

А. О. Шкоп, к. техн. н, докторант, О. В. Шестопалов, к. техн.н., доцент,  
Н. Г. Пономарьова, к. техн. н, доцент, А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач,  
Д. М. Войтенко, аспірант, С. С. Кулініч, аспірант

## ФЛОКУЛЯЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ ШАХТНИХ ВОД ВІД ТОНКОДИСПЕРСНИХ ЗАВИСЛИХ ЧАСТОК

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Ключові слова:** шахтні води, флокуляція, тонкодисперсні завислі частки, зернистий шлам, модуль очищення, екологічна безпека.

**Вступ.** Шахтні води є одним із найважливіших факторів, що впливають на екологічний стан довкілля в регіонах гірничодобувної діяльності. Вони утворюються внаслідок контакту ґрунтових, підземних і техногенних вод із породами та відходами шахтного виробництва, в результаті чого набувають специфічного хімічного складу. Шахтні води зазвичай характеризуються високим вмістом розчинених солей, зважених часток, токсичних елементів, важких металів, а також органічних і неорганічних сполук.

Україна входить до числа провідних країн світу за обсягами запасів природних ресурсів, зокрема вугілля, залізних, марганцевих, титанових руд та ін. У глобальному масштабі на території України зосереджено близько 7,5 % світових запасів вугілля, 15 % залізних руд і 42,8 % марганцевих руд. Основні поклади вугілля розташовані у Донецькому, Львівсько-Волинському та Дніпровському басейнах. Найбільша частка вугільних запасів – 87 % зосереджена в Донецькому басейні, тоді як у Львівсько-Волинському і Дніпровському басейнах міститься лише 2 % і 3,5 % відповідно [1].

На сучасному етапі розвитку гірничодобувної промисловості особливого значення набуває розробка і впровадження ефективних технологій очищення шахтних вод. Ці технології мають забезпечувати зниження негативного впливу на довкілля та відповідати вимогам сталого розвитку. Особливу увагу заслуговують інноваційні підходи, такі як застосування флокулянтів для видалення тонкодисперсних часток, які значно підвищують ефективність очищення та мінімізують екологічні ризики. У цьому контексті перспективними є технології, які базуються на принципі селективної флокуляції. Цей процес дозволяє не лише зменшити витрати реагентів, але й забезпечити високу селективність видалення часток, зосереджених у тонкодисперсній фракції [2].

**Постановка проблеми.** Тонкодисперсні завислі частки становлять значну проблему через їхню властивість тривалий час залишатися у воді у завислому стані. Їхній розмір, висока питома поверхня та низька швидкість осадження ускладнюють їхнє видалення традиційними методами очищення, такими як механічне осадження чи фільтрація. Більше того, тонкодисперсні частки часто є носіями адсорбованих токсичних речовин, що підвищує їхній негативний вплив на довкілля.

Розробка ефективних методів очищення шахтних вод потребує науково обґрунтованих підходів до вирішення таких завдань:

– вибір та оптимізація технологій, здатних забезпечити ефективне видалення тонкодисперсних часток;

- оцінка ефективності флокуляційних методів у поєднанні з іншими технологіями очищення;
- зниження економічних витрат на очищення без втрати ефективності;
- мінімізація вторинних забруднень, які можуть виникати внаслідок використання реагентів.

Таким чином, вирішення проблеми очищення шахтних вод від тонкодисперсних завислих часток є нагальною науковою задачею, що спрямована на забезпечення екологічної безпеки, збереження водних ресурсів і підтримання сталого розвитку в регіонах з активною гірничодобувною діяльністю.

**Актуальність дослідження.** Очищення шахтних вод від тонкодисперсних завислих часток є важливим завданням сучасної гірничодобувної промисловості, оскільки забруднення водних ресурсів шахтними водами спричиняє значний екологічний вплив [3]. Контакт із гірничими породами надає шахтним водам специфічних фізико-хімічних властивостей, зокрема підвищену концентрацію завислих часток, важких металів та токсичних речовин [4]. Скидання таких вод у природні водойми без ефективного очищення негативно впливає на екосистеми та знижує якість питної води.

Особливо актуальним є питання видалення тонкодисперсних часток, які характеризуються високою стабільністю у воді та складністю осадження традиційними методами. Ці частки не лише знижують прозорість води, але й адсорбують на своїй поверхні токсичні речовини, що підвищує їхній екологічний вплив.

Флокуляційні методи очищення [5] демонструють високу ефективність у видаленні дрібних часток завдяки утворенню флокул, які легко видаляються з води. Проте, впровадження таких технологій вимагає додаткових досліджень, спрямованих на вибір ефективних флокулянтів, оптимізацію параметрів процесу та оцінку їхньої економічної й екологічної доцільності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Шахтні води утворюються внаслідок фільтрації підземних та поверхневих вод у підземні горні виробки. Шахтні води за показниками, що визначають їхній склад і властивості, можна поділити на три характерні види [6]:

- нейтральні прісні (рН=6,5...8,5, мінералізація до 1 г/л);
- солонуваті та солоні з підвищеною мінералізацією (рН=6,5...8, мінералізація понад 1 г/л), становлять 52% від загальної кількості шахтних вод;
- кислі (рН<6,5), становлять 10% від загальної кількості шахтних вод. Кислі шахтні води мають, як правило, підвищену мінералізацію.

