12. Число біля назви сорту вугілля показує зольність зразка.

Зі зростанням зольності та ступеня окиснення поверхні вугілля криві залежності  $\xi$ -потенціалу від рН зміщуються у від'ємну область. Основну роль у цьому процесі відіграють депротонування карбоксильних груп органічної поверхні та дисоціація мінеральної компоненти вугілля. Антрацит з низьким вмістом мінеральних включень демонструє аномальну діаграму зміни  $\xi$ -потенціалу. Його поверхневий заряд майже лінійно залежить від рН, що свідчить про домінування адсорбції/десорбції  $H^+$  та  $OH^-$  іонів, відповідно при  $pH < 7$  та  $pH > 7$ . Абсолютні значення  $\xi$ -потенціалу досить високі лише у сильноокислому середовищі. У межах значень рН 3-9 величина  $\xi$ -потенціалу є недостатньою для ефективного електростатичного відштовхування між частинками розміром понад 1 мкм, що унеможливує їх стабілізацію виключно шляхом електрокінетичного механізму.

Регулювання електроповерхневих характеристик доцільно здійснювати за допомогою ПАР. Взаємодія останніх з вугільними частинками супроводжується зміною поверхневого заряду, що проявляється у варіаціях  $\xi$ -потенціалу.

У цьому дослідженні як аніонактивні диспергатори-стабілізатори використано похідні сульфованого нафталінформальдегіду (ДФ- дофен, НФ, СПНФ, С-3), лігносульфонат натрію (ЛСТNa), сульфомеламінформальдегід (СМФ) та високомолекулярний поліелектроліт ОЕ-ОП (табл. 3). При використанні як аніонактивних модифікаторів високомолекулярних продуктів сульфування речовин з конденсованими ароматичними кільцями (наприклад, лігносульфонати, сульфонафталінові сполуки) забезпечуються стабільно низькі значення  $\xi$ -потенціалу, які зберігаються й при вищих значеннях рН (до 10), що підтверджує ефективність вказаних речовин як стабілізаторів (табл. 3).

У сильноокислій області ( $pH < 2$ ) спостерігається різке зростання електрокінетичного потенціалу зі зміною знака на «+» через посилення адсорбції з розчину  $H^+$  - іонів поверхнею вугілля. У сильноокислому середовищі також зростає дисоціація й мінеральної компоненти поверхні вугілля, та пов'язаних з ними  $SiOH$ - та  $AlOH$ - груп.

Ізоелектрична точка досліджених зразків зафіксована в інтервалі рН 3-4, вказує на амфотерність поверхні. Використання негативно заряджених добавок типу високомолекулярних продуктів сульфування речовин з конденсованими ароматичними кільцями, які вибірково сорбуються активними центрами поверхні

антрациту, дозволяє відчутно знизити зростання  $\xi$ -потенціалу, як у сильнокислому, так і в лужному середовищах.

**Таблиця 3**

Електрокінетичний потенціал для систем на основі антрациту з високомолекулярними ПАР- диспергаторами як функція рН дисперсійного середовища.

рН КВП	$\xi$ -потенціал, мВ							
	Антрацит без добавок	ОЕ-ОП	Дофен	ЛСНNa	СПНФ	НФ	С-3	СМФ
1,1	143,2	35,0	39,4	15,4	49,4	42,7	40,8	22,5
1,9	63,1	30,0	31,2	12,0	18,3	31,3	30,7	19,4
2,9	25,5	21,2	24,7	5,6	13,7	24,4	23,7	13,5
3,4	10,7	6,2	10,4	4,1	12,2	13,6	12,5	-10,0
4,0	-8,9	-5,2	-11,4	-4,3	9,2	-12,8	-13,2	-11,5
5,5	-9,1	-8,1	-12,7	-9,3	-8,2	-13,8	-14,8	-12,4
7,0	-12,5	-15,9	-13,7	-11,9	-10,8	-19,9	-18,7	-14,1
8,7	-26,6	-30,5	-21,1	-9,3	-12,8	-21,4	-22,0	-16,3
10,0	-50,7	-52,7	-27,8	-14,0	-15,2	-22,8	-28,3	-23,6

З аналізу даних в'язкості  $\eta$  (табл. 4 ) видно, що зазначені вище ПАР-диспергатори забезпечують більш високі  $\eta$ , ніж аніонні (АПАР) та неіоногенні (НПАР) неселективної дії, які також вивчалися у роботі.

**Таблиця 4**

В'язкість КВП на основі антрациту з різними диспергаторами при різних значеннях  $\gamma$

$\gamma, \text{c}^{-1}$	Антрацит вихідний	ЛСНNa	СПНФ	НФ	С-3	дофен
	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$					
1,0	1,851	1,87	1,81	1,81	1,87	1,85
1,8	1,393	1,79	1,75	1,74	1,73	1,80
3,0	1,155	1,75	1,73	1,71	1,70	1,76
5,4	1,058	1,67	1,65	1,62	1,61	1,69
9,0	0,876	1,53	1,58	1,50	1,56	1,57
16,2	0,803	1,32	1,27	1,29	1,24	1,30
27,0	0,796	1,15	1,08	1,12	1,10	1,15
48,6	0,786	0,92	0,85	0,84	0,80	0,87
81,0	0,700	0,68	0,57	0,56	0,48	0,64
145,8	0,393	0,40	0,38	0,41	0,35	0,43
243,0	0,236	0,22	0,19	0,20	0,18	0,22
437,4	0,131	0,15	0,14	0,15	0,12	0,15

Примітка. Вміст антрациту у суспензії  $C_T$  – 68%. Вміст добавки – 0,5%.

Поверхнева активність ПАР-диспергаторів нижча, ніж у АПАР та НПАР. Але це й забезпечує вибірковість їх дії по відношенню до вугільної поверхні. Найактивніші локації вугільної поверхні, часто пов'язані з високо полярними мінеральними включеннями, інактивуються та екрануються селективними ПАР, зменшуючи радіус електростатичної взаємодії. При цьому полегшується процес витіснення прошарку води з простору між частинками дисперсної фази та формування структури.

У присутності органічних реагентів суспензія демонструє високу стабільність навіть при значних коливаннях знака й абсолютної величини  $\xi$ -потенціалу. Взаємодія гідратованих молекул добавок з поверхнею антрациту приводить до виникнення об'ємної просторової структурної сітки. Дисперсна система при цьому стає структурованою, тобто переходить у новий стан. Виникнення просторових структур запобігає контактній взаємодії між окремими частками і їх агрегуванню з наступною коагуляцією. Система вода - добавка - антрацит переходить від вільно-дисперсного до зв'язано-дисперсного стану, при цьому стає седиментаційно стійкою, тому що наявність структурної сітки утримує частинки дисперсної фази від осідання.

Руйнування структури у всіх випадках відбувається при порівняно високих значеннях швидкості зсуву  $\gamma$ . Тобто структурні елементи високонаповненої дисперсії витримують більш потужні динамічні навантаження, ніж у присутності АПАР та НПАР. Ефективність дії ПАР-диспергаторів на  $\eta$  зростає із підвищенням їх вмісту у суспензії антрациту (табл. 5).

Таблиця 5

Вплив концентрації різних диспергаторів на  $\eta$  КВП на основі антрациту

С <sub>дисп.</sub> , % мас. КВП	ЛСНa	СПНФ	НФ	С-3	дофен
	$\eta$ , Па·с				
0,1	0,98	1,03	1,01	1,02	1,05
0,25	1,35	1,32	1,33	1,33	1,36
0,5	1,53	1,58	1,50	1,56	1,57
0,75	1,57	1,63	1,58	1,61	1,69
1,0	1,83	1,88	1,80	1,86	1,97
1,5	2,42	2,47	2,39	2,44	2,47
2,0	2,75	2,88	2,89	2,80	2,90
2,5	2,92	2,95	2,97	2,90	3,02
3,0	3,02	3,04	3,03	3,02	3,02
4,0	3,10	3,12	3,11	3,06	3,15
5,0	3,12	3,13	3,15	3,12	3,18

Примітка. Вміст антрациту у суспензії  $C_T=68\%$ .  $\gamma = 9 \text{ с}^{-1}$ . В'язкість КВП без добавок 0,88 Па·с.

Проте при введенні понад 2,0% диспергатора спостерігається надмірне зростання в'язкості, що є небажаним для паливних суспензій. З аналізу даних таблиці 5 найбільш доцільною вибрано концентрацію добавки 0,5% на масу КВП.

Підвищення рН сприяє дисоціації АПАР, що зумовлює зростання ефективності

їх дії в лужному середовищі. Для сульфованих нафталін формальдегідів (С-3, Дофен, СПНФ, НФ) спостерігається майже ідентична залежність, що свідчить про їх взаємозамінність завдяки схожій хімічній природі. Відмінності можуть бути обумовлені лише технологічними особливостями виробництва на різних підприємствах. Дія лігносульфонату (ЛСТNa) є найменш ефективною серед досліджених ПАР. Сульфомеламінформальдегід демонструє низьку активність у кислому середовищі, однак його ефективність істотно зростає з підвищенням рН, що пояснюється наявністю аміногруп у молекулі.

Всі застосовані добавки підвищують седиментаційну стійкість КВП (табл. 6).

**Таблиця 6**

Седиментаційна стійкість КВП на основі антрациту з різними АПАР при різних значеннях рН

рН	Реагент						
	Без добавок	СПНФ	НФ	Дофен	ЛСТNa	СМФ	С-3
	St, доби						
3,96	0,25	2,5	2,0	2,5	1,5	1,0	2,5
6,21	0,25	3,0	3,0	3,0	2,0	3,0	4,0
8,17	0,25	3,0	3,0	3,0	2,0	5,0	4,0
10,51	0,5	5,0	4,0	5,0	4,0	8,0	6,0

Примітка. Вміст антрациту у суспензії  $C_T$  – 68%. Вміст добавки – 0,5%.

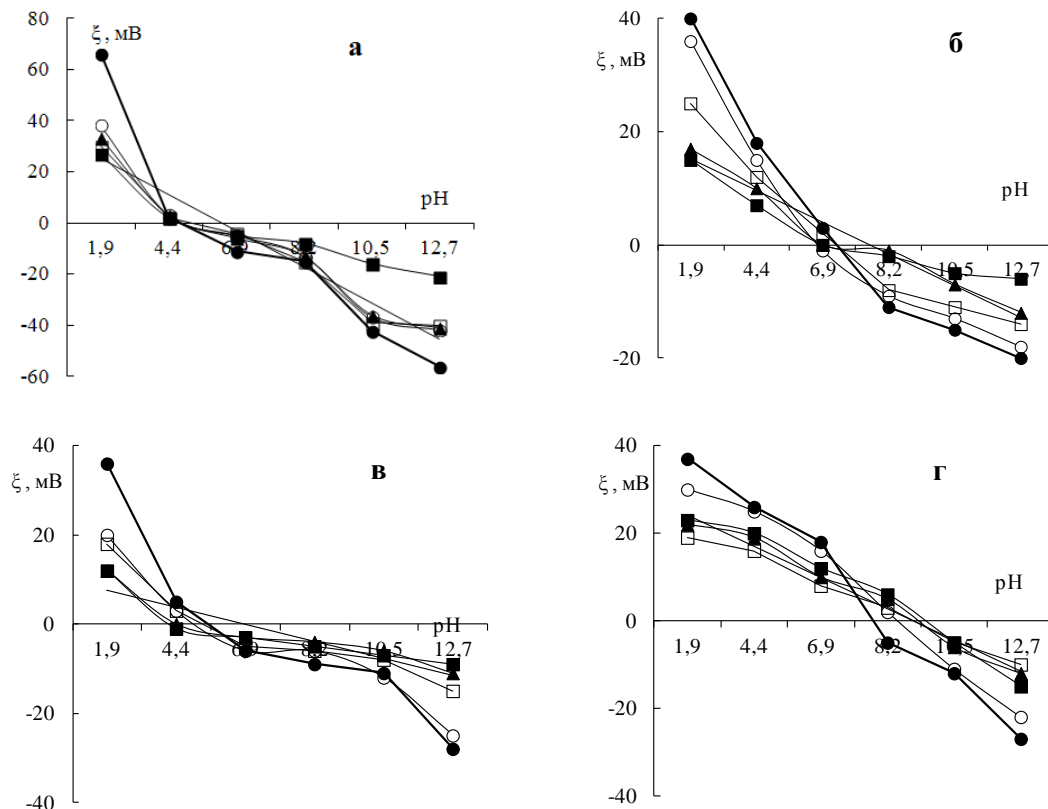
Поверхневий заряд частинок вугілля формується внаслідок дисоціації поверхневих груп вугільної матриці та змінюється у результаті адсорбції заряджених частинок з об'єму електроліту на поверхні вугілля.

