



УДК 622.765:66.065.5  
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.15.2026.26>

## ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТА РОЗМІРУ ТВЕРДОЇ ФАЗИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФЛОКУЛЯЦІЇ ТА СЕДИМЕНТАЦІЇ ТОНКОДИСПЕРСНИХ ЗАВИСЛИХ ЧАСТОК ВУГІЛЬНИХ ШЛАМІВ

С. С. Кулініч<sup>1</sup>, А. О. Шкоп<sup>2</sup>, А. С. Босюк<sup>3</sup>, О. В. Шестопапов<sup>4</sup>, І. О. Лаврова<sup>5</sup>

*Представлено результати досліджень впливу концентрації твердої фази та присутності грубо-дисперсної фракції на ефективність флокуляції й седиментації тонкодисперсних завислих часток у вугільних шламах вуглезбагачувальних фабрик. Використано реальні проби рідких відходів із концентрацією твердої фази 13–48 г/л, де частка тонкодисперсних часток (<20 мкм) становить 77–79 %. Гранулометричний аналіз проведено методом мокрого просіювання, кінетику седиментації досліджено в мірних циліндрах об'ємом 500 мл при 19 °С. Встановлено, що при низьких концентраціях (~13 г/л) переважає вільне осідання з початковою швидкістю до 0,14 мм/с без чіткої межі розділу фаз. При концентраціях понад 48 г/л одразу формується чітка межа, процес*

<sup>1</sup> здобувач наукового ступеня доктора філософії  
кафедри хімічної техніки та промислової екології  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: serhii.kulinich@mit.khpi.edu.ua  
ORCID: 0009-0004-2018-5855

<sup>2</sup> кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: Andrii.Shkop@mit.khpi.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-1974-0290

<sup>3</sup> доктор філософії,  
старший викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: Alona.Bosiuk@mit.khpi.edu.ua  
ORCID: 0000-0001-5254-2272

<sup>4</sup> кандидат технічних наук, професор,  
завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: oleksii.shestopalov@khpi.edu.ua  
ORCID: 0000-0001-6268-8638

<sup>5</sup> кандидат технічних наук, доцент,  
професор кафедри технології переробки нафти, газу та твердого палива  
(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків)  
e-mail: Inna.Lavrova@khpi.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-3970-1627

переходить до стисненого осідання зі швидкістю 0,01–0,013 мм/с. Максимальна швидкість осідання досягається при 40–80 г/л. Досліджено вплив додавання грубодисперсної фракції (>0,1 мм) на флокуляцію з використанням аніонного (А-19), неіоногенного (ТФН) та катіонного (Zetag 8185) флокулянтів. Введення 6–30 г/л грубодисперсних часток підвищує швидкість седиментації флокул з 3,2 до 18 мм/с і міцність агрегатів (швидкість після руйнування – від 0,04 до 3,8 мм/с). Грубодисперсна фаза сприяє утворенню більших і важчих флокул, що зменшує витрати флокулянтів та підвищує стійкість до гідродинамічних впливів. Отримані результати свідчать про доцільність підготовки шламів перед флокуляцією шляхом регулювання концентрації твердої фази (розбавлення або змішування потоків) та введення грубодисперсної фракції. Це дає змогу оптимізувати процеси очищення стічних вод у відстійниках, зменшити витрати реагентів, підвищити ступінь освітлення води та інтенсифікувати зневоднення шламів. Запропоновані підходи можуть бути впроваджені на промислових підприємствах для підвищення екологічної та економічної ефективності водно-шламових схем вуглезбагачення.

**Ключові слова:** вугільні шлами, тонкодисперсні частки, седиментація суспензій, грубодисперсна фаза, кінетика осідання, очищення стічних вод.

## THE EFFECT OF CONCENTRATION AND SIZE OF THE SOLID PHASE ON THE EFFICIENCY OF FLOCCULATION AND SEDIMENTATION OF FINELY DISPERSED SUSPENDED PARTICLES IN COAL SLUDGE