Основні показники шахтних вод наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні показники шахтних вод у Донецькому та Львівсько-Волинському басейнах

Басейни	рН	Вміст завислих речовин, мг/л	Мінералізація, мг/л
Донецький	3...8,5	30...2500	300...35 000
Львівсько-Волинський	7...8	50...1000	700...6 500

Шахтні води з мінералізацією понад 1 г/л становлять 52 %, зокрема понад 3 г/л – 19 %; понад 5 г/л – 1,8 %.

Завислі речовини в шахтних водах представлені вугільними і породними частинками, склад яких відповідає складу викопного вугілля і породи. Зольність твердої фази змінюється від 20 до 80 %, причому зі зменшенням розмірів частинок вона збільшується. Найтонші частинки (0–20 мкм) представлені як правило глинистими частинками.

Усереднений за літературними джерелами дисперсний склад завислих речовин у шахтних водах наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Дисперсний склад шахтних вод Донецького басейну

Басейн, вихід $\gamma$ , %	Розмір часток, мкм			
	>50	10...50	5...10	<5
Донецький $\gamma$ , %	7...18	22...77	15...35	17...53

За результатами лабораторних досліджень вміст завислих речовин у шахтних водах становить від 40 мг/л до 12000 мг/л залежно від інтенсивності виконання підземних робіт.

**Методи очищення шахтних вод.** Основними методами очищення шахтних вод від завислих речовин є відстоювання та фільтрування, як безреагентне, так і з використанням для інтенсифікації процесу освітлення коагулянтів та флокулянтів (рис. 1).

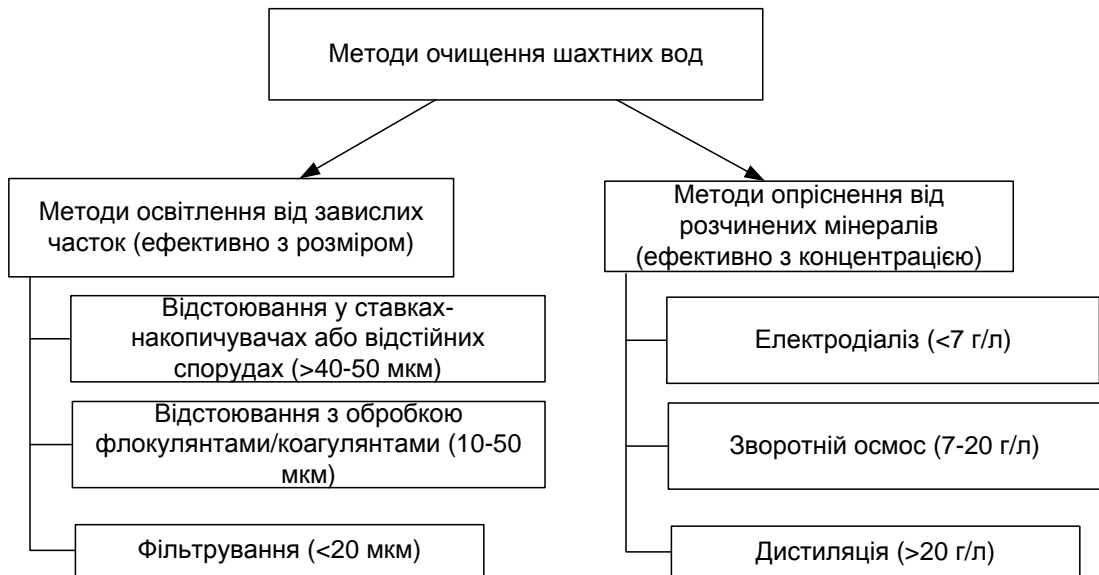


Рисунок 1 – Методи освітлення та демінералізації шахтних вод

Очищення шахтних вод відстоюванням проводять у ставках-освітлювачах або відстійниках різних конструкцій. Ефективність освітлення шахтних вод у ставках без використання реагентів досягає 62 %, ефективність освітлення у відстійниках – 71 % [6]. З метою підвищення ефективності відстоювання без зміни конструктивних параметрів відстійників застосовують реагентну обробку води коагулянтами і флокулянтами.

Підвищення вимог до води, яка очищується, під час скидання її у водойми, а також необхідність глибокого очищення шахтної води від завислих речовин під час використання її для пилопридушення та інших потреб, і для підготовки до демінералізації призводять до необхідності використання методу фільтрації. Фільтрування може бути використано в технологічних схемах очищення, як самостійний метод, так і в поєднанні з іншими методами. Необхідно пам'ятати, що під час використання фільтрів допустимий вміст завислих часток у воді не повинно перевищувати 500 мг/л, а для деяких тихохідних фільтрів допускається 700 мг/л.