Підвищення теплотворної здатності суспензійного вугільного палива можливе внаслідок введення до складу дисперсійного середовища органічних компонентів, зокрема нижчих аліфатичних спиртів, як в чистому вигляді, так і у складі сумішей рідких органічних відходів промислових підприємств. Застосування нижчих спиртів в складі суспензій вугілля дозволяє знизити температуру замерзання КВП, що забезпечує можливість їх зберігання за низьких температур і покращує процес горіння порівняно з традиційними водовугільними суспензіями. Однак поверхневі явища на межі поділу фаз вугілля-вода і вугілля-спирт дещо відрізняються, що призводить до відмінностей в реологічній поведінці КВП.

Дисоціація та адсорбція визначаються хімічною природою дисперсійного середовища, зокрема, мірою електростатичних взаємодій в ньому є величина  $\epsilon$  системи. У органоводних сумішах, де присутні розчинники з різним екрануючим радіусом, зміни  $\epsilon$  ведуть до змін радіусів Дебая та Б'єррума, які є дескрипторами іонно-електростатичних взаємодій. Аліфатичні спирти, застосовані в експериментах, мають значно нижчі показники діелектричної проникності, ніж вода, тому перебіг електрокінетичних явищ та  $\xi$ -потенціал відрізняються від водних. Аліфатичні алкоголі  $C_1$ -  $C_5$  також можна розглядати як неміцелотворюючі ПАР, оскільки вони зменшують  $\sigma$  між дисперсною фазою та дисперсійним середовищем. Це сприяє

зменшенню енергетичного бар'єра між дальнім та ближнім мінімумом на кривій взаємодій ДЛФО. У результаті підвищується ймовірність незворотної агрегації частинок, що негативно впливає на агрегативну стабільність КВП, тому ці особливості слід враховувати при стабілізації КВП на організованих дисперсних середовищах.

Додавання спиртів до дисперсійного середовища значно знижує абсолютну величину  $\xi$ -потенціалу, як у сильнокислій, так і в сильнолужній областях, причому ефект посилюється зі зростанням довжини вуглеводневого радикала спирту (рис. 4).



**Рис. 4.** Зміни  $\xi$ -потенціалу антрациту (а), вугілля марок Г (б), Д (в), П (г) у воді (●) та різних спиртах (○— $C_2H_5OH$ , ▲— ізо- $C_3H_7OH$ , ■— ізо- $C_4H_9OH$ , □—  $C_5H_{11}OH$ ) як функція рН дисперсійного середовища.

Ізоелектрична точка у водно-спиртових сумішах практично не зміщується. Тобто характер адсорбційних взаємодій та поверхневих явищ в  $H_2O$  та у водно-спиртових сумішах не має принципових відмінностей. Відрізняються лише абсолютні значення  $\xi$ -потенціалу, пов'язані з різною інтенсивністю дисоціації поверхневих груп та адсорбції з водно-спиртових розчинів. Крім того, особливості будови молекул алкоголей, зокрема наявність  $CH_2$  — ланцюга, підсилюють ефект екранування поверхні вугілля на відстані першого енергетичного мінімуму. Це ускладнює транспорт досить великорозмірних молекул АПАР та інших потенціал-визначаючих компонент з об'єму розчину до поверхні.

Для оцінки текучості та структурно-механічних властивостей водо-спирто-вугільних суспензій були підготовлені композиції на основі антрациту, вугілля марок Д, Г та П. У результаті визначення седиментаційного об'єму концентрованих спирто-

вугільних суспензій (концентрація дисперсної фази = 60 %) залежно від природи спирту було встановлено, що стійкість суспензій зростає зі збільшенням довжини вуглеводневого радикала алкоголю. Композиційне концентроване водовугільне паливо, виготовлене з використанням ізо-спиртів, виявляє вищі коефіцієнти стійкості порівняно з аналогами на основі лінійних спиртів (табл. 7).

Таблиця 7

Коефіцієнти стійкості концентрованих спиртовугільних суспензій при  $C_T=60\%$

Спирт	Марка вугілля			
	Д	Г	П	А
$C_2H_5OH$	0,345	0,377	0,455	0,528
ізо- $C_3H_7OH$	0,320	0,398	0,504	0,576
ізо- $C_4H_9OH$	0,255	0,324	0,478	0,510
ізо- $C_5H_{11}OH$	0,214	0,304	0,444	0,503

Досліджено ефективність спеціалізованих змочувачів на основі полідиметилсилоксанів з оксіетильними групами. Ці неіоногенні ПАР мають високу адгезію до неполярних поверхонь (як-от антрацит і вугілля марки П) і залишаються ефективними в широкому діапазоні рН, температури та сольового складу.

За хімічною структурою такі ПАР є полідиметилсилоксанами з прищепленими до них оксіетильними групами. Однією з проблем при використанні ПАР неспецифічної дії (сульфовані нафталін, меламін формальдегіди, полікарбоксилати тощо) є їх невисока адсорбційна здатність на неполярних поверхнях та недостатня селективність. Такі поверхні характерні для високометаморфізованих сортів вугілля (антрацит та вугілля марки П). Вищезазвані добавки насамперед орієнтовані для використання у цементно-бетонних композиціях, тобто адаптовані для високополярних поверхонь, характерних для частинок цементу, піску та глини – основних складників бетонних розчинів.

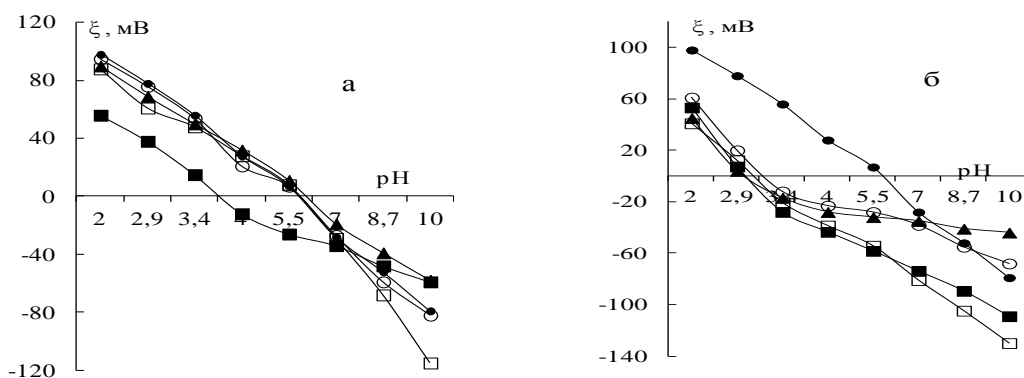
Один зі способів гідрофілізації поверхні вугілля – введення водорозчинних кремнійорганічних добавок. На відміну від звичайно використовуваних модифікаторів типу лігносульфонатів та сульфованих похідних нафталіну, адгезія силіцій-органічних ПАР до поверхні вугілля вища, крім того, вони стабільніші при змінах температури, рН і сольового складу дисперсійного середовища.

Використання силіконових добавок, гідрофілізуючих поверхню вугілля, допомагає розв'язати проблему змочування поверхні вугілля й утворення ліофільної сольватної оболонки. Як гідрофілізуючий агент використовували силіконову рідину DS-602 – співполімер полідіалкілсилоксану й ефіру поліоксіалкілену, що являє собою ПАР неіоногенного типу. Поверхнева активність DS-602 практично не залежить від рН дисперсійного середовища, що є важливою перевагою при використанні в рецептурах КВП, забезпечуючи ефективність дії добавки незалежно від варіацій рН. Диспергаторами й пластифікаторами слугували поліаніонні електроліти на основі сульфованого нафталінформальдегіду (СНФ) і сульфованого меламіну (СМФ).

При модифікуванні поверхні малозольного антрациту (зольність  $A_d=0,7\%$ ) за допомогою тільки СНФ і СМФ ефективність стабілізації є недостатньою. Ці

диспергатори у водному середовищі дисоціюють з подальшою адсорбцією аніона активними центрами поверхні вугілля. Однак оскільки поверхня низькозольного антрациту слабозаряджена й переважно гідрофобна, їх адсорбція недостатня для значної зміни поверхневого заряду, а отже, й  $\xi$ -потенціалу частинок вугілля.

Додавання силіконового змочувача гідрофілізує поверхню антрациту й адсорбція диспергаторів зростає, що проявляється в значно істотніших змінах  $\xi$ -потенціалу під впливом добавок-модифікаторів (Рис. 5).



**Рис. 5.** Зміни  $\xi$ -потенціалу антрациту ( $A_d=0,7\%$ ) (а) та ( $A_d=5,0\%$ ) (б) у воді (●) та з різними добавками (○–СНФ, ▲– СМФ, ■– СНФ+DS-602, □– і СМФ+DS-602) як функція рН дисперсійного середовища.

Значення  $\xi$ -потенціалу зміщуються в негативну область, причому для СНФ, що має більш кислу природу, цей процес є помітнішим у кислому середовищі, а для СМФ, що має у своєму складі аміногрупи, максимум зсуву зміщується в більш лужну область. Додавання DS-602 підсилює дію диспергаторів СНФ та СМФ та позитивно впливає на седиментаційну стійкість КВП на основі антрациту (табл. 8).

**Таблиця 8**

Седиментаційна стійкість ( $St$ ) КВП на основі антрациту ( $A_d=5,0\%$ ) з різними АПАР при різних значеннях рН

рН	Реагент				
	Без добавок	СНФ	СНФ+DS-602	СМФ	СМФ+DS-602
$St$ , доби					
3,96	0,25	2,0	3,0	1,0	2,0
6,21	0,25	3,0	8,0	3,0	4,0
8,17	0,25	3,0	14,0	5,0	10,0
10,51	0,5	4,0	14,0	8,0	12,0

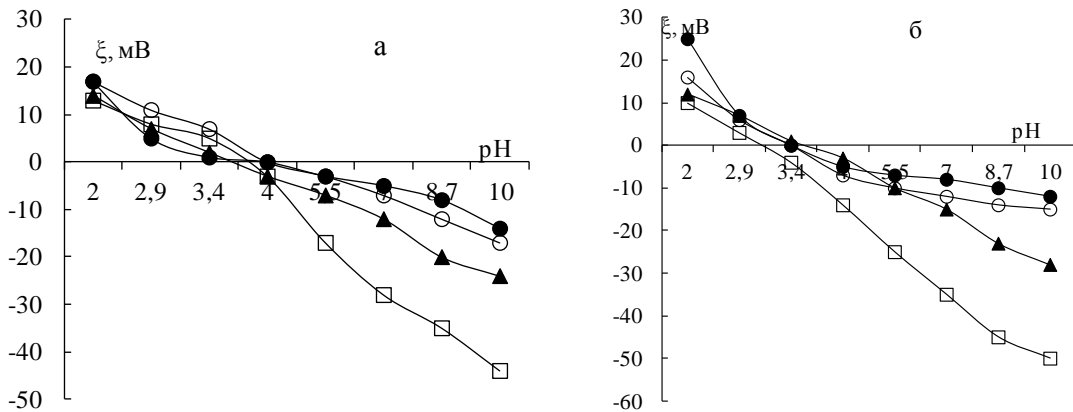
Примітка. Вміст антрациту у суспензії  $C_T$  – 68%. Вміст добавки – 0,5%+0,5%.

Використання диспергаторів СМФ та СНФ у комплексі з DS-602 підвищує седиментаційну стійкість КВП у 2-3 рази. У лужній області ефективність їх дії особливо помітна. Таким чином, спільне застосування диспергатора та змочувача

виявляє ефект синергізму, котрий забезпечує значне поліпшення структурно-реологічних властивостей КВП.

Глинисті мінерали (монтморилоніт, гідрослюда, каолініт) у водних середовищах схильні до самодиспергування з утворенням гелеподібних 3D-структур, що обумовлює їх потенціал як природних наномодифікаторів для КВП. Тому було досліджено вплив добавок глинистих мінералів на структуроутворення та стабільність КВП на основі антрациту та вугілля марки П.