S. S. Kulinich, A. O. Shkop, A. S. Bosiuk, O. V. Shestopalov, I. O. Lavrova

The results of studies on the influence of solid phase concentration and the presence of coarse-grained fraction on the efficiency of flocculation and sedimentation of finely dispersed suspended particles in coal sludge from coal preparation plants are presented. Real samples of liquid waste with a solid phase concentration of 13–48 g/l were used, where the proportion of finely dispersed particles (<20 μm) is 77–79%. The granulometric analysis was carried out by wet sieving, and the sedimentation kinetics were studied in 500 ml measuring cylinders at 19°C. It was found that at low concentrations (~13 g/l), free sedimentation prevails with an initial rate of up to 0.14 mm/s without a clear phase boundary. At concentrations above 48 g/l, a clear boundary is immediately formed, and the process transitions to hindered sedimentation at a rate of 0.01–0.013 mm/s. The maximum sedimentation rate is achieved at 40–80 g/l. The effect of adding coarse-grained fraction (>0.1 mm) on flocculation using anionic (A-19), non-ionic (TFN) and cationic (Zetag 8185) flocculants was investigated. The introduction of 6–30 g/l of coarse particles increases the sedimentation rate of flocs from 3.2 to 18 mm/s and the strength of aggregates (speed after destruction — from 0.04 to 3.8 mm/s). The coarse-dispersed phase promotes the formation of larger and heavier flocs, which reduces flocculant consumption and increases resistance to hydrodynamic influences. The results obtained indicate the advisability of preparing sludge prior to flocculation by adjusting the concentration of the solid phase (dilution or mixing of flows) and introducing a coarse fraction. This makes it possible to optimise wastewater treatment processes in settling tanks, reduce reagent consumption, improve water clarification and intensify sludge dewatering. The proposed approaches can be implemented at industrial enterprises to improve the environmental and economic efficiency of water-sludge coal preparation schemes.

**Key words:** coal sludge, fine particles, sedimentation of suspensions, coarse phase, sedimentation kinetics, wastewater treatment.

### Вступ

Інтенсивний розвиток гірничодобувної та вуглезбагачувальної промисловості супроводжується утворенням значних обсягів стічних вод, що містять тонкодисперсні завислі частки вугільних шламів (Khazaie et al., 2022; Yuan et al., 2025). Ці шламіві води характеризуються високою стійкістю суспензій, коливаннями концентрації твердої фази та складним гранулометричним складом (Wang et al., 2020), де переважають частки розміром менше 20 мкм. Традиційні

методи гравітаційного відстоювання часто виявляються недостатньо ефективними через повільну седиментацію тонкодисперсних часток, що призводить до перевитрат флокулянтів, низької якості освітленої води та накопичення шламів у накопичувачах.

Оптимізація процесів флокуляції та седиментації є ключовим напрямком для інтенсифікації очищення стічних вод вуглезбагачення (Shkop et al., 2016; Shkop et al., 2017). Дослідження показують, що ефективність цих процесів суттєво залежить від

концентрації твердої фази, яка впливає на перехід від вільного до стисненого (зонного) осідання, а також від присутності грубодисперсної фракції, що сприяє утворенню міцніших і важчих флокул (Li et al., 2016). Введення грубодисперсних часток дозволяє зменшити дозування флокулянтів і підвищити стійкість агрегатів до гідродинамічних впливів.

Як правило, забрудненні стічні води для очищення від механічних домішок на підприємствах потрапляють у відстійні споруди для часткового освітлення води в процесі седиментації твердих часток. Освітлена вода повертається у замкнений цикл, а осаджені шлами прямують на подальше очищення та зневоднення з використанням хімічних реагентів (коагулянтів або флокулянтів) (Wei et al., 2018). Однак, у виробничих умовах виникають певні труднощі через коливання концентрації забруднюючих речовин у стічній воді протягом короткого часу. Збільшення або зменшення концентрації твердої фази призводить до зміни якості відстоювання та кількості освітленої води. Хімічне підсилення процесу агрегації з використанням флокулянтів також сильно залежить від концентрації твердої фази. Саме тому, дослідження особливостей осідання твердої фази є актуальними та потребує розробки певної методології, яка дозволить оптимізувати процес очищення стічної води.

Інтенсивна промислова діяльність у хімічній, металургійній та гірничодобувній галузях утворює значну кількість полідисперсних суспензій та шламів із завислими речовинами. Промислові стічні води становлять до 20% глобального забруднення водних ресурсів, а накопичення шламів у шламонакопичувачах призводить до втрати мінеральних компонентів і забруднення ґрунтів, вод та атмосфери (World bank, 2023; United Nations, 2024). В Україні промисловість щорічно генерує мільйони тонн шламів, які спричиняють засолення земель і забруднення ґрунтових вод (Міндовкілля, 2023). Це ускладнює досягнення ЦСР 6 (забезпечення доступності та сталого управління водними ресурсами та санітарією) і ЦСР 12 (забезпечення переходу до раціональних моделей споживання і виробництва) (United Nations, 2025).

Сучасні методи очищення стічних вод на промислових підприємствах України включають фізичні (седиментація, фільтрація, центрифугування), хімічні (коагуляція, флокуляція) та комбіновані підходи. У металургії застосовують седиментацію для вида-

лення грубих часток і хімічну преципітацію (процес утворення осаду з розчину) для осадження металів (Genesis ..., 2024).