На практиці, частинки розміром >50 мкм у більшості випадків вловлюють у відстійних спорудах без використання реагентів, частинки 10–50 мкм – у відстійних спорудах з використанням реагентів, частинки 5–10 мкм – у фільтрах без використання реагентів, а частинки <5 мкм – у фільтрах з використанням реагентів.

Існуючі методи опріснення води поділяються на дві основні групи: зі зміною та без зміни її агрегатного стану [7–10]. Сучасні технологічні схеми очищення шахтних вод включають різні методи очищення шахтних вод від завислих часток [11, 12], з подальшою демінералізацією частини вод і використання основних обсягів очищених вод у виробничих потребах.

**Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується означена стаття.** Незважаючи на прогрес у технологіях очищення шахтних вод, проблема ефективного видалення тонкодисперсних завислих часток залишається актуальною через недостатню результативність традиційних методів. Нерозв'язаними залишаються питання зниження витрат реагентів, адаптації технологій до змінного складу шахтних вод та забезпечення стабільності очищення. У статті досліджуються можливості покращення процесу флокуляції для досягнення високої якості очищення шахтних вод.

**Новизна.** Новизна даної статті полягає в експериментальному обґрунтуванні та впровадженні ефективної технології очищення шахтних вод від тонкодисперсних завислих часток з використанням інноваційного «Модуля очищення шламових вод і зневоднення шламу» (ТОВ «НТЦ «Екомаш», Харків, Україна). Авторами було визначено, що для досягнення допустимої норми вмісту завислих часток у шахтних водах (до 25 мг/л) необхідно застосовувати технологічний ланцюжок апаратів у безперервному режимі роботи, з додатковим використанням зернистого шламу з гідравлічною крупністю (розміром часток) понад 40 мкм.

**Мета і задачі дослідження.** Мета даного дослідження полягає у визначенні ефективності флокуляційного очищення шахтної води з використанням модульної установки. Це потрібно для створення технології очищення шахтних вод від завислих часток з метою вторинного використання освітленої води та попередження негативного впливу на довкілля.

Для досягнення зазначеної мети потрібно було вирішити наступні задачі:

- провести аналіз діючої водно-шламової схеми водовідливу шахти;
- провести дослідження можливості очищення шахтної води з використанням модуля очищення шламових вод.

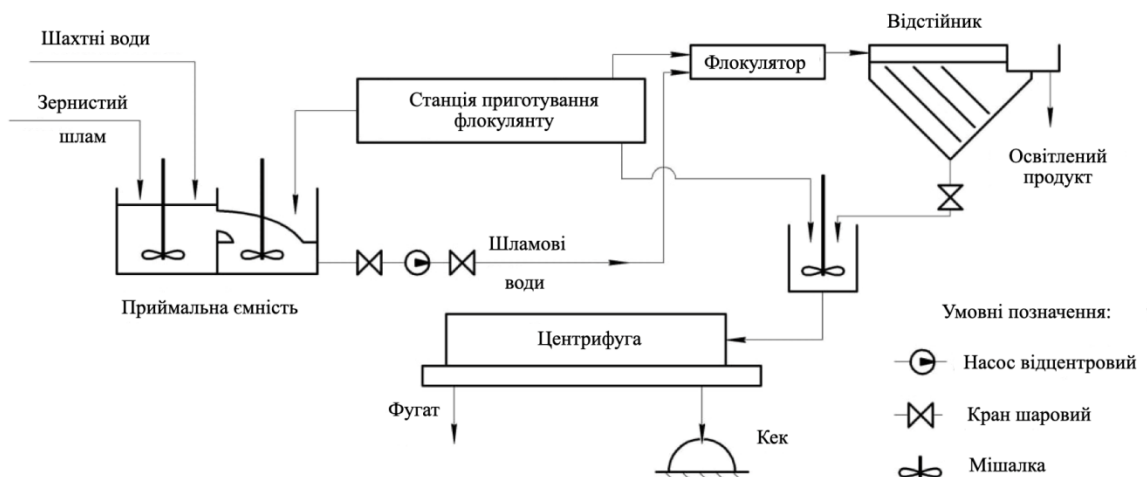
**Методика дослідження.** Дослідження проводилось на одній із діючих шахт Донецької області з використанням натурних досліджень модуля (технологічного ланцюга

апаратів) очищення тонкодисперсних шламів, змонтованого поряд із шахтоуправлінням (рис. 2).



а

б



в

Рисунок 2 – Характеристика модуля очищення (ТОВ «НТЦ «Екомаш»)  
 а – фотографії модуля очищення стічних вод на промисловому майданчику;  
 б – центрифуга для зневоднення осаду **ОГШ-469Л**;  
 в – принципова схема технологічного ланцюжку апаратів модуля

У модулі очищення шламових вод від завислих речовин проводиться методом відстоювання в тонкошаровому відстійнику. Інтенсифікація процесів осадження завислих речовин у відстійнику відбувається завдяки застосуванню флокулянтів і попередній підготовці шламових вод за концентрацією і гранулометричним складом завислих речовин.