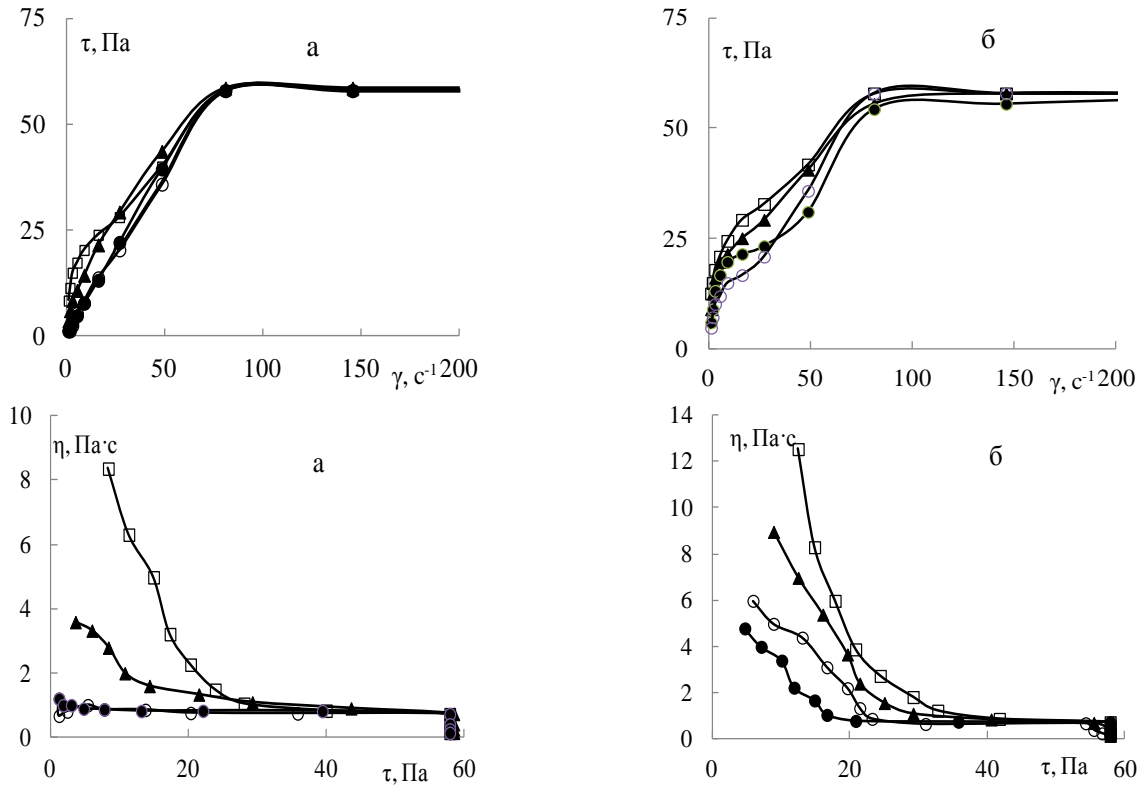
У присутності добавок глинистих мінералів значення  $\xi$ -потенціалу стають більш від'ємними (рис. 6).



**Рис. 6.** Зміни  $\xi$ -потенціалу для КВП на антрациті ( $C_T=62\%$ ,  $A_d=10,7\%$ ) (а), та вугіллі П ( $C_T=62\%$ ,  $A_d=24,0\%$ ) (б) залежно від рН дисперсійного середовища. ●- без додавання глинистих мінералів; ○ – +1% каолініту; ▲– +1% гідрослюди; □– +1% монтморилоніту.

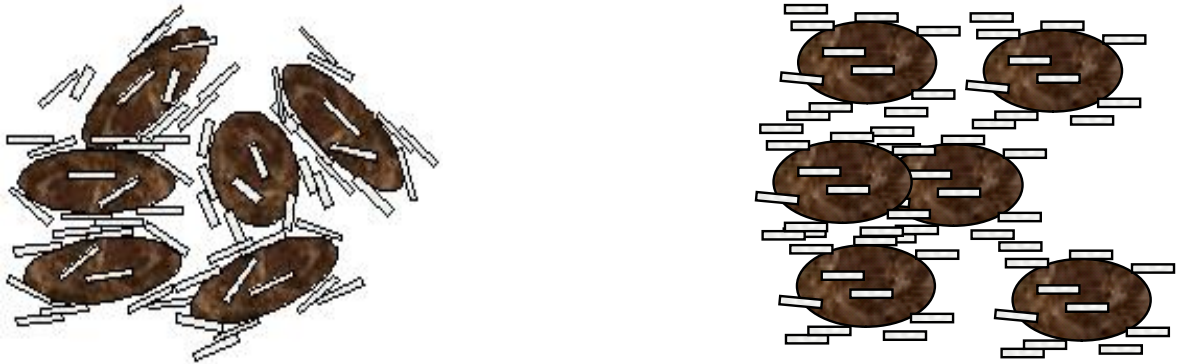
Найсильнішу дію чинять добавки монтморилоніту, що корелює з його найвищою схильністю до самодиспергування у водних розчинах. Елементарні пакети монтморилоніту розміром  $10^{-8}$ -  $10^{-7}$  м з розвиненою гідратованою поверхнею оточують більш розмірні частинки вугілля і визначають електроповерхневі властивості комбінованої структури. Реологічні властивості суспензій антрациту та вугілля марки П, модифікованих глинистими мінералами, наведені на рис. 7.

На кривих плинності можна виділити дві ділянки. На першій, якій відповідає швидкість зсуву  $<100$   $s^{-1}$ , спостерігається утворення псевдопластичної структури, обумовленої високою концентрацією дисперсної фази у системі. На цій стадії формуються міжчастинкові контакти, котрі забезпечують зростання структурної в'язкості. У термінах ДЛФО коагуляційні контакти у такій концентрованій суспензії формуються у дальньому енергетичному мінімумі і є оборотними. Для незворотної коагуляції у ближньому енергетичному мінімумі частинкам слід подолати проміжний енергетичний бар'єр, обумовлений електростатичним відштовхуванням, а при наявності домішок глинистих мінералів – здолати і структурно-механічні перешкоди, пов'язані з 3-D структурованістю суспензії.



**Рис. 7.** Криві плинності (верхній ряд) та ефективної в'язкості (нижній ряд) КВП на антрациті ( $C_T=62\%$ ,  $A_d=5\%$ ) (а) та вугіллі П ( $C_T=62\%$ ,  $A_d=21\%$ ) (б) з додаванням 1% глинистих мінералів, ● - без додавання глинистих мінералів, ○ - +1% каолініту, ▲ - +1% гідрослюди, □ - +1% монтморилоніту.

За невисоких швидкостей зсуву  $\dot{\gamma}$  частинки рухаються неупорядковано і чинять значний опір плинну. Зростання  $\dot{\gamma}$  веде до орієнтації кінетичних одиниць за напрямом плинну (рис.8)



**Рис. 8.** Схема взаємодії частинок вугілля з частинками глинистих мінералів при низьких (ліворуч) та високих (праворуч) напругах зсуву.

Відбувається поступове зменшення ефективної в'язкості  $\dot{\eta}$  шляхом як орієнтації за потоком, так і через розрив міжчастинкових контактів. При  $\dot{\gamma} > 100 c^{-1}$  у всіх системах відбувається перехід до ньютонівського типу течії. Частинки суспензії при великій швидкості зсуву орієнтуються за потоком, але, оскільки  $\dot{\eta}$  майже не

знижується, то сформовані контакти практично не руйнуються. У системі встановлюється динамічна рівновага між утворенням нових контактів і збереженням вже наявних. Це пояснюється високою концентрацією дисперсної фази, що перешкоджає значному віддаленню частинок одна від одної. Такій поведінці сприяють як контактний тиск між частинками внаслідок їхнього щільного упакування, так і посилене утворення контактів, обумовлене розгалуженою поверхнею частинок як вугілля, так і глини.

Як видно з табл. 9, найкращі показники седиментації демонструють суспензії, модифіковані монтморилонітом, дещо нижчі значення спостерігаються при використанні гідрослюди. Каолініт практично не впливає на  $St$ . Така відмінність зумовлена різницею у розмірах, морфології, структурі та електроповерхневих властивостях відповідних мінералів.

Таблиця 9

Вплив неорганічних мінералів на реологічні властивості і стабільність КВП на основі антрациту ( $C_T=68\%$ ), вугілля марки Д ( $C_T=62\%$ ) та П ( $C_T=62\%$ )

Мінерал	Концентрація мінералів у суспензії, % (мас.)	$St$ , доби		
		антрацит	вугілля П	вугілля Д
Монтморилоніт	0,5	1,0	2,0	2,0
	1,0	2,0	4,0	3,0
	1,5	4,0	6,0	5,0
	2,0	6,0	10,0	10,0
	3,0	8,0	>14,0	>14,0
Гідрослюда	0,5	0,5	0,5	1,5
	1,0	1,0	2,0	2,0
	1,5	1,5	3,0	4,0
	2,0	3,0	4,0	8,0
	3,0	5,0	6,0	8,0
Каолініт	0,5	0,25	0,25	0,5
	1,0	0,25	0,25	0,5
	1,5	0,5	0,5	0,5
	2,0	0,5	1,0	1,0
	3,0	0,5	1,0	1,0

Оскільки КВП використовується як паливо, для досягнення максимальної теплотворної здатності важливо забезпечити якомога вищий вміст твердої фази. Це завдання вирішується шляхом оптимізації як фізичних, так і хімічних параметрів, що визначають реологічну поведінку висококонцентрованих суспензій. Одним із ключових чинників є гранулометричний склад вугілля, зокрема розподіл частинок за розмірами.

Суспензії вода - антрацит з бі- та полімодальним розподілом різних фракцій характеризуються низькою стабільністю (табл. 10): розшарування відбувається

досить швидко. Показник  $St$  зростає з підвищенням вмісту твердої фази  $C_T$  суспензії. У бімодальній системі ефективна в'язкість  $\eta_{ef}$  не є середньою величиною  $\eta_{ef}$  моноmodalьних розподілів, а менша, ніж  $\eta_{ef}$  моноmodalьних систем. Це явище пояснюється більш ефективним просторовим упакуванням: дрібні частинки займають проміжки між більшими, що полегшує транспорт еквівалентного об'єму твердих компонентів і знижує  $\eta_{ef}$ .

Таблиця 10

Седиментаційна стійкість у добах КВП на основі антрациту з бі- та полімодальними розподілами різних фракцій: А (1-20 мкм), Б (20-80 мкм), В (80-250 мкм)

C <sub>T</sub> антрациту	Склади КВП							
	1	2	3	4	1*	2*	3*	4*
40	0,25	0,5	0,25	0,5	3,0	2,0	3,0	3,0
45	0,25	0,5	0,5	0,5	3,0	3,0	3,0	3,0
50	0,5	0,5	0,5	1,0	4,0	3,0	3,0	4,0
55	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0	3,0	4,0	4,0
60	0,5	1,0	1,0	1,0	6,0	5,0	4,0	6,0
65	1,0	1,0	1,0	1,0	8,0	8,0	6,0	8,0
70	1,0	1,0	1,0	1,0	8,0	8,0	8,0	8,0

Примітки:

1. 1 – (А: Б: В=1:1:1 мас.); 2 – (А : В=2:5 мас.); 3 – (А: Б: В =1:2:3 мас.); 4 – (Б : В=2:5 мас.).

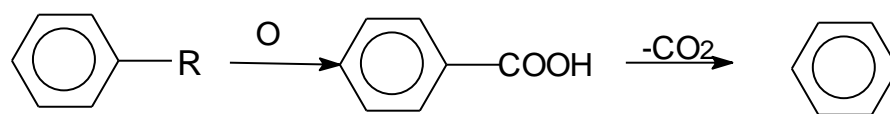
2.\* з добавкою 0,5% С-3. 3.\* з добавкою ... 4.\* з добавкою ...

Для поліпшення  $St$  до систем вводили диспергатор С-3. У присутності С-3  $St$  відчутно зростає і на високо наповнених суспензіях ( $C_T > 60$ ) може досягати 6-8 діб (табл. 10). При цьому значущої різниці для фракцій з різними розподілами частинок не спостерігається. Тому, залежно від особливостей процесу приготування КВП, можна застосовувати фракціонування з різним розподілом для забезпечення бажаних параметрів конкретної суспензії. Варіювання гранулометричного складу з одночасним введенням диспергаторів є дієвим способом регулювання властивостей КВП.