Оптимізація коагуляції та флокуляції забезпечує видалення завислих речовин з мінімальними витратами реагентів (Mahapatra ..., 2025). Ефективність залежить від концентрації часток (10–30 г/л), їх розміру, рН, в'язкості та розчинених сполук. На очисних спорудах ці фактори часто не враховуються, що знижує ефективність при зміні параметрів стоків. Однак, дозволяє зменшити витрати реагентів на 20–30% і підвищити осадження (Martin et al., 2011; Gökçek ..., 2020). Для промислових шламів, оптимальна концентрація твердої фази становить 10–30 г/л, де флокуляція відбувається найефективніше, а швидкість руху рідини до відстійників понад 1–1,5 м/с призводить до руйнування флокул (Shestopalov et al., 2019a). Тонкодисперсні частки важче вловлювати, тому потрібна підготовка шламів (розбавлення, додавання грубодисперсної фази, синергія реагентів). Утилізація осаду як наповнювачів композитів (45–60% мас.) зменшує екологічне навантаження (Shestopalov et al., 2019b).

Існуючі аналоги, такі як модулі очищення від компаній Veolia, використовують стандартні ланцюги апаратів (відстійники, центрифуги) з ручним регулюванням, що призводить до перевитрат реагентів (до 20–30%) і низької адаптивності до змін концентрації шламів (Veolia ..., 2025). На відміну від них, запропонований проєкт вводить модульні установки з автоматичним управлінням, математичним моделюванням залежностей (швидкість осідання флокул, вологість осаду) і оптимізацією гідродинамічних параметрів, забезпечуючи мінімальні витрати флокулянтів ( $Q \rightarrow \min$ ) і підвищення ефективності затримання твердої фази до 98–99%. Це дозволяє інтегрувати систему в замкнуті цикли оборотного водопостачання, зменшуючи втрати води на 40% і сприяючи утилізації шламів (Shestopalov et al., 2020).

Метою проведених досліджень є визначення впливу концентрації твердої фази та домішок грубодисперсної твердої фази на ефективність седиментації тонкодисперсних завислих часток з використанням флокулянтів. Це потрібно для інтенсифікації осідання тонкодисперсних часток рідких відходів та стічних вод при використанні флокулянтів, а також мінімізації їх витрати.

Для досягнення зазначеної мети потрібно було вирішити наступні задачі:

- дослідити дисперсний склад рідких відходів вуглезбагачення;
- дослідити кінетику осідання твердої фази різної концентрації;
- дослідити вплив грубодисперсної фази на флокуляцію тонкодисперсної фази.

#### Матеріал і методи

Дане дослідження проводилось з реальними пробами рідких відходів вуглезбагачувальної фабрики, які поступають у радіальний згущувач кінцевого етапу водно-шламової схеми. Для аналізу були відібрані три проби шламу, які відрізнялись вмістом твердої фази за концентрацією:

Зразок 1 – живлення радіального згущувача;

Зразок 2 – згущений продукт радіального згущувача;

Зразок 3 – живлення гвинтових сепараторів вуглезбагачувальної фабрики.

Для досліджуваних зразків проводилося наступні досліді:

- визначення густини рідких відходів шляхом зважування 1 дм<sup>3</sup> зразків відходів;

- визначення вмісту твердої фази в пробі шляхом висушування проби до постійної маси в сушильній шафі;

- гранулометричний аналіз методом мокрого просіювання через віброрито ВА-В01 з розміром отворів 1,0; 0,5; 0,3; 0,2; 0,1; 0,063; 0,04; 0,02 мм;

- дослідження кінетики седиментації проб шляхом осадження твердих часток у полі земного тяжіння в мірільних циліндрах об'ємом 500 мл при температурі 19°C з різним ступенем розбавлення за швидкістю;

- тестова флокуляція зразків шламу (підбір дозування флокулянту з визначенням швидкості осадження флокул) шляхом введення певної дози флокулянту та грубодисперсних часток у мірільний циліндр об'ємом 500 мл;

- випробування міцності флокул шляхом перемішування протягом 40 секунд мішалкою з визначенням швидкості осадження флокул після подрібнення.

При дослідженнях швидкості осідання часток визначали швидкість руху межі розділу фаз (рис. 1).

Слід зазначити, що при осіданні завислих часток з низькою концентрацією межа фаз не є чіткою, однак під час згущення і початку стисненого осідання вона має чіткі межі.