Продукт тонкошарового відстійника використовується у виробництві, або може бути доочищений за допомогою мікрофільтрування на додаткових патронних фільтрах, наприклад, для подальшої демінералізації освітлених вод.

Згущений продукт тонкошарового відстійника зневоднюється в осаджувальній центрифугі.

Налагодженню технології модуля передують лабораторне дослідження шламових вод (пробна флокуляція шламу для визначення витрати флокулянта), за результатами якого налаштовують режим роботи апаратів модуля.

**Результати аналізу діючої водно-шламової схеми водовідливу шахтних вод.**

Головний водовідлив призначений для відкачування та видачі на поверхню шахтної води, що надходить у водовідлив із північного і південного крил шахти (рис.3). Головний водовідлив розташований у руддворі горизонту -320 м. Приплив води, що надходить у водовідлив із північного і південного крил шахти, становить  $Q=850 \text{ м}^3/\text{год}$ . Насосна камера водовідливу з'єднана з допоміжним стовбуром. Водовідлив складається з:

- насосної камери;
- двох ізольованих один від одного водозбірників ємністю  $2000 \text{ м}^3$  і  $1065 \text{ м}^3$ ;
- двох незалежних відстійників ємністю  $1020 \text{ м}^3$  і  $550 \text{ м}^3$ ;
- двох напірних трубопроводів допоміжного ствола: 1 –  $\text{Ø} 426 \text{ мм}$ ; 2 –  $\text{Ø} 325 \text{ мм}$ ;
- протипожежного ставка  $\text{Ø} 150 \text{ мм}$ .

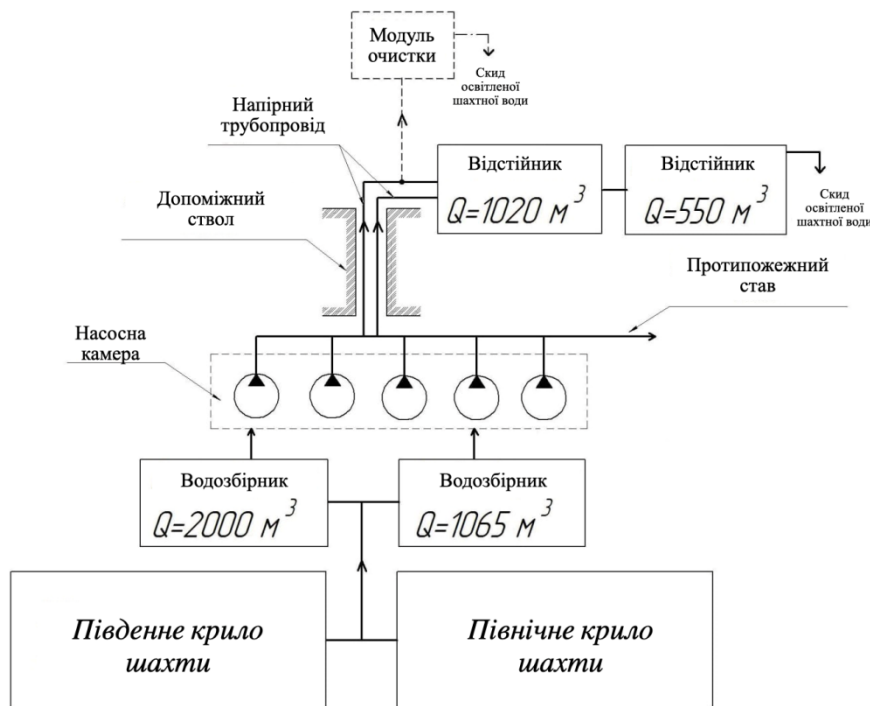


Рисунок 3 – Наявна водно-шламова схема водовідливу шахти з підключенням модуля очищення ТОВ «НТЦ «Екомаш»

Сумарна місткість водозбірників становить  $3065 \text{ м}^3$ . Водозбірники з'єднуються з насосною камерою за допомогою двох приймальних колодязів, що дають змогу регулювати надходження води.

Водовідлив обладнаний двома напірними трубопроводами Ø 426 мм, які забезпечують відкачування води насосами.

Кожен насосний агрегат забезпечений всмоктувальними трубопроводами Ø 325 мм, оснащеними приймальними і зворотними клапанами. Комутація напірних трубопроводів у насосній камері дає змогу забезпечити відкачування води будь-яким насосним агрегатом за будь-яким напірним трубопроводом.

Водовідлив забезпечений апаратурою контролю:

- витратомірами – на кожному напірному трубопроводі;
- манометрами – на кожному агрегаті.

Геометричний напір водовідливу визначається глибиною стовбурів і дорівнює 320 м. У напірний трубопровід врізаний протипожежний Ø 150 мм, що слугує для подачі води для забезпечення протипожежних і протипилових заходів у шахті.

Вода в кількості 216025,5 м<sup>3</sup>/міс. використовується в замкнутому виробничому циклі на протипожежні та протипилові заходи і на поверхню шахти не видається.

Місце підключення модуля очищення до наявної схеми вод вказано на рис. 3 пунктирними лініями.