У четвертому розділі розглянуто способи модифікації дисперсної фази та дисперсійного середовища для КВП. Ці методи передбачають плазмохімічну обробку органічної компоненти дисперсійної фази. Багато органічних сполук, що входять до складу рідких промислових і побутових відходів, є небажаними домішками в дисперсійному середовищі КВП через їхню високу екотоксичність і агресивність, що ускладнює приготування, зберігання та спалювання палива. У процесі плазмохімічної конверсії такі токсичні домішки знешкоджуються. Натомість генерується нова карбонвмісна фаза з мікро- та нано-карбонових частинок.

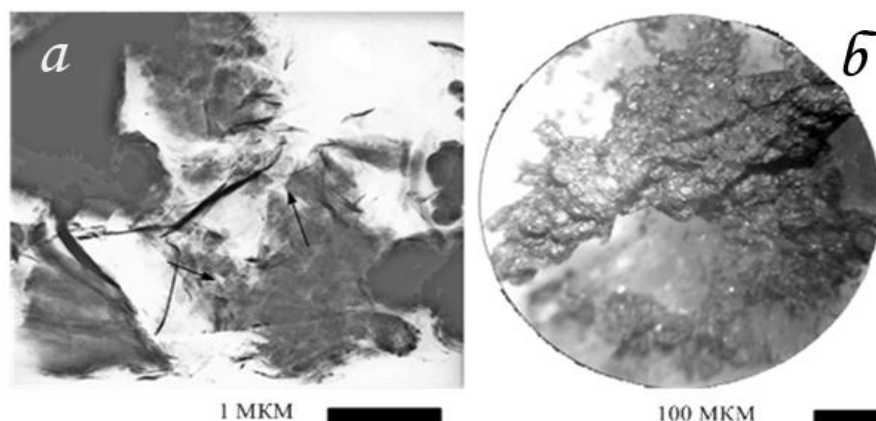
Мікрочастинки карбону утворювались у процесі плазмохімічної конверсії органовмісної стічної води. Як забруднювачі та джерела одержання субмікронного карбону слугували ПАР, барвники, гумінові речовини, багатоконпонентні органовмісні стічні води.

Ароматичне кільце, завдяки делокалізованій  $\pi$ -електронній системі, є найстійкішою частиною органічної молекули. Процес розкладу ароматичних сполук з бічними замісниками ілюструє рис. 9.



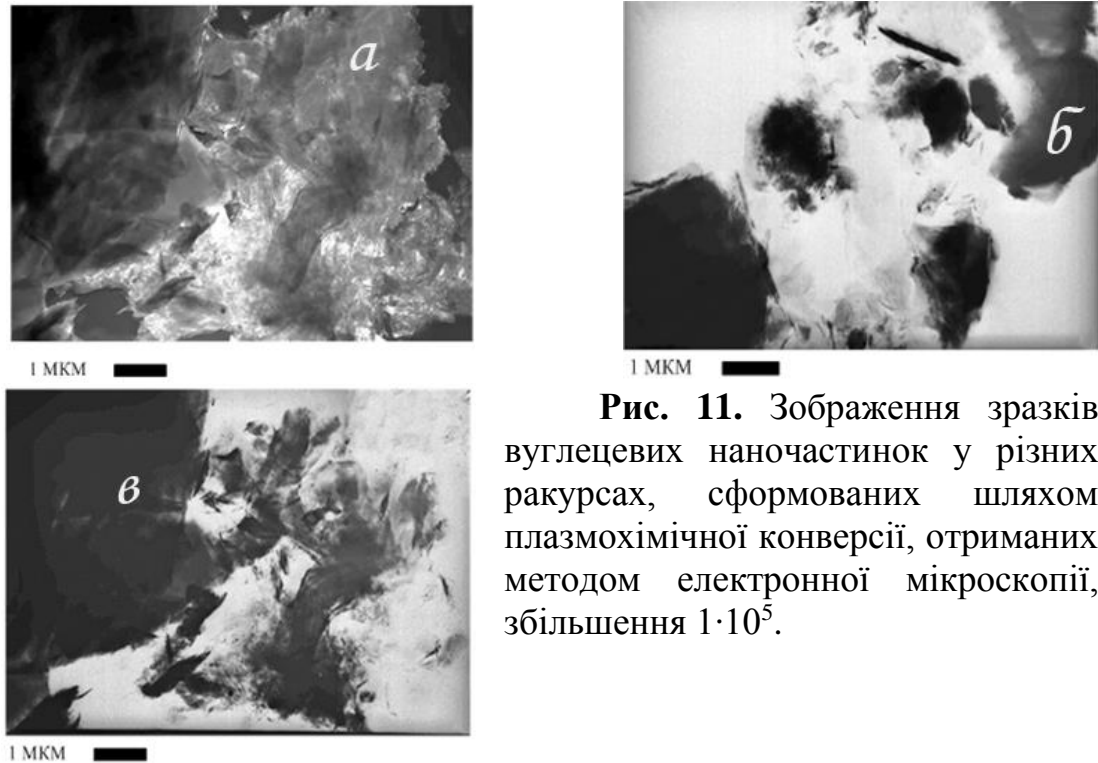
**Рис. 9.** Загальна схема деструкції компонентів з ароматичними структурами в молекулі.

Після первинної деструкції ароматичні кільця внаслідок  $\pi$ - $\pi$  стекінг-взаємодії формують поліароматичні структури, що можуть набувати графеноподібної форми з високою питомою поверхнею та великою кількістю активних центрів. Такі структури значно підвищують ефективність модифікації властивостей КВП. Одразу після запуску установки під дією комбінованих чинників плазмового факела ( $t$ ,  $h\nu$ , генерація радикалів з високою реакційною активністю, електродні процеси) починається конверсія органічної компоненти стічних вод з формуванням мікрочастинок карбону. Ці структури мають розгалужену високо реакційноздатну поверхню. Їх розміри, морфологія і концентрація змінюються упродовж процесу (рис.10, 11).



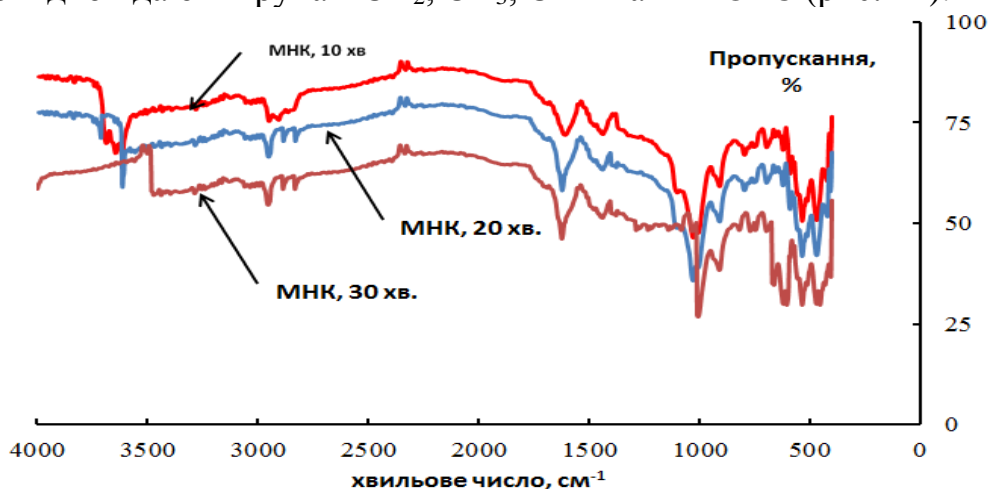
**Рис. 10.** Світлини зразків вуглецевих частинок, сформованих шляхом плазмохімічної конверсії, отримані з використанням електронного (а, збільшення  $14 \cdot 10^4$ ) та оптичного (б, збільшення  $3,4 \cdot 10^2$ ) мікроскопів.

Переважає більшість утворених при плазмохімічній конверсії карбонових мікрочастинок має розміри  $< 32$  мкм. З подовженням часу обробки поступово зростає кількість більших частинок. Сприяє цьому процес конгломерації дрібних частинок у грубі завдяки броунівському руху та турбулізації потоків у плазмохімічному конверторі.



**Рис. 11.** Зображення зразків вуглецевих наночастинок у різних ракурсах, сформованих шляхом плазмохімічної конверсії, отриманих методом електронної мікроскопії, збільшення  $1 \cdot 10^5$ .

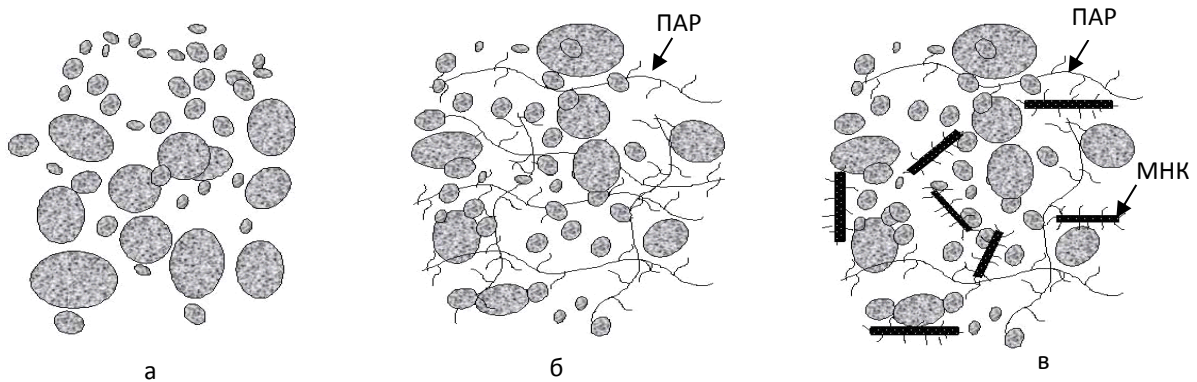
Такі конгломерати мають розгалужені пори та можуть негативно впливати на стабільність суспензій, поглинаючи воду, підвищуючи ефективну в'язкість та формуючи осередки седиментації. Оптимальну тривалість обробки визначено як 20 хвилин – цього часу достатньо для деструкції шкідливих органічних компонентів і утворення стабільної кількості мікрочастинок. У цей період також відбувається активація поверхні частинок, збільшення питомої площі та формування функціональних груп – фенольних, карбоксильних, гідроксильних, лактонних. У спектрах також виявлені сигнали, що відповідають групам  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{C-Ar}$  та  $\text{Ar-O-C}$  (рис. 12).



**Рис. 12.** ІЧ- спектри мікро-нанокарбону (МНК), отриманого плазмохімічною конверсією з різною тривалістю обробки.

У п'ятому розділі розглянуто вплив анізотропних мікро- та нанокомполімерів на основі карбону (отриманих плазмохімічною конверсією) на властивості КВП. Комбінування частинок антрациту розміром 80-150 мкм із карбоновими

мікрочастинками створює полімодальний розподіл у дисперсній фазі, що сприяє підвищенню ступеня наповнення КВП. Висока реакційна здатність дрібнодисперсного карбону з численними активними центрами забезпечує формування стабільної тривимірної сітчастої структури, що стабілізується під дією структурно-механічного чинника (рис. 13).

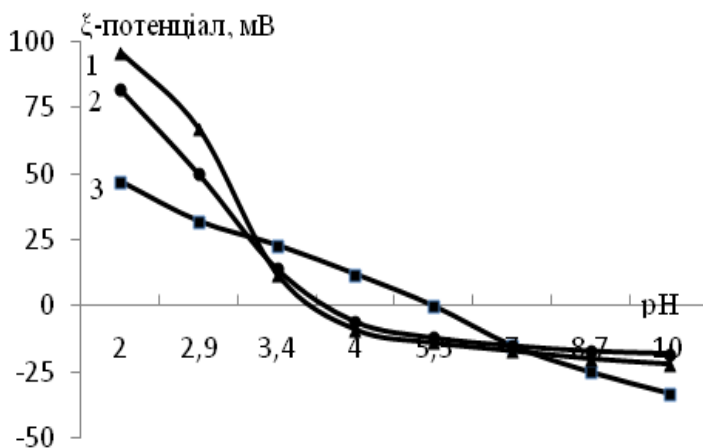


**Рис. 13.** Седиментація полідисперсних систем без добавок стабілізаторів (а), стабілізована ПАР на основі аміноспиртів (б), стабілізована ПАР на основі аміноспиртів та МНК (в).