#### Результати та їх обговорення

Аналіз результатів визначення гранулометричного розміру часток шламів (табл. 1)

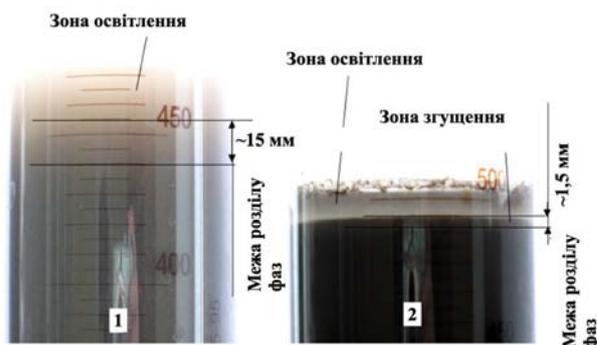


Рис. 1. Порівняльна характеристика руху межі розділу фаз в процесі відстоювання зразків № 1 та № 2

показав, що зразки №1 та №2 мають майже однаковий склад: тонких фракцій (частинки менше 20 мкм) приблизно 80 % та близько 9 % (частинки від 20 мкм до 40 мкм) та зернисті частинки більше 40 мкм близько 10 %. Однак, зразки №1 та №2 відрізняються концентрацією твердої фази майже в 3 рази, що є характерним для діючих підприємств. Коливання концентрації твердої фази може призводити до зменшення ефективності освітлення води у відстійних спорудах та вплинути на час очищення або ризик скиду недоочищеної (недоосвітленої мутної води) води, забрудненої тонкодисперсними завислими частинками. Зразок №3 має в своєму складі переважно грубодисперсні частинки, які відокремлюються до відстійників.

Аналіз результатів кінетики відстоювання завислих часток зразків № 1 та № 2 стічних вод вуглезбагачення в полі земного тяжіння (табл. 2) та рис. 1–4 свідчить про суттєві відмінності у відстоюванні зразків проб № 1 та № 2 різної концентрації.

Зразок № 1 з меншою концентрацією, на відміну від зразка № 2 (рис. 1), перші 25 хвилин відстоювання не мав чіткої межі розділу фаз між освітленою рідиною та забрудненою частиною води. Відсутність чіткого розмежування між брудною та освітленою водою, свідчить про вільне осадження часток, без перешкод з боку інших часток. Однак, під час осідання відбувається згущення суспензії і при досягненні певної концентрації твердої фази починається обмежене осідання частинок. Цей період характеризується тим, що частинки стикаються між собою, гальмуючи одна одну. Крім того, частинки в суспензії мають різні розміри, тому крупніші та більш важкі

Таблиця 1

Гранулометричний аналіз зразків шламу

Найменування параметру Розмір часток суспензії, мм	Зразок №1		Зразок №2		Зразок №3	
	Вихід за масою, г	Частка, %	Вихід за масою, г	Частка, %	Вихід за масою, г	Частка, %
Більше 1	-	-	-	-	9,2	2,2
1-0,5	0,04	0,3	0,04	0,1	20,8	5,1
0,5-0,3	0,10	0,7	0,2	0,4	31,6	7,8
0,3-0,2	0,40	3,0	0,8	1,7	56	13,8
0,2-0,1	0,40	3,0	2	4,2	133,4	33,0
0,1-0,063	0,40	3,0	1,1	2,3	71,6	17,7
0,063-0,04	0,40	3,0	2,3	4,8	44,6	11,0
0,04-0,02	1,10	8,1	4,5	9,4	17,2	4,3
< 0,02	10,7	79,0	37,1	77,2	20,1	5,0
Вміст твердої фази в 1 л	13,54	100,0	48,04	100,0	404,5	100,0
Густина проб, г/л	1015,25		1034,45		1339,95	

Таблиця 2

Кінетика відстоювання зразків шламу

Проба 1 (13,2 г/л)			Проба 2 (48,04 г/л)		
Час відстоювання, хвилин	Висота освітленого шару, мм	Швидкість осадження (згущення), мм/с	Час відстоювання, хвилин	Висота освітленого шару, мм	Швидкість осадження (згущення), мм/с
4	23	0,0958	10	4	0,007
7	42	0,1000	25	14	0,0093
10	72,5	0,1208	35	22	0,0105
15	122	0,1355	47	32,5	0,0113
20	172	0,1433	56	41	0,0122
<b>25</b>	<b>204</b>	<b>0,136</b>	68	51	0,0125
30	213	0,1183	75	57	0,0127
35	220	0,1047	85	66	0,0129
40	223,5	0,0931	95	75,5	0,0132
45	226	0,0837	105	84,5	0,0134
57	230	0,0672	115	93	0,0134
100	238	0,0397	129	107	0,0138
156	242	0,0258	136	113	0,0138
1500	243	0,0005	145	121	0,0139
			156	127	0,0135
			165	129,5	0,0131
			175	132	0,0126
			185	134	0,0121
			239	139	0,0097
			1121	171	0,0025
			1208	173,5	0,0024
			1317	176	0,0022
			1416	177,5	0,0021
			1595	180	0,0018

частинки осідають швидше, але витісняють шари води, яка рухається догори та перешкоджає осідати дрібнішим частинкам. Під час стисненого (зонного) осідання починає візуально спостерігатись чіткіша межа розділу фаз.