**Результати випробувань Модуля очищення шламових вод і зневоднення шламів.** Випробування технології очищення шахтних вод проводилися робочими циклами по 4 години безперервної роботи модуля очищення. Проби шахтних вод, що надходили на очищення, і очищених модулем, досліджували в лабораторії. Робота модуля очищення шламових вод здійснювалася наступним чином:

– шахтна вода зі змінним вмістом завислих речовин від 50 мг/л до 20 г/л надходить до приймальної ємності, де вона накопичується та усереднюється, а також корегується за концентрацією та ситовим складом завислих речовин (шляхом перемішування із зернистим шламом з розміром часток крупніше 40 мкм), або розбавлення фугатом центрифуги, чи водою до величин оптимального вмісту завислих речовин, які забезпечують якісне агрегатоутворення завислих речовин під час подальшої флокуляції;

– агрегатоутворення завислих речовин в процесі місткової флокуляції відбувається у флокуляторі, куди підготовлені шламові води подаються насосом із певною продуктивністю (~35...50 м<sup>3</sup>/год); до флокулятора подають також флокулянт станцією підготовки та дозування флокулянта;

– далі шламові води самопливом потрапляють у тонкошаровий відстійник, у якому вони розділяються на згущений та освітлений продукти; освітлений продукт за необхідності можна використовувати у виробництві, або направити на скидання;

– згущений продукт відстійника зневоднюється в осаджувальній центрифугі; кек (зневоднений продукт) після центрифуги складається і використовується надалі залежно від його зольності; фугат центрифуги направляється в приймальну ємність, або скидається.

Показники роботи модуля очищення шламових вод і зневоднення шламів центрифугою ОГШ-469Л-01 наведено в табл. 3.

Аналіз результатів досліджень, наведених в табл. 3 свідчить про підвищення ефективності флокуляції при вилученні з шахтної води тонкодисперсних часток у присутності зернистого шламу крупністю більше 40 мкм. При додаванні додаткового шламу відбувається зменшення витрати флокулянту з одночасним підвищенням якості очищення. Це пояснюється тим, що зернисті частинки захоплюють дрібні та зв'язують їх у флокули, які мають більшу вагу, ніж флокули, які містять лише тонкодисперсні ча-

стинки. Це призводить до підвищення швидкості осідання утворених агрегатів від 4 до 8 мм/с навіть при зменшенні витрати флокулянту.

Таблиця 3 – Результати відбору проб в процесі відпрацювання режимів очищення шахтних вод

Найменування показників	Номер досліджу			
	1	2	3	4
Об'ємна продуктивність модуля, м <sup>3</sup> /год	37	36,5	38	35
Завислі речовини в шахтній воді, що надходить, мг/л	53,0	41,0	69,0	72,0
Вміст завислих речовин у живленні модуля після додавання баласту (зернистого шламу із вмістом частинок розміром понад 40 мкм), мг/л	53	3050	4000	7200
Вміст частинок крупністю понад 40 мкм від загальної маси частинок, %	0	10	13,1	25,2
Витрата флокулянту, г/т	1800	179,5	177	280
Швидкість осадження флокул перед відстійником, мм/с	4	4,5	6,6	8
Швидкість осадження флокул перед центрифугою, мм/с	2,08	2,1	2,1	3,9
Допустима норма вмісту завислих речовин під час скидання шахтних вод, мг/л	25	25	25	25
Завислі речовини в очищеній шахтній воді (у зливні відстійника), мг/л	50	18	20,5	21,0
Вміст завислих речовин у згущеному продукті відстійника, г/л	2	28	40	53,4
Зольність осаду (зневодненого продукту) центрифуги, ОГШ-469Л, %	68,2	69,1	58,6	55,6
Вологість осаду (зневодненого продукту) центрифуги ОГШ-469Л, %	41,7	43,3	31,6	32,3

Механізм утворення агрегатів може бути проілюстрований наступним уявленням про агрегатоутворення на рис. 4.