Крім того, субмікронні частинки карбону відіграють роль антифрикційної компоненти, полегшуючи плинність КВП за умов високого зсуву.

Іншим важливим чинником, що забезпечує бажані властивості КВП, є електростатичне відштовхування частинок дисперсної фази з однойменно зарядженими поверхнями. За законом Кулона сила відштовхування прямо пропорційна величині поверхневого заряду. Оцінити зміни електроповерхневих властивостей можна за допомогою вимірювання  $\xi$ -потенціалу.

Як видно з рис. 14,  $\xi$ -потенціал карбонових мікрочастинок при  $\text{pH} < 7$  за абсолютною величиною значно перевищує  $\xi$ -потенціал антрациту, що пов'язано з високою реакційною здатністю свіжоутвореної поверхні карбонових мікрочастинок. Вони ж в основному визначають і електроповерхневі властивості суміші.



**Рис. 14.** Електрокінетичний потенціал як функція (*від*) рН дисперсійного середовища для карбонових мікрочастинок (1), суміші 85% антрациту та 15% карбонових мікрочастинок (2), антрациту (3).

При  $pH < 2,5$  стабільність КВП може забезпечуватись внаслідок введення до складу КВП карбонових мікрочастинок. Проте внаслідок високої кислотності такі паливні композиції не застосовуються через їхню агресивність щодо конструкційних матеріалів. У слабколужному середовищі, яке є прийнятним для КВП, значення  $\xi$ -потенціалу частинок дисперсної фази не перевищують за абсолютною величиною 15-20 мВ. За результатами досліджень  $St$  КВП різного складу, модифікованого мікронанокарбоном, встановлено, що попередня плазмохімічна конверсія органовмісних стічних вод, які використовуються як дисперсійне середовище для композиційного водовугільного палива, дає змогу покращити експлуатаційні властивості КВП. Зростання седиментаційної стабільності та оптимізація ефективної в'язкості досягаються як внаслідок підсилення електростатичного відштовхування частинок суспензії зі збільшеним  $\xi$ -потенціалом, так і завдяки досягненню бімодального складу дисперсної фази. Порівняно з традиційними суспензіями вугілля в органовмісних стічних водах седиментаційна стійкість покращеного КВП значно поліпшується й досягає 14 діб (табл. 11). Окрім цього, завдяки каталізуючим властивостям високо дисперсні добавки підвищують реакційну здатність КВП, що позитивно впливає на повноту згоряння й енергетичну ефективність палива.

Таблиця 11

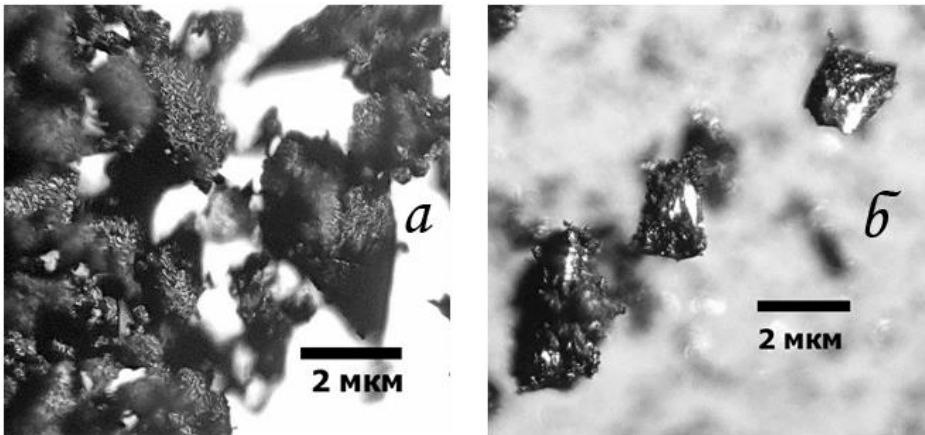
Седиментаційна стійкість КВП з різним вмістом мікронанокарбону (МНК)

Склад КВП	С (МНК), %					
	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2
	$St$ , доби					
69%А+1%(50% ПК+50%DS-601	6,0	8,0	10,0	14,0	>14,0	>14,0
64%П+1%(50% ПК+50%DS-601	6,0	12,0	14,0	>14,0	>14,0	>14,0
64%Г+1%(50% ПК+50%DS-601	8,0	10,0	12,0	12,0	>14,0	>14,0
64%Д+1%(50% ПК+50%DS-601	8,0	10,0	12,0	12,0	>14,0	>14,0
64%ДГ+1%(50% ПК+50%DS-601	7,0	10,0	12,0	12,0	>14,0	>14,0
69%А+1%(50% СМФ+50%DS-601	4,0	5,0	8,0	10,0	12,0	>14,0
64%П+1%(50% СМФ +50%DS-601	6,0	9,0	10,0	12,0	>14,0	>14,0
64%Г+1%(50% СМФ +50%DS-601	8,0	10,0	12,0	14,0	>14,0	>14,0
64%Д+1%(50% СМФ +50%DS-601	8,0	10,0	12,0	14,0	>14,0	>14,0
64%ДГ+1%(50% СМФ +50%DS-601	8,0	9,0	10,0	14,0	>14,0	>14,0
69%А+1%(50% СНФ+50%DS-601	5,0	6,0	10,0	12,0	12,0	>14,0
64%П+1%(50% СНФ +50%DS-601	6,0	10,0	12,0	12,0	>14,0	>14,0
64%Г+1%(50% СНФ +50%DS-601	12,0	7,0	8,0	12,0	>14,0	>14,0
64%Д+1%(50% СНФ +50%DS-601	12,0	8,0	12,0	12,0	>14,0	>14,0
64%ДГ+1%(50% СНФ +50%DS-601	12,0	6,0	12,0	12	>14,0	>14,0

У шостому розділі проаналізовано характеристики КВП на основі сумішей антрациту та пірокарбону.

Пірокарбон є твердим залишком піролізу органічних відходів, основним його компонентом є елементарний вуглець. Рис. 15 ілюструє морфологічні особливості частинок пірокарбону (а) та антрациту (б). Показано, що пірокарбон має пористу структуру із розвиненою питомою поверхнею ( $S_{sp}=35,3 \text{ м}^2/\text{г}$ ) і високу шорсткість; частинки трапляються як сферичної, так і неправильної форми. Натомість антрацит характеризується кристалічною структурою, наявністю аморфної фази, високою щільністю, крихкістю та металічним блиском.

Пірокарбон виявляє гідрофобні властивості (кут змочування  $> 90^\circ$ ), що ускладнює застосування класичної ДЛФО-теорії через переважання сил притягання. Тому для стабілізації суспензій необхідне одночасне використання диспергаторів і змочувачів. Дослідження показали, що ефективними можуть бути речовини з подвійною дією.

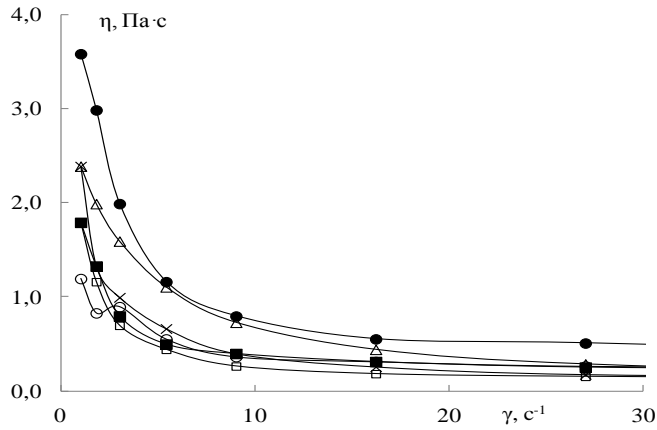


**Рис.15.**  
Мікросвітлини частинок:  
а) пірокарбону,  
б) антрациту,  
отримані за допомогою оптичного мікроскопу

У початкових експериментах було встановлено, що при вмісті пірокарбону  $> 40\%$  суспензії непридатні до використання через сильне загущення. Такі системи не демонструють ознак плинності під дією помірних  $\tau$ . Для надання їм плинності застосовано хімічні модифікатори. З метою підбору найбільш ефективних диспергаторів та стабілізаторів КВП було вивчено вплив реагентів ЛСТNa, НФ, КМЦ, СЗ, гумату Na з концентрацією 0,5-2% мас. на динамічну в'язкість  $\eta$ .

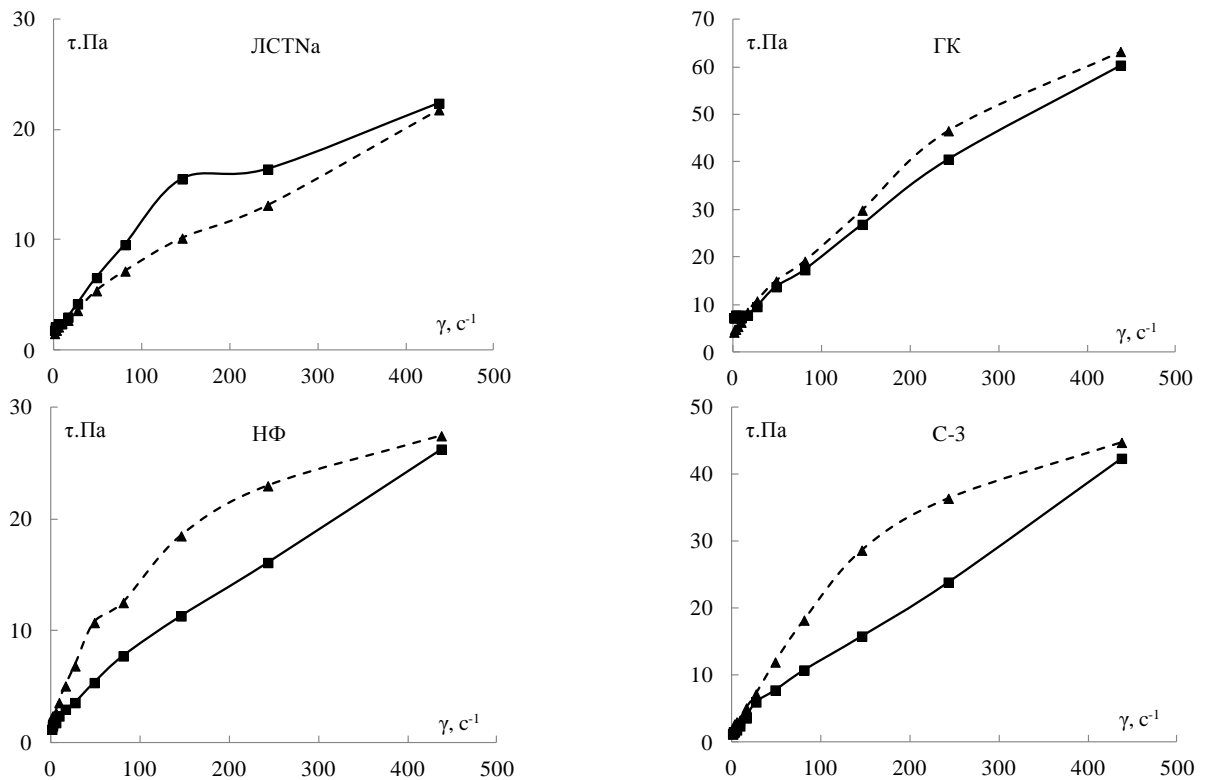
Як видно з рис. 18, криві в'язкості КВП на основі пірокарбону в присутності різних реагентів мають значний прогин в області  $\gamma - 0-15 \text{ с}^{-1}$ , що вказує на те, що всі системи мають псевдопластичний плин.

Прогин на даних кривих вказує на утворення структурованої системи, і чим він більший, тим більше напруження необхідно докласти для руйнування такої структури. Найбільш виражений структурний ефект – у зразків КВП з 2% СЗ та 0,1% КМЦ. Криві в'язкості (рис. 16) свідчать про спад  $\eta$  КВП зі зростанням  $\gamma$ . Для усіх досліджених зразків при досягненні  $\gamma 15-20 \text{ с}^{-1}$  структура руйнується і при підвищенні  $\gamma > 20 \text{ с}^{-1}$  КВП демонструє майже ньютонівський плин.