Зразок № 2 з концентрацією більше 48 г/л одразу на перших хвилинах вже має чітку межу розділу фаз і освітлена частина води є більш прозорою. Під час обмеженого осідання часток освітлення рідина є більш прозорою завдяки тому, що згруповані час-

тинки захоплюють та осаджують дрібнодисперсну фазу.

Рух межі розділу фаз при стисненому осіданні має майже лінійну динаміку (рис. 2–4), що в цілому свідчить, що при концентрації більше 50 г/л освітлення рідини, згущення шламу та ущільнення осаду має майже однакову швидкість. Однак, між межею розділу фаз і дном мірального циліндру можна також спостерігати нерівномірне осадження крупніших часток, висхідні потоки рідини з тонкодисперсною фазою, яка витісняється при ущільненні осаду.

Аналіз рис. 2 та рис. 3 свідчить, що швидкість вільного осідання, яке спостерігається при низьких концентраціях, суттєво вище, ніж у концентрованих розчинів. Це спостереження може бути використане при підготовці стічної води для розділення гравітаційними методами у відстійниках. Іноді можливо знизити концентрації шляхом розбавлення стічної води або змішати рідинні потоки для прискорення процесу освітлення.

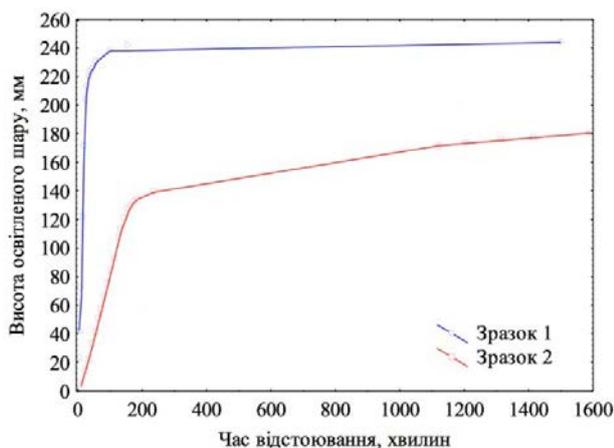


Рис. 2. Залежність висоти освітлення від часу відстоювання

З плином часу відбувається згущення суспензії і зростання концентрації у не освітленій частині мірального циліндру (рис. 4). Це призводить до постійної зміни концентрації (наростання концентрації) в процесі осадження часток і переходу від вільного осідання до обмеженого (зонного), а потім і ущільнення осаду. Швидкість осадження твердої дрібнодисперсної фази в суспензії (швидкість освітлення) залежить від вихідної концентрації твердої фази, а максимальне значення швидкості осадження досягається при усередненій концентрації твердої фази 40–50 г/л в пробі 1, а в пробі 2 максимальне

значення швидкості осадження досягається при усередненій концентрації твердої фази 70–80 г/л (рис. 4).

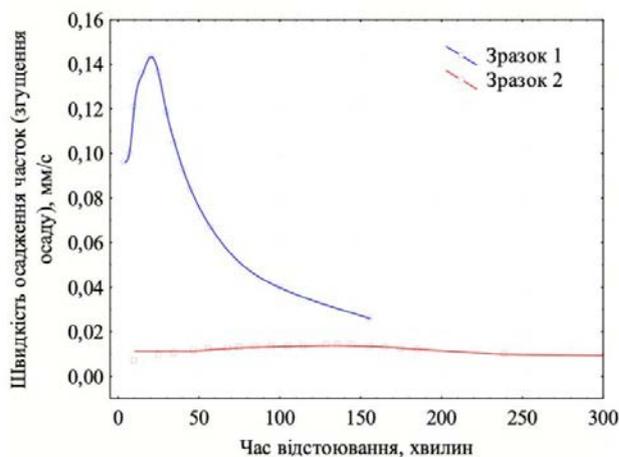


Рис. 3. Залежність швидкості осадження часток від часу відстоювання

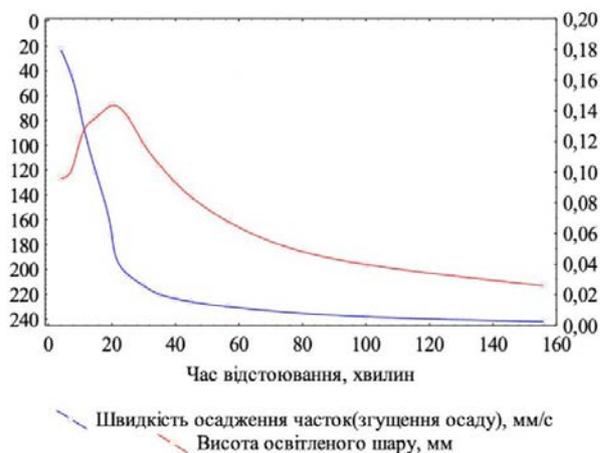


Рис. 4. Залежність висоти освітлення та швидкості осадження часток від часу відстоювання