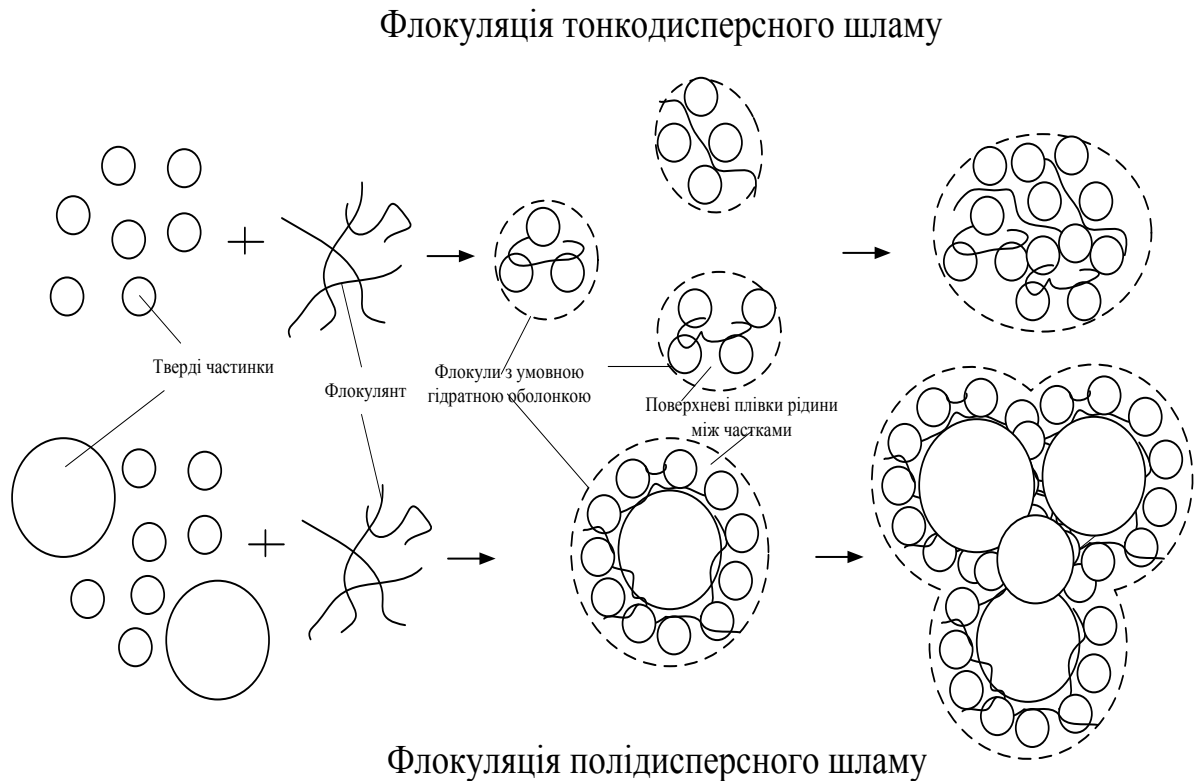


Рисунок 4 – Порівняння механізмів утворення флокул тонкодисперсного та полідисперсного шламів

Тонкодисперсні частки мають меншу поверхню, що зменшує кількість адсорбованого на кожній частинці флокулянту та при формуванні флокул призводить до утворення невеликих агрегатів, які складаються з меншої кількості часток, ніж при наявності полідисперсних часток. Окрім того, наявність поверхневих плівок навколо завислих часток та налипання дрібних часток на згустки флокулянту призводять до формування флокул, густина яких не сильно відрізняється від густини води. Це призводить до виносу потоком рідини таких часток з відстійника та незадовільне згущення в процесі відстоювання (дослід 1, концентрація твердої фази у згущеному продукті відстійника лише 2 г/л). Утворені дрібні флокули мають кінцеву кількість твердих часток, пропорційну кількості контактів між частинками та вкритих спільною гідратною оболонкою, яка формується за рахунок сил поверхневого натягу та створенню подвійного електронного шару навколо агрегатів. Як правило, сформовані флокули не злипаються між собою до нескінченності та для їх укрупнення потрібна додаткова витрата флокулянту для об'єднання вже сформованих агрегатів. Однак, такі агрегати не є міцними та можуть руйнуватись при незначному механічному або гідромеханічному впливі.

Наявність часток розміром більше 40 мкм перетворюють тонкодисперсну систему в полідисперсну, яка має частки з різним потенціалом поверхні, а більш крупні частки, рухаючись у воді захоплюють на своїй поверхні дрібні частки твердої фази, адсорбують та «намотують» нитки полімерного флокулянту. Це створює міцні з'єднання між частками за рахунок більшої площі контакту, а утворені агрегати мають більшу масу за рахунок меншого об'єму рідини в об'ємі флокули. Окрім того, наявність полідисперсних часток підвищує ступінь зневоднення осаду в центрифугах завдяки швидкому осіданню більш важких агрегатів та видалення поверхневої вологи дрібних часток при їх ущільненні між більш крупними частками.

**Висновки.** Проведеними натурними випробуваннями технології очищення шахтних вод від завислих часток з використанням «Модуля очищення шламових вод і зневоднення шламів» (ТОВ «НТЦ «Екомаш», Харків, Україна) встановлено, що допустима норма очищення шахтних вод від завислих часток складає 25 мг/л і забезпечується технологічним ланцюжком апаратів у безперервному режимі роботи Модуля. При впровадженні повномасштабного Модуля очищення шламових вод від завислих речовин необхідно укомплектувати його допоміжним технологічним ланцюжком подачі та рециркуляції зернистого шламу, а також автоматичною системою керування технологічними процесами (АСК ТП).

Виявлено, що ефективна агрегація тонкодисперсних часток відбувається за умов наявності додаткових часток зернистого шламу з гідравлічною крупністю більше 40 мкм. Наявність таких часток сприяють захопленню та утриманню в агрегатах дрібних часток з утворенням важких флокул, осідаючих у відстійнику достатньо швидко. Показано, що додаткове додавання твердої зернистої фази призводить до зменшення витрати флокулянту з одночасним підвищенням ефективності затримання тонкодисперсних часток.