**Рис. 16.** Криві в'язкості КВП на основі пірокарбону при різних значеннях  $\gamma$  для різних диспергаторів (●-2%С-3+0,1%КМЦ, ○-2%С-3, □- 2%ЛСТNa, ■-2%НФ, Δ-2% гумату Na, ▲-2% гумату Na=0,1%ОП-10) .

На рис. 17 наведено криві в'язкості при поступовому зростанні й подальшому зниженні  $\gamma$  для КВП на основі пірокарбону з різними добавками.



**Рис. 17.** Криві плинності КВП на основі пірокарбону ( $St=50\%$ ) з різними добавками (пунктирна крива– зростання  $\gamma$ , неперервна крива– спадання  $\gamma$ ).  $C_{LSTNa} = C_{HF} = C_{GK} = C_{C-3} = 2\%$ .

Різниця між ефективністю добавок не дуже помітна, але можна відзначити, що найбільше знижує  $\eta$  добавка С-3. Тому подальші дослідження були сфокусовані саме на вивченні цього диспергатора. Для більшості псевдопластичних структур характерною є втрата структурованості під впливом високих  $\gamma$  та відновлення початкової  $\eta$  при знятті високих навантажень та у стані спокою. Це явище тиксотропії підтверджується гістерезисом кривих плинності (рис.19) і є характерним для КВП, дисперсною фазою якого є частинки вугілля. Псевдопластичний характер плинності

спостерігається для добавок на основі сульфованого нафталінформальдегіду (НФ та С3). До псевдопластичного плинущу також можна віднести зразок КВП з ЛСТNa. Для зразка з гуміновими кислотами (ГК) крива наближена до ньютонівської течії, тобто додавання ГК у систему на основі пірокарбону не призводить до помітного структурування системи. Поведінка систем при спаданні  $\dot{\gamma}$  характеризується майже постійним кутом нахилу реологічної кривої, тобто ньютонівським характером течії.

Як видно з табл. 12, всі наведені системи демонструють псевдопластичний характер плинущу при помірних навантаженнях та швидке зменшення  $\eta$  при зростанні швидкості зсуву. При швидкості зсуву  $9 \text{ c}^{-1}$ , яка зазвичай застосовується для порівняння експлуатаційних характеристик КВП,  $\eta$  не перевищує  $0,8 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Таблиця 12

В'язкість КВП на основі пірокарбону технічного (Ст=50%) при різних  $\dot{\gamma}$

$\dot{\gamma}, \text{ c}^{-1}$	2% С-3	2% ЛСТNa	2 % НФ	С-3+0,1 КМЦ	Гумінові кислоти (ГК)	2 %ГК+ОП
	$\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$					
1	1,194	1,791	1,791	3,582	2,388	2,388
1,8	0,829	1,161	1,327	2,985	1,327	1,990
3	0,896	0,697	0,796	1,990	0,995	1,592
5,4	0,553	0,442	0,498	1,161	0,663	1,106
9	0,365	0,265	0,398	0,796	0,398	0,730
16,2	0,313	0,184	0,313	0,553	0,258	0,442
27	0,265	0,155	0,254	0,509	0,177	0,287
48,6	0,246	0,135	0,221	0,405	0,147	0,184
81	0,225	0,118	0,155	0,369	0,125	0,170
145,8	0,197	0,106	0,127	0,246	0,102	0,139
243	0,150	0,068	0,095	0,177	0,088	0,111
437,4	0,102	0,051	0,063	0,138	0,056	0,074

КВП, виготовлені з пірокарбону без додавання модифікаторів та високодисперсного вуглецю, мають задовільні значення ефективної в'язкості ( $0,78\text{-}0,96 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ), але седиментаційно нестійкі. Їх стабільність складає  $0,20\text{-}0,25$  доби, що є зовсім недостатнім. Подальше зростання концентрації пірокарбону у КВП веде до значного загушення системи. Тобто вміст пірокарбону  $> 50\%$  є надлишковим і результується у надмірній в'язкості КВП. З метою зниження в'язкості та покращення стабільності було створено композиційні системи з полімодалним складом дисперсної фази: антрацит + пірокарбон у різних пропорціях. Усі досліджені зразки демонструють виражену псевдопластичність у області  $\dot{\gamma} 0\text{-}30 \text{ c}^{-1}$ , що вказує на те, що всі системи мають псевдопластичний характер текучості. Прогин на даних кривих підтверджує існування внутрішньої структурованості суспензій та чим прогин більший, тим більше напруження необхідно прикласти для руйнування такої структури. В'язкість усіх досліджених КВП спадає із ростом швидкості зсуву до  $15\text{-}20 \text{ c}^{-1}$ . Подальше зростання  $\dot{\gamma}$  проходить при майже сталих значеннях  $\eta$ . Перехід до ньютонівського характеру плинущу пов'язаний з різким превалюванням розривів

контактів та втратою структурованості, викликаних динамічними факторами, пов'язаними зі зростанням  $\gamma$ . Найнижчі значення  $\eta$  має КВП з дисперсною фазою 75% антрациту та 25% пірокарбону. Її ефективна в'язкість нижча, ніж КВП на чистому антрациті. Додавання більш дрібнодисперсної фракції пірокарбону до частинок антрациту з унімодальним розподілом покращує пакування частинок і знижує ефективну в'язкість КВП та може бути способом регулювання параметрів суспензії.

Підвищення вмісту пірокарбону веде до зростання  $\eta$ . Найвища  $\eta$  спостерігається у системі на чистому пірокарбоні. Таким чином, полімодальний розподіл у системі 75% антрацит та 25% пірокарбон забезпечує найнижчі значення  $\eta$  при однаковій концентрації твердої фази.

**У сьомому розділі** поглиблено уявлення про механізм зневоднення та електрокінетичної ремедіації глинистих та гальванічних шламів з низькою гідравлічною проникністю. Запропоновано та експериментально досліджено шляхи інтенсифікації масоперенесення у системах такого типу. Великий асортимент техногенних відходів побутового та промислового водоочищення: відпрацьовані сорбенти на основі глинистих мінералів та активованого вугілля, гальванічні шлами тощо з погляду колоїдної хімії є висококонцентрованими дисперсіями. Утилізація таких високонаповнених систем є досить витратною через високу концентрацію баластних речовин на фоні високої обводненості, багатоконпонентності складу та низького вмісту цільових речовин. Тим часом такі відходи, зокрема гальванічні шлами, можуть слугувати цінним вторинним джерелом дефіцитних кольорових металів: Cu, Ni, Cr, Co, Zn тощо.

З вищенаведених причин вилучення згаданих елементів традиційними гідрометалургійними способами часто неефективне. Перспективною альтернативою традиційним способам утилізації відходів з низькою гідравлічною проникністю є електрокінетична обробка, заснована на явищах електроосмосу та електроміграції. Експерименти з електрокінетичною ремедіацією пористих середовищ показали, що метод найбільш ефективний для вилучення іонних та заряджених колоїдних забруднень. Однак електроремедіація, особливо у випадку вилучення сполук важких металів, без використання способів інтенсифікації є малоефективною. Тому для посилення вилуговування важких металів (Ni, Cu, Zn) застосовано поєднання електроміграції з електролітичним утворенням  $H^+$ -іонів на катоді та подальшим електроосадженням. У таблиці 13 підсумовано дані з ефективності електрокінетичної утилізації високонаповнених гальванічних шламів з вилученням важких металів.

Показано, що електрокінетична обробка високонаповнених гальванічних шламів є ефективним способом їх утилізації. В перспективі, шлами після електроремедіації та вилучення цінних кольорових металів можуть слугувати сировиною для чорної металургії.

Таблиця 13

Узагальнені дані ефективності електрокінетичної (ЕК) утилізації високонаповнених гальванічних шламів з вилученням важких металів

Елемент	Процес	Вміст елемента у шламi, %	Густина струму, А/м <sup>2</sup>	Ступінь вилучення, %	Витрата електроенергії, кВт·год/кг Me
Cu	ЕК вилуговування оксикислотами	9,8	0,48	94,8 - 98,1	5,7-6,0
Cu	Одностадійне ЕК вилуговування з катодною генерацією Н <sup>+</sup> - іона	9,8		99,2	5,0
Cu	Двостадійне ЕК вилуговування з плазмохімічною конверсією на першій стадії	9,8	0,42	33,1 перша стадія; 99,2-друга стадія	5,4-5,6
Zn	ЕК вилуговування з катіонообмінним волокном	1,1	0,8-1,2	~80	7,6-7,8
Ni	Одностадійне ЕК вилуговування з катодною генерацією Н <sup>+</sup> - іонів	1,2	10-12	88,7-90,2	6,8-7,0

## ВИСНОВКИ

На основі теоретико-експериментальних досліджень розроблено колоїдно-хімічні принципи отримання та керування фізико-хімічними властивостями концентрованих дисперсних систем у середовищах різної полярності, а також науково обґрунтовано підходи до регулювання реологічних властивостей, процесів структуроутворення та стабілізації таких систем.

1. Встановлено, що основним фактором забезпечення стабільності та керованості властивостей високонаповнених плинних дисперсних систем у середовищах різної полярності є формування структурно-механічних бар'єрів, які виникають унаслідок хімічних і фізико-хімічних взаємодій між частинками дисперсної фази та дисперсійним середовищем. Вперше запропоновано й досліджено методи регулювання властивостей концентрованих плинних дисперсних систем поєднанням добавок реагентів та субмікронних частинок, що суттєво підвищує динамічну стійкість сформованої просторової структури до зовнішніх впливів і забезпечує тривалу стабільність висококонцентрованих дисперсій.

2. Досліджено адсорбційні та електроповерхневі властивості вугілля різного ступеня метаморфізму. Встановлено, що у сильнокислому середовищі (рН < 3) всі

досліджені зразки вугілля мають позитивний  $\xi$ -потенціал, а при  $pH > 4$  заряд стає негативним. Абсолютні значення  $\xi$ -потенціалу поверхні вугілля у діапазоні  $pH$  3-8 не перевищують 25-30 мВ, що не забезпечує седиментаційну стійкість анізотропних грубодисперсних систем з частинками  $> 10^{-4}$  м. Таким чином виявлено, що іонно-електростатичне відштовхування є недостатнім для стабілізації систем з мікронними частинками вугілля у середовищах різної полярності.

3. Проаналізовано вплив ПАР різної хімічної будови на електроповерхневі та структурно-реологічні параметри КВП. Показано, що для регулювання властивостей композиційного концентрованого водовугільного палива з анізотропними частинками доцільним є застосування ПАР, механізм дії яких полягає у селективному регулюванні заряду анізотропної вугільної поверхні, підсиленні іонно-електростатичного відштовхування і реалізації стеричної стабілізації завдяки формуванню тривимірної структури.

4. Найкращу стабілізацію КВП забезпечують комбінації диспергаторів на основі сульфованого нафталін-формальдегіду (С-3, Дофен, НФ) з поверхневими модифікаторами на основі сіліційорганічних ПАР. Такі поєднання посилюють дію диспергаторів, підвищуючи стабільність систем у 2–3 рази порівняно з традиційними диспергаторами та у 15–20 разів у порівнянні з системами без добавок.

5. Продемонстровано, що досягнення максимального вмісту твердої фази при збереженні плинності системи неможливе без забезпечення оптимального гранулометричного складу КВП. Бімодальний або полімодальний розподіл частинок у КВП забезпечує вміст твердої фази до 70%, седиментаційну стабільність до 30 діб і ефективну в'язкість  $\eta$  1,20-1,65 Па·с при швидкості зсуву  $\dot{\gamma} = 9$  с<sup>-1</sup>. Ці показники забезпечують високі техніко-експлуатаційні параметри КВП.

6. Встановлено, що електрокінетичний потенціал поверхні частинок дисперсної фази КВП на основі вугілля марок Д, Г, П і антрациту у воді та органорозчинних дисперсійних середовищах на основі аліфатичних спиртів визначається дисоціацією поверхневих груп вугільної поверхні. Величина  $\xi$ -потенціалу у водноспиртових сумішах не перевищує 30 мВ за абсолютною величиною, що недостатньо для електростатичної стабілізації КВП з широким розподілом розмірів частинок дисперсної фази (1-250 мкм). Стабільність спиртовугільних суспензій підвищується зі зростанням довжини аліфатичного радикала алкоголю внаслідок екранування поверхні на рівні першого енергетичного мінімуму через зростання  $\eta$ , густини та поверхневої активності алкоголів.