Однак, слід відзначити, що навіть при низькій концентрації з плином часу відбувається згущення суспензії та зростання концентрації. Це призводить до переходу від вільного до стисненого (обмеженого) осідання часток, уповільнення швидкості осідання. Цей факт не завжди враховується у відстійних очисних спорудах і потребує корекції при розрахунку часу відстоювання. Порівняльний аналіз зміни зон та перехід від вільного осідання до стисненого, в залежності від зміни швидкості руху межі розділу фаз, наведено на рис. 4. Таким чином, дослідження кінетики осідання часток під час вибору способу очищення води та проектування очисних споруд дозво-

ляє визначити такі параметри, як висоту освітленого шару зони вільного осідання; концентрацію твердої фази, за якої відбувається перехід до стисненого осідання; час початку ущільнення осаду. Ці параметри важливі для роботи відстійних споруд (відстійників) в безперервному режимі для визначення часу перебування рідини та відсоткового обсягу відведення освітленої води, згущеного шלאму та осаду.

Наступним етапом досліджень було визначення впливу розміру часток на агрегатоутворення в процесі флокуляції. Для проведення досліду використовували пробу шלאму (Зразок № 2) з вихідною концентрацією 48 г/л, в який додавалась проба зернистого шלאму (Зразок № 3) для привнесення грубодисперсних часток в кількості по 6 г/л.

Під час експерименту використовували аніонний флокулянт А-19, неіоногенний флокулянт ТФН та катіонний флокулянт Zetag 8185 з концентрацією 0,05 %. Досліди із флокуляції проводилися наступним чином: спочатку дозувався флокулянт в пробу, перемішували і визначали швидкість осадження часток. Після цього сфлокульовану пробу перевіряли на міцність агрегатів – піддавали впливу мішалки протягом 30 с і 60 с, а потім після перемішування фіксувалась швидкість осадження за вже описаною методикою (Shkor et al., 2016; Shkor et al., 2017). Причому в пробі 1 швидкість осадження фіксувалась, коли була помітна чітка межа розділу фаз по висоті водяного стовпа (в середньому межа розділу фаз з'являлася на 7–8 с при висоті освітленого шару 110 мм), аналогічна картина спостерігалася і після впливу мішалки, руйнуючої флокули. Результати дослідження наведені в табл. 3 та рис. 5.

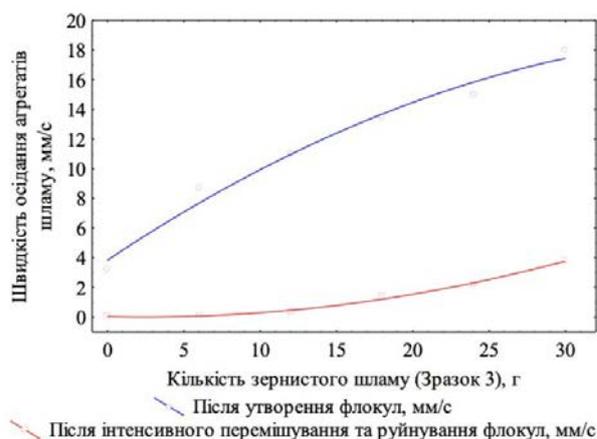


Рис. 5. Залежність швидкості осадження часток в процесі флокуляції від кількості зернистого шלאму

Аналіз результатів флокуляції свідчить, що введення грубодисперсного шלאму інтенсифікує седиментацію флокул, які утворюються і підвищують їх міцність. Візуальні спостереження свідчать, що введення додаткових грубодисперсних часток призводить до утворення більших за розміром флокул. Окрім того, введення грубодисперсних часток сприяє збільшенню ваги флокул і може бути напрямком для зменшення витрати флокулянтів.

#### Висновки

1. Порівняльний аналіз кінетики осідання проб 1 та 2 однакового гранулометричного складу, але різної концентрації показав, що процеси осідання часток мають різну динаміку, зони та швидкість осідання води. Під час згущення при концентрації близько 50 г/л відбувається стиснене осідання і з'являється межа розділу фаз, що призводить до суттєвого уповільнення процесу. За цей час приблизно 2/3 висоти об'єму води освітлюється. Це може бути

Таблиця 3

Результати флокуляції зразків шלאму

Вміст твердої фази в пробі, г/л	Домішки		Швидкість осадження флокул, мм/с	
	Зернистий шלאм гвинтових сепараторів, г	Кількість флокулянту (розчин 0,05 %), г/т	Після флокуляції	Після інтенсивного перемішування
48	0	320*	3,2	0,04
54	6	300	8,75	0,09
60	12	280	11	0,33
66	18	260	13,5	1,4
72	24	240	15	2,2
78	30	220	18	3,8

Примітка: флокулянт подавався трьома порціями: неіоногенний флокулянт ТФН-3 в кількості 80 г/т, аніонний А-19 в кількості 160 г/т, катіонний Zetag 8185 в кількості 80 г/т.