### Література

1. Савицький В.М., Хільчевський В.К., Чунар'єв О.В., Яцюк М.В. Відходи виробництва і споживання та їх вплив на ґрунти і природні води : навч. посіб. / за ред. В.К. Хільчевського. Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. 152 с. URL: [https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/vidhody\\_virob.pdf](https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/vidhody_virob.pdf).

2. Сергєєв П. В., Білецький В. С. Селективна флокуляція вугільних шламів органічними реагентами : монографія. Донецьк : Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, Редакція гірничої енциклопедії, 2010. 240 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/5d4a7b02-12af-4cfa-8f42-9e319667f819/content>.

3. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Бойко К.Е., Орловський А.В., Артеменко І.О., Зосима В.Г. Оцінювання екологічної небезпеки впливу шахтних вод ставка-накопичувача б. Таранова на водне середовище західного Донбасу. Екологічні науки: науково-практичний журнал. 2021. № 7(34). С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.6>.

4. Ткачук О.П., Шкатула Ю.М., Тітаренко О.М. Сільськогосподарська екологія : навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 542 с. URL: <http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/24545.pdf>.

5. Онищук О. Вивчення процесу флокуляції та коагуляції при очищенні води для промислового застосування. Вісник Хмельницького національного університету. Том 1, №1, 2023. С. 151–154. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-151-154>.

6. Войтович С.П. Геохімія шахтних вод львівсько-волинського кам'яновугільного басейну (на прикладі Червоноградського гірничопромислового району) : дис. ... канд. геологічних наук: 04.00.02. Київ, 2017. 245 с. URL: [https://igmr.org.ua/pdf/voytovych\\_s\\_p\\_dysertaciya.pdf](https://igmr.org.ua/pdf/voytovych_s_p_dysertaciya.pdf).

7. Войтович С.П. Геохімічні особливості підземних та шахтних вод вугільних басейнів України (на прикладі Червоноградського гірничопромислового району і Центрального Донбасу). Науковий вісник Національного гірничого університету. №2 (146), 2015. С. 23–30. URL:

<https://nvngu.in.ua/index.php/uk/component/jdownloads/finish/53-02/8303-2015-02-voitovych/0>.

8. Хорольський А.О., Лапко В.В., Саллі В.С., Мамайкін О.Р. Вибір технології демінералізації стічних вод, як складової технологічних потоків вугільних шахт. Збірник наукових праць НГУ. 2020. № 63. С. 61–73. URL: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.061>.

9. Бурдо О.Г., Офатенко О.О., Крутій Г.О. Аналіз процесів демінералізації води. Наукові праці. 2009. 36(2). С. 230–234.

10. Гіроль М.М., Гіроль А.М., Гіроль А.М. Технології водовідведення промислових підприємств: навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2013. 625 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/3204/1/127zah.pdf>.

11. Wolkersdorfer, C. (2022). Passive Treatment Methods for Mine Water. In: Mine Water Treatment – Active and Passive Methods. Springer, Berlin, Heidelberg. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-65770-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-65770-6_4).

12. Kleinmann, R., Sobolewski, A., Skousen, J. (2023). The Evolving Nature of Semi-passive Mine Water Treatment. *Mine Water and the Environment*, 42(1), 170–177. URL: <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00922-w>.

#### Bibliography (transliterated)

1. Savytskyi V.M., Khilchevskiy V.K., Chunariov O.V., Yatsiuk M.V. Production and consumption wastes and their impact on soils and natural waters: a textbook / edited by V.K. Khilchevskiy. Kyiv University Publishing and Printing Centre, 2007. 152 с. URL: [https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/vidhody\\_virob.pdf](https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/vidhody_virob.pdf).

2. Sergeev P.V., Biletsky V.S. Selective flocculation of coal sludge with organic reagents: a monograph. Donetsk: Eastern Publishing House, Donetsk Branch of the National Academy of Sciences, Mining Encyclopaedia, 2010. 240 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/5d4a7b02-12af-4cfa-8f42-9e319667f819/content>.

3. Ulytsky, O., Diachenko, N., Boiko, K., Orlovsky, A., Artemenko, I., Zosima, V. (2021). Ecological danger estimation of mine waters pound-accumulator Taranova wash influence on a water environment Western Donbass. *Ecological Sciences*, 34(7), 31–35. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.6>.

4. Tkachuk O.P., Shkatula Y.M., Titarenko O.M. Agricultural ecology: a textbook. Vinnytsia: VNAU, 2020. 542 с. URL: <http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/24545.pdf>.

5. Onyshchuk, O. (2023). To the study of the flocculation and coagulation process in the purification of water for industrial application. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 317(1), 151–154. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-151-154>.

6. Voitovych S.P. Geochemistry of mine waters of the Lviv-Volyn coal basin (on the example of the Chervonohrad mining district) : Cand. 04.00.02. Kyiv, 2017. 245 с. URL: [https://igmr.org.ua/pdf/voytovych\\_s\\_p\\_dysertaciya.pdf](https://igmr.org.ua/pdf/voytovych_s_p_dysertaciya.pdf).