7. Показано, що регулювання властивостей КВП у середовищах різної полярності має специфічні особливості. Додавання алкоголів у дисперсійне середовище суттєво знижує абсолютну величину  $\xi$ -потенціалу як у сильноокислій, так і в сильнолужній областях, причому це зниження тим істотніше, чим більша довжина аліфатичного радикала спирту. Недостатня величина  $\xi$ -потенціалу у водноспиртових сумішах потребує введення добавок реагентів-модифікаторів поверхні для надійної стабілізації властивостей КВП. При їх додаванні суспензія більш стійка навіть у випадку значних коливань знаку й абсолютної величини  $\xi$ -потенціалу, оскільки присутність органічних реагентів сприяє утворенню структурно-механічних бар'єрів, що підвищує стабільність КВП.

8. Запропоновано нові способи регулювання властивостей КВП із застосуванням анізотропних субмікронних добавок: електроокисненого графіту, субмікрокарбону, шунгіту та глинистих мінералів. Механізм їх регулювальної дії полягає у вбудовуванні та зміцненні тривимірної просторової структури (у) КВП. За впливом на покращення стабільності субмікронні добавки розташовуються в порядку: субмікронний карбон > монтморилоніт > гідрослюда > електроокиснений графіт > шунгіт > каолінит. Введення до складу КВП субмікронних добавок підвищує стабільність дисперсії у 2- 5 разів, при збереженні бажаної  $\eta$  1,2 -1,65 Па·с.

9. Запропоновано, експериментально досліджено та підтверджено метод отримання безпосередньо в дисперсійному середовищі субмікронного карбону шляхом плазмохімічної конверсії органовмісних стічних вод, які використовуються як дисперсійне середовище для КВП. Плазмохімічна деструкція органічних компонентів (ПАР, барвники, гумінові кислоти) дає субмікронні карбонові частинки з високою реакційною здатністю. Синергетичний ефект від одночасного застосування субмікронних частинок і реагентних добавок суттєво покращує експлуатаційні властивості КВП.

10. Показано, що регулювання властивостей та утилізацію кольорових металів з високонаповнених глинистих та гальванічних шламів з низькою гідравлічною проникністю доцільно проводити за допомогою електроміграційного транспорту. Спосіб поєднує вилуговування іонів металів катодно генерованими  $H^+$ -іонами та їх наступне електроосадження на катоді. Ефективність вилучення Ni, Zn і Cu становить 90,2-99,2 %.

11. Виготовлено та апробовано зразки КВП на пілотних промислових установках та доведено можливість використання його як суспензійного палива. Таке паливо має технологічні та екологічні переваги перед традиційним вугіллям та є перспективним замінником традиційних енергоносіїв – нафти та газу, що важливо в умовах дефіциту енергоносіїв в країні.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті:

1. **Klishchenko R.E.**, Chebotareva R.D., Goncharuk V.V. Electromigration purification of galvanic sludge of copper ions. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2010. Vol. 32, no. 4. P. 206–211. DOI: 10.3103/s1063455x1004003x Особистий внесок здобувача: *Виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті.*

2. Makarov A.S., **Klishchenko R.E.**, Zavgorodnii V.A., Makarova E.V. The impact of the water salt content on the properties of coal-aqueous suspensions. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2011. Vol.33, no. 6. P. 357–363. DOI: 10.3103/s1063455x11060026. Особистий внесок здобувача: *Виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті. (Q3)*

3. **Кліщенко Р.Є.**, Макаров А.С., Савицький Д.П., Завгородній В.А., Супрунчук В.І. Вплив ПАР різної природи на заряд поверхні частинок дисперсної

фази гідросуспензій вугілля. *Науковий вісник Чернівецького університету. Хімія. Чернівці*. 2011. Випуск 581. С.45–49. Особистий внесок здобувача: *Виконання електрокінетичних експериментів, участь у написанні статті*.

4. **Klishchenko R.E.**, Chebotarova R.D., Goncharuk V.V. Extraction of zink from aqueous solutions by electrically polarized cation exchange fibers. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2012. Vol. 34, issue 6. P. 253–257. DOI: 10.3103/S1063455X1206001X. *Виконання експериментів з електрокінетичного кондиціонування гальванічних шламів, участь у інтерпретації даних та написанні статті. (Q3)*

5. **Кліщенко Р.Є.** Електрокінетичне вилучення купруму зі шламів гальванічного виробництва з використанням органічних кислот. *Науковий вісник Чернівецького університету. Хімія. Чернівці*. 2012. Випуск 606. С. 49–52.

6. Макаров А.С., **Кліщенко Р.Є.**, Коновал О.А. Вплив складу водноспиртових дисперсійних середовищ на електрокінетичні і реологічні властивості композиційних водовугільних суспензій. *Наукові вісті КПП*. 2013. №3. С.127–132. Особистий внесок здобувача: *Постановка та планування експерименту, проведення електрокінетичних досліджень, написання статті*.

7. Goncharuk V.V., **Klishchenko R.E.**, Kornienko I.V. Destruction of nonionic surfactants in a plasma-chemical reactor. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2017. Vol.39, no. 6. P. 355–359. DOI: 10.3103/S1063455X1706008X. Особистий внесок здобувача: *Розробка концепції. Постанова та планування експерименту, проведення електрокінетичних досліджень, написання статті. (Q3)*

8. Гончарук В.В., **Кліщенко Р.Є.**, Корнієнко І.В. Деструкція барвника активний червоний 5СХ у проточному плазмохімічному реакторі. *Наукові вісті КПП*. 2018. № 3. С. 93-97. Особистий внесок здобувача: *Участь у плануванні експерименту, проведення електрокінетичних досліджень та аналіз результатів, написання статті*.

9. Goncharuk V.V., **Klishchenko R.E.**, Kornienko I.V. Destruction of GT Azo active orange dye in the flow-through plasma-chemical reactor. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2018. Vol. 40, no. 4. P. 185-189. DOI: 10.3103/S1063455X1804001X. Особистий внесок здобувача: *Постанова та планування експерименту, проведення електрокінетичних досліджень, аналіз результатів та написання статті. (Q3)*

10. Гончарук В.В., **Кліщенко Р.Є.**, Корнієнко І.В. Деструкція поверхнево-активних і гумінових речовин у плазмохімічному реакторі. *Наукові вісті КПП*. 2018. № 4. С. 1-6. Особистий внесок здобувача: *Участь у плануванні експерименту, проведення електрокінетичних досліджень та аналіз результатів, написання статті*.

11. Макаров А.С., **Кліщенко Р.Є.**, Єгурнов О.І., Корнієнко І.В. Плазмохімічна технологія стабілізації композиційного водовугільного палива на основі органовмісних стічних вод. *Український хімічний журнал*. 2019. Т.85, №7. С. 49-56. DOI:10.33609/0041-6045.85.7.2019.49-56. Особистий внесок здобувача: *Планування дослідження, виконання реологічних та електрокінетичних досліджень, аналіз результатів, написання статті*.

12. Макаров А.С., **Кліщенко Р.Є.**, Єгурнов О.І., Корнієнко І.В., Пахар Т.А. Реологічні та електрокінетичні властивості композиційного водовугільного палива на основі органівмісних стічних вод, стабілізованого вуглецевими мікрочастинками. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2021.Т. 12, № 1. С.32-39. DOI:10.33609/0041-6045.85.7.2019.49-56. Особистий внесок здобувача: *Участь у плануванні експерименту, проведення електрокінетичних досліджень та аналіз результатів, написання статті*.
13. Svietkina O., Bas K., Boruk S., **Klishchenko R.**, Eehurnov O., Haddad J., Khodos O. Composite carbonaceous coal-water suspensions. *Materials Science Forum*. September 2021. Vol. 1045. P.212-225. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.212 Особистий внесок здобувача: *Виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті*.
14. **Klishchenko R.**, Chebotarova R. Removal of nickel from electroplating wastewater by a combination of electro dialysis and electrodeposition. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2023. Vol. 45, no. 4. P. 378-382. DOI: 10.3103/S1063455X23040070. Особистий внесок здобувача: *Планування та виконання експериментів з електрокінетичного кондиціонування гальванічних шламів. Участь у написанні статті*
15. **Кліщенко Р.** Стабілізація композиційного водовугільного палива за допомогою вуглецевого мікронаноматеріалу та аміноспиртів. *Український хімічний журнал*. 2023. Т.89, № 09. С. 3-13. DOI: 10.33609/2708-129X.89.09.2023.3-13.
16. **Кліщенко Р.Є.**, Корнієнко І.В., Шкуткова О.В. Вплив добавок глинистих мінералів на властивості композиційного водовугільного палива. *Український хімічний журнал*. 2023. Т.89, №11. С.35-50. DOI:10.33609/2708-129X.89.11.2023.35-50. Особистий внесок здобувача: *Планування та виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, аналіз та інтерпретація результатів, участь у написанні статті*.
17. **Klishchenko R.E.**, Chebotareva R.D., Demchenko V.Ya., Remez S.V. Adsorption of copper on modified galvanic sludge. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2024. Vol. 46, issue 3. P. 302-308. DOI: 10.3103/S1063455X24030068 *Планування та виконання експериментів з електрокінетичного кондиціонування гальванічних шламів. Участь у написанні статті*.
18. **Klishchenko R.** Destruction of the procion red MX5-B dye in a flow-through plazma chemical reactor. *Slovak international scientific journal*. 2023. №79. P. 3-9. DOI: 10.5281/zenodo.10480850
19. **Klishchenko R.E.**, Kornienko I.V., Honcharuk V.V. Preparation of carbon micro- and nanomaterials through plasmochemical treatment of wastewater contaminated with Acid Violet 7. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2024. Vol. 46, no. 2. P. 169-175. DOI: 10.3103/S1063455X24020097 Особистий внесок здобувача: *Планування та виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті*.
20. **Klishchenko R.** Influence of submicron carbon obtained by plasmochemical destruction of organics-containing wastewater on the properties of composite water-coal

fuel. *Slovak international scientific journal*. 2024. №80. P. 9-14. DOI: 10.5281/zenodo.10651841

21. Макаров А.С., Шкуткова О.В., **Кліщенко Р.Є.**, Лисенко Л.Л., Косигіна І.М., Зінін В.В., Коновал О.А. Властивості композиційного палива на основі пірокарбону – продукту піролізу шин. *Voprosy khimii I khimicheskoi tekhnologii*. 2024. № 2. P. 61–69. DOI: 10.32434/0321-4095-2024-153-2-61-69. Особистий внесок здобувача: *Планування та виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті. (Q3)*

22. **Klishchenko R.E.** Properties of composite water-coal fuel stabilized with carbon submicron material and amino alcohols. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2024, 32(2). P. 409–416. DOI:10.33609/0041-6045.85.7.2019.49-56.

23. **Klischenko R.Ye.**, Chebotar'ova R.D., Remez S.V. Complex treatment of industrial waste water containing non-ferrous metals. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2024. Vol. 46. P. 506–511. DOI: 10.3103/S1063455X24050060. Особистий внесок здобувача: *Планування та виконання експериментів з електрокінетичного кондиціонування гальванічних шламів. Участь у написанні статті.*

24. Шкуткова О.В., Макаров А.С., **Кліщенко Р.Є.** Вплив гумінових кислот на реологічні властивості композиційних суспензій на основі пірокарбону. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту (Сер. Хімія)*. 2024. № 2, С. 92–98. DOI:10.24144/2414-0260.2024.2.92-99. Особистий внесок здобувача: *Планування та виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, аналіз та інтерпретація результатів, участь у написанні статті.*

25. **Klischenko R.Ye.**, Chebotar'ova R.D., Remez S.V. Study of the kinetics of copper leaching from solid electroplating sludge. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2025. Vol. 47, no. 2. P. 124-130. DOI: 10.3103/S1063455X25020055. Особистий внесок здобувача: *Планування та виконання експериментів з електрокінетичного кондиціонування гальванічних шламів. Участь у написанні статті.*

#### Патенти:

1. Спосіб ремедіації ґрунту Маковецький О.Л., Завгородній В.А., Спасьонова Л.М., Корнілович Б.Ю., **Кліщенко Р.Є.** Пат № 85944. UA, С25С 1/00, С22В 7/00, С22В. Заявл.27.06.2007, опубл.10.03.2009, бюл. № 5.