враховано при очищенні води у відстійних спорудах як засіб швидкого відстоювання та відведення основної частини води слабоконцентрованих суспензій. З іншого боку, саме розбавлення концентрованих шламів перед відстоюванням може сприяти більш швидкому осадженню тонкодисперсних часток за рахунок їх вільного осідання.

2. Дослідження результатів порівняльної флокуляції зразків стічної води із введенням додаткової грубодисперсної фази дозволяє зробити висновки, що тонкодисперсні частки

без додавання зернистого шламу мають більшу витрату флокулянта, а утворені флокули меншу міцність до механічного впливу. Тому при проведенні флокуляції може бути раціональним підготовка стічної води шляхом введення додаткових грубодисперсних часток, які сприятимуть збільшенню ваги флокул та проведенню процесу очищення стічної води із мінімальною витратою флокулянта. Наявність грубодисперсних часток сприяє утворенню міцних агрегатів для подальшого транспортування та зневоднення.

### Список використаної літератури

Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України (Міндовкілля). Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні за 2023 рік. [Електронний ресурс]. URL: <https://mepg.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnuj-monitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovysnha-v-ukrayini/> (дата звернення 20.12.2025)

Genesis Water Tech. Innovative Solutions for Treating Wastewater from Mining Operations. 2024. [Електронний ресурс]. URL: <https://genesiswatertech.com/blog-post/solutions-for-treating-wastewater-from-mining-operations/> (дата звернення 20.12.2025)

Gökçek Ö.B., Özdemir S. Optimization of the Coagulation–Flocculation Process for Slaughterhouse Wastewater Using Response Surface Methodology. *CLEAN – Soil, Air, Water*. 2020. Vol. 48(7–8). Portico. <https://doi.org/10.1002/clen.202000033>

Khazaie A., Mazarji M., Samali B., Osborne D., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Soldatov A. A Review on Coagulation/Flocculation in Dewatering of Coal Slurry. *Water*. 2022. Vol. 14(6). P. 918. <https://doi.org/10.3390/w14060918>

Li S., Wang X., Zhang Q. Dynamic experiments on flocculation and sedimentation of argillized ultrafine tailings using fly-ash-based magnetic coagulant. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26(7). P. 1975–1984. URL: [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(16\)64308-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(16)64308-x)

Mahapatra S.S., Vishwanathan A.S. Improving the Efficiency and Turnover of a Domestic Wastewater Treatment Plant Using Coagulation–Flocculation. *Water and Environment Journal*. 2025. Vol. 40, Issue 1. pp. 153–166. <https://doi.org/10.1111/wej.70020>

Martín M.A., González I., Berrios M., Siles J.A., Martín A. Optimization of coagulation–flocculation process for wastewater derived from sauce manufacturing using factorial design of experiments. *Chemical Engineering Journal*. 2011. Vol. 172(2–3). P. 771–782. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.06.060>

Shestopalov O., Briankin O., Lebedev V., Troshin O., Muradian A., Ocheretna V., Yaremenko N. Identifying the properties of epoxy composites filled with the solid phase of wastes from metal enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019b. Vol. 6(10). P. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186050>

Shestopalov O., Briankin O., Rykusova N., Hetta O., Raiko V., Tseitlin M. Optimization of floccular cleaning and drainage of thin dispersed sludges. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. Vol. 3. P. 75–86. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001239>

Shestopalov O., Briankin O., Tseitlin M., Raiko V., Hetta O. Studying patterns in the flocculation of sludges from wet gas treatment in metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019a. Vol. 5(10). P. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181300>

Shkop A., Tseitlin M., Shestopalov O. Exploring the ways to intensify the dewatering process of polydisperse suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6(10 (84)). P. 35–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86085>

Shkop A., Tseitlin M., Shestopalov O., Raiko V. Study of the strength of flocculated structures of polydispersed coal suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1(10 (85)). P. 20–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91031>

United Nations. The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace. 2024. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024> (дата звернення 20.12.2025)

United Nations. Sustainable Development Goals Report. 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/> (дата звернення 20.12.2025)

Veolia Water Technologies. Industrial Wastewater Treatment Solutions. 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.veoliawatertech.com/en/expertise/applications/industrial-wastewater-treatment> (дата звернення 20.12.2025)

Wang S., Song X., Wang X., Chen Q., Qin J., Ke, Y. Influence of coarse tailings on flocculation settlement. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020. Vol. 27(8). P. 1065–1074. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1948-9>

Wei H., Gao B., Ren J., Li A., Yang H. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. *Water Research*. 2018. Vol. 143. P. 608–631. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029>

World Bank. Water in Circular Economy and Resilience. 2023. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/wicer> (дата звернення 20.12.2025)

Yuan J., Liu R., Jiang H., Duan C., Wang H., Wen D., Huang, L. Synergistic regulation mechanism and optimization research of coal slurry flocculation flotation and sedimentation dewatering. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2025. P. 1–37. <https://doi.org/10.1080/19392699.2025.2526565>

### References

Ministerstvo zakhystu dovykillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (Mindovkillia). Rehionalni dopovidi pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini za 2023 rik. [Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine (Ministry of Environment). Regional reports on the state of the environment in Ukraine for 2023]. [Electronic resource]. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnoho-seredovyshcha-v-ukrayini/> (access date 20.12.2025) [in Ukrainian].