7. Voitovych S.P. Geochemical features of underground and mine waters of coal basins of Ukraine (on the example of Chervonohrad mining district and Central Donbas). *Scientific Bulletin of the National Mining University. №2 (146)*, 2015. С. 23–30. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/component/jdownloads/finish/53-02/8303-2015-02-voitovych/0>.

8. Khorolskyi, A., Lapko, V., Salli, V., Mamaikin, O. (2020). Substantiation of technology of demineralization of wastewater as a component of technological flows of coal mines. Collection of Research Papers of the National Mining University, 63, 61–73. URL: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.061>.

9. Burdo O.G., Ofatenko O.O., Krutii G.O. Analysis of water demineralisation processes. Scientific works. 2009. 36(2). С. 230–234.

10. Giroly M.M., Giroly A.M., Giroly A.M. Technologies of water disposal of industrial enterprises: a textbook. Rivne: NUWHP, 2013. 625 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/3204/1/127zah.pdf>.

11. Wolkersdorfer, C. (2022). Passive Treatment Methods for Mine Water. In: Mine Water Treatment – Active and Passive Methods. Springer, Berlin, Heidelberg. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-65770-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-65770-6_4).

12. Kleinmann, R., Sobolewski, A., Skousen, J. (2023). The Evolving Nature of Semi-passive Mine Water Treatment. Mine Water and the Environment, 42(1), 170–177. URL: <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00922-w>.

УДК 504.054

А. О. Шкоп, к. техн. н, докторант, О. В. Шестопапов, к. техн.н., доцент,  
Н. Г. Пономарьова, к. техн. н, доцент, А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач,  
Д. М. Войтенко, аспірант, С. С. Кулініч, аспірант

### **ФЛОКУЛЯЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ ШАХТНИХ ВОД ВІД ТОНКОДИСПЕРСНИХ ЗАВИСЛИХ ЧАСТОК**

У даній роботі представлено результати дослідження технології флокуляційного очищення шахтних вод від тонкодисперсних завислих часток із застосуванням інноваційного «Модуля очищення шламових вод і зневоднення шлавів» (ТОВ «НТЦ «Екомаш», Харків, Україна). Очищення шахтних вод є важливим етапом у забезпеченні екологічної безпеки водних ресурсів та відповідає вимогам сучасних стандартів охорони навколишнього середовища. Особливу увагу приділено ролі твердої зернистої фази в процесі флокуляції, яка не лише підвищує ефективність очищення, але й дозволяє знизити споживання флокулянтів. Це, у свою чергу, сприяє зменшенню операційних витрат і підвищує екологічну безпеку технологічного процесу. Зниження використання хімічних реагентів зменшує негативний вплив на навколишнє середовище, знижує ризики вторинного забруднення води та покращує екологічну ситуацію в регіонах, де функціонують шахтні підприємства. Встановлено, що досягнення допустимого рівня вмісту завислих часток у шахтних водах (до 25 мг/л) можливо за умови застосування технологічного ланцюжка апаратів у безперервному режимі роботи, що забезпечує стабільність і ефективність процесу очищення. Дослідження показали, що додавання зернистого шламу з гідравлічною крупністю понад 40 мкм значно покращує агрегацію тонкодисперсних часток, сприяючи утворенню важких флокул, які швидко осідають у відстійнику. Це дозволяє значно скоротити час очищення та підвищити ефективність процесу. Особливо важливим є те, що використання твердої зернистої фази в процес флокуляції дозволяє знижувати витрати флокулянтів, що зменшує операційні витрати та сприяє підвищенню екологічної безпеки процесу очищення. Зменшення використання хімічних реагентів знижує негативний вплив на навколишнє середовище і зменшує ри-

зики забруднення води. Результати дослідження мають великий практичний потенціал для впровадження в реальних умовах експлуатації шахтних водоочисних споруд, де можуть забезпечити не лише ефективне очищення шахтних вод, але й значно підвищити економічну ефективність завдяки зниженню витрат на хімічні реагенти. Враховуючи необхідність забезпечення сталого розвитку гірничодобувної галузі, запропоновані результати можуть стати важливим кроком у напрямку впровадження екологічно безпечних та економічно ефективних технологій очищення шахтних вод. Розвиток таких технологій сприятиме вдосконаленню методів охорони водних ресурсів та забезпеченню довгострокової стабільності природних екосистем.

**Ключові слова:** шахтні води, флокуляція, тонкодисперсні завислі частки, зернистий шлам, модуль очищення, екологічна безпека.

A. O. Shkop, O. V. Shestopalov, N. G. Ponomarova, A. S. Bosiuk, D. M. Voitenko,  
S. S. Kulinich

### FLOCCULATION TREATMENT OF MINE WATER FROM FINE SUSPENDED SOLIDS

This paper presents the results of a study of the technology of flocculation treatment of mine water from fine suspended particles using the innovative “Sludge water treatment and sludge dewatering module» (LLC «STC Ecomash», Kharkiv, Ukraine). Mine water treatment is an important stage in ensuring the environmental safety of water resources and meets the requirements of modern environmental protection standards. Particular