2. Спосіб вилучення міді зі шламів гальванічного виробництва. **Кліщенко Р.Є.**, Гончарук В. В., Чеботарьова Р. Д. Пат. 89299 UA, С25С 1/00, С22В 7/00, С22В 15/00. Заявл.29.05.2008, опубл. 11.01.2010, бюл. № 1.

3. Склад водовугільної суспензії на основі високосірчистого кам'яного вугілля. Макаров А.С., Єгурнов О.І., Борук С.Д., Савіцький Д.П., **Кліщенко Р.Є.**, Димитрюк Т.М. Пат. на корисну модель. 80611 UA, С10 L 1/32. Заявл.07.11.2012, опубл. 10.06.2013. Бюл. №11.

4. Склад для покриття сонячного колектора та спосіб його нанесення. Макаров А.С., Коновал О.А., **Кліщенко Р.Є.**, Єгурнов О.І., Макарова К.В. Пат. 108908 UA, F24J 2/48, С23С 24/00, С23D 11/00. Заявл.03.06.2013, опубл. 25.06.2015. Бюл. №12.

5. Рідке суспензійне паливо. Макаров А.С., Савіцький Д.П., Сергієнко О.А., Макарова К.В., **Кліщенко Р.Є.**, Лобанов О.Ю. Пат. на корисну модель. 100145 UA, C10 L 1/32. Заявл. 02.02.2015, опубл. 10.07.2015. Бюл. №13.

6. Спосіб відновлення реологічних властивостей некондиційної водовугільної суспензії Макаров А.С., Кузнецов О. С., Лобанов О. Ю., Садовський Д. Ю., Макарова К.В., Савіцький Д.П., **Кліщенко Р.Є.** Пат. на корисну модель 105722 UA, C10 L 1/32. Заявл. 10.12.2014, опубл. 11.04.2016, бюл. № 7.

7. Плазмохімічний реактор для очищення води від органічних речовин. Гончарук В.В., **Кліщенко Р.Є.**, Корнієнко І.В. Пат. на корисну модель. 130092 UA, C02 F 1/46. Заявл.21.05.2018, опубл.26.11.2018, Бюл. №22.

### Тези:

1. Goncharuk V.V., **Klishchenko R.E.**, Kornienko I.V. The use of plasma-chemical technologies in the treatment of organic waste water. 8 th International conference Science and society Methods and problems of practical application 15 th Vancouver, Canada. August 2019. P. 135-138.

2. Макаров А., **Кліщенко Р.**, Корнієнко І., Пахар Т. Порівняння ефективності плазмохімічної деструкції органовмісних стічних вод у коронному розряді та вертикально орієнтованому факелі Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції "Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки", 25-26 жовтня 2022 р. К.: НУХТ, 2022. С. 141-145.

3. **Кліщенко Р.**, Чеботарьова Р., Ремез С. Очищення промивної води гальванічного виробництва від іонів  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}$  і солей жорсткості з використанням завантаження камери знесолення модифікованою катіонообмінною смолою КУ-2. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції "Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки", 25-26 жовтня 2022 р. К.: НУХТ, 2022. С. 128-130.

4. Шкуткова О.В., Макаров А.С., **Кліщенко Р.Є.** Реологічні властивості композиційної суспензії на основі пірокарбону. XXXIX Наукова конференція з біоорганічної хімії та нафтохімії. Біоактивні сполуки, нові речовини і матеріали. Київ: Інтерсервіс, 30 травня 2024 р. С. 241-245.

5. **Кліщенко Р.**, Кобець С. Особливості будови поверхні вугілля різного ступеня метаморфізму. TOPICAL ASPECTS OF MODERN SCIENTIFIC RESEARCH. Proceedings of XII International Scientific and Practical Conference. Tokyo, Japan. 8-10 August 2024. P.50-56.

6. **Кліщенко Р.**, Чеботарьова Р., Ремез С. Вилучення  $\text{Cu}$  зі шламу гальванічного виробництва та електроосадження на електроді Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції "Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки", 14-15 листопада 2024 р. К.: НУХТ, 2024. С. 104-107 [1–6] *Планування та виконання електрокінетичних, плазмохімічних та реологічних експериментів, участь у написанні статей та тез.*

### Додаткові статті:

1. **Клищенко Р.Е.**, Косоруков А.А., Чеботарева Р.Д., Гончарук В.В. Извлечение цветных металлов из шлама гальванического производства. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2010, №2. С. 46–50. Особистий внесок здобувача: *Виконання експериментів з електрокінетичного кондиціонування гальванічних шламів*

2. Макаров А.С., **Клищенко Р.Е.**, Макарова Е.В., Токарев И.И. Влияние поверхностной модификации на электроповерхностные свойства водоугольных суспензий на основе антрацита. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2012. №1. С. 10–15. Особистий внесок здобувача: *Виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті.*

3. Makarov A.S., Boruk S. D., Egurnov A. I., Dimitryuk T. N., **Klishchenko R. E.** Utilization of industrial wastewater in production of coal-water fuel. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2014. Vol. 36, no. 4. P. 333–340. DOI: 10.3103/s1063455x14040055. Особистий внесок здобувача: *Планування та виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті.*

4. Егурнов А.И., Макаров А.С., Макарова Е.В., **Клищенко Р.Е.** Реологические свойства водоугольных суспензий и электрокинетический потенциал частиц антрациту. *Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб.* 2013. Вип. 53 (94). Особистий внесок здобувача: *Виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті.*

5. Макаров А.С., Егурнов А.И., **Клищенко Р.Е.** Электрокинетические свойства ВУТ на основе углей марок А и Т, модифицированных силоксаном. *Уголь Украины*. 2014. №. 7. С. 41–45. Особистий внесок здобувача: *Виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті*

6. Макаров А.С., **Клищенко Р.Е.**, Егурнов А.И., Пахарь Т.А. Водоугольное топливо на основе органосодержащих сточных вод. *Уголь Украины*. 2015. № 1–2. С. 73–78. Особистий внесок здобувача: *Виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті.*

7. Макаров А.С., **Клищенко Р.Е.**, Егурнов А.И., Пахарь Т.А. Свойства водоугольного топлива на основе сточных вод, содержащих органические примеси с добавками электроокисленных углей. *Уголь Украины*. 2016. № 6–7. С. 57–62. Особистий внесок здобувача: *Планування та виконання електрокінетичних та реологічних експериментів, участь у написанні статті.*

## АНОТАЦІЯ

**Кліщенко Р.Є. Колоїдно-хімічні принципи регулювання властивостей концентрованих дисперсних систем у середовищах різної полярності.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора хімічних наук за спеціальністю 02.00.11 – колоїдна хімія. – Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, Київ, 2025.

Дисертація присвячена дослідженню властивостей концентрованих дисперсних систем у середовищах різної полярності з дисперсною фазою на основі вугілля різного ступеня метаморфізму, мікро- та нанокарбонових матеріалів, пірокарбону, глинистих та гальванічних шламів та науковому обґрунтуванні колоїдно-хімічних

принципів регулювання їх властивостей з метою одержання стабільних текучих дисперсних систем із заданими параметрами.

Визначено, що основним фактором забезпечення стабільності та регулювання властивостей високонаповнених плинних дисперсних систем у середовищах різної полярності є формування структурно-механічних бар'єрів унаслідок хімічних та фізико-хімічних взаємодій між компонентами системи: частинками дисперсної фази та дисперсійного середовища. Вперше запропоновано та досліджено способи регулювання властивостей концентрованих плинних дисперсних систем поєднанням добавок реагентів та субмікронних частинок, що значно покращує динамічну стійкість сформованої просторової структури до зовнішніх впливів і є важливим чинником забезпечення стійкості висококонцентрованих дисперсій. Запропоновано та науково обґрунтовано принципи формування плинних композиційних дисперсних систем на основі вугілля різного ступеня метаморфізму за допомогою оптимізації гранулометричного складу для досягнення максимальної концентрації твердої фази.

Встановлено, що електрокінетичний потенціал поверхні частинок дисперсної фази КВП на основі вугілля марок Д, Г, П і антрациту у воді та органомісних дисперсійних середовищах на основі аліфатичних спиртів визначається дисоціацією поверхневих груп вугільної поверхні. Електрокінетичний потенціал поверхні частинок вугілля залежить від діелектричної проникності дисперсійного середовища і у спиртах цей показник є значно нижчим, ніж у воді. Величина  $\xi$ -потенціалу у водноспиртових сумішах не перевищує 30 мВ за абсолютною величиною, що недостатньо для електростатичної стабілізації КВП з широким розподілом розмірів частинок дисперсної фази (1-250 м<sup>б</sup>).

Досліджено можливість використання органомісних дисперсних середовищ на основі стічних вод техногенного походження шляхом плазмохімічної конверсії з одночасним продукуванням субмікронних карбонових частинок. Синергетичний ефект стабілізації, який спостерігається при спільному впливі субмікронних частинок та реагентних добавок, значно поліпшує техніко-експлуатаційні параметри КВП. Вивчено способи кондиціонування та утилізації гальванічних шламів з низькою гідравлічною проникністю.

На основі теоретико-експериментальних досліджень розроблено шляхи розв'язання проблем отримання, стабілізації та регулювання реологічних властивостей концентрованих плинних дисперсних систем у середовищах різної полярності.

**Ключові слова:** концентровані дисперсні системи, вугілля, мікро-нанокарбон, пірокарбон, глинисті мінерали, гальванічні шлами, стабілізація, в'язкість, текучість, седиментація, реологія, електрокінетичний потенціал.

## SUMMARY

**Roman E. Klishchenko. Colloidal-chemical principles of controlling the properties of concentrated dispersed systems in media of different polarity – Manuscript.**

Thesis for a Doctor Sciences degree in the specialty 02.00.11 - Colloidal Chemistry.  
– A.V. Dumansky Institute of Colloid and Water Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

This dissertation focuses on studying the properties of concentrated dispersed systems in media of different polarity. It specifically looks at dispersed phases based on coal of various degrees of metamorphism, micro- and nanocarbon materials, pyrocarbon, clay, and galvanic sludge. The goal is to scientifically establish colloidal-chemical principles for regulating their properties to achieve stable flowing dispersed systems with specified parameters.

It was found that the main factor ensuring the stability and control of the properties of highly filled fluid dispersed systems in media of different polarity is the formation of structural and mechanical barriers due to chemical and physicochemical interactions between the components of the system: particles of the dispersed phase and the dispersion medium. For the first time, methods of regulating the properties of concentrated fluid dispersed systems by combining reagent additives and submicron particles have been proposed and studied, which significantly improves the dynamic stability of the formed spatial structure to external influences and is an essential factor in ensuring the stability of highly concentrated dispersions. The principles of forming fluid composite dispersed systems based on the coal of different degrees of metamorphism by optimizing the particle size distribution to achieve the maximum concentration of the solid phase are proposed and scientifically substantiated.

It was found that the electrokinetic potential of the surface of the particles of the dispersed phase of concentrated aqueous – coal fuel (CACF) based on D, G, P grades coals and anthracite in water and organometallic dispersion media based on aliphatic alcohols is determined by the dissociation of surface groups of the coal surface.  $\xi$  - the surface potential of the coal particles depends on the dielectric constant of the dispersion medium and is much lower in alcohols than in water. The value of the  $\xi$  potential in water-alcohol mixtures does not exceed 30 mV in absolute value, which is insufficient for the electrostatic stabilization of CACF with a wide particle size distribution of the dispersed phase (1-250 m<sup>6</sup>).

The possibility of using organometallic dispersed media based on wastewater of anthropogenic origin by plasmochemical conversion with simultaneous production of submicron carbon particles was investigated. The synergistic effect of stabilisation observed under the combined influence of submicron particles and reagent additives significantly improves the technical and operational parameters of CACF. Methods for the conditioning and utilisation of galvanic sludge with low hydraulic permeability were studied.

Based on theoretical and experimental studies, ways to solve the problems of obtaining, stabilizing, and regulating the rheological properties of concentrated fluid dispersed systems in media of different polarities was developed.

**Keywords:** concentrated dispersed systems, coal, micro-nanocarbon, pyrocarbon, clay minerals, galvanic sludge, stabilization, viscosity, fluidity, sedimentation, rheology, electrokinetic potential.