Genesis Water Tech. Innovative Solutions for Treating Wastewater from Mining Operations. 2024. [Electronic resource]. <https://genesiswatertech.com/blog-post/solutions-for-treating-wastewater-from-mining-operations/> (access date 20.12.2025) [in English].

Gökçek, Ö.B. & Özdemir, S. (2020). Optimization of the Coagulation–Flocculation Process for Slaughterhouse Wastewater Using Response Surface Methodology. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 48(7–8). <https://doi.org/10.1002/clen.202000033> [in English].

Khazaie, A., Mazarji, M., Samali, B., Osborne, D., Minkina, T., Sushkova, S., Mandzhieva, S. & Soldatov, A. A (2022). Review on Coagulation/Flocculation in Dewatering of Coal Slurry. *Water*, 14(6), 918. <https://doi.org/10.3390/w14060918> [in English].

Li, S., Wang, X., & Zhang Q. (2016). Dynamic experiments on flocculation and sedimentation of argillized ultrafine tailings using fly-ash-based magnetic coagulant. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(7), 1975–1984. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(16\)64308-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(16)64308-x) [in English].

Mahapatra, S.S., & Vishwanathan, A.S. (2025). Improving the Efficiency and Turnover of a Domestic Wastewater Treatment Plant Using Coagulation–Flocculation. *Water and Environment Journal*, Vol. 40, Issue 1, 153–166. <https://doi.org/10.1111/wej.70020> [in English].

Martín, M.A., González, I., Berríos, M., Siles, J.A., & Martín A. (2011). Optimization of coagulation–flocculation process for wastewater derived from sauce manufacturing using factorial design of experiments. *Chemical Engineering Journal*. 172(2–3), 771–782. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.06.060> [in English].

Shestopalov, O., Briankin, O., Lebedev, V., Troshin, O., Muradian, A., Ocheretna, V. & Yaremenko N. (2019). Identifying the properties of epoxy composites filled with the solid phase of wastes from metal enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186050> [in English].

Shestopalov, O., Briankin, O., Rykusova, N., Hetta O., Raiko, V. & Tseitlin, M. (2020). Optimization of floccular cleaning and drainage of thin dispersed sludges. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 75–86. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001239> [in English].

Shestopalov, O., Briankin, O., Tseitlin, M., Raiko, V., & Hetta, O. (2019). Studying patterns in the flocculation of sludges from wet gas treatment in metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181300> [in English].

Shkop, A., Tseitlin, M., & Shestopalov, O. (2016). Exploring the ways to intensify the dewatering process of polydisperse suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10(84)), 35–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86085> [in English].

Shkop, A., Tseitlin, M., Shestopalov, O., & Raiko, V. (2017). Study of the strength of flocculated structures of polydispersed coal suspensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10 (85)), 20–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91031> [in English].

United Nations. The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace. [Electronic resource]. URL: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024> (access date 20.12.2025) [in English].

United Nations. Sustainable Development Goals Report (2025). [Електронний ресурс]. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/> (дата звернення 20.12.2025)

Veolia Water Technologies. Industrial Wastewater Treatment Solutions. [Electronic resource]. URL: <https://www.veoliawatertech.com/en/expertise/applications/industrial-wastewater-treatment> (access date 20.12.2025) [in English].

Wang, S., Song, X., Wang, X., Chen, Q., Qin, J., & Ke, Y. (2020). Influence of coarse tailings on flocculation settlement. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(8), 1065–1074. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1948-9> [in English].

Wei, H., Gao, B., Ren, J., Li, A., & Yang, H. (2018). Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. *Water Research*, 143, 608–631. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029> [in English].

World Bank. Water in Circular Economy and Resilience (2023). [Electronic resource]. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/wicer> (access date 20.12.2025) [in English].

Yuan, J., Liu, R., Jiang, H., Duan, C., Wang, H., Wen, D., & Huang, L. (2025). Synergistic regulation mechanism and optimization research of coal slurry flocculation flotation and sedimentation dewatering. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1–37. <https://doi.org/10.1080/19392699.2025.2526565> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 24.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.03.2026

Стаття поширюється на умовах  
ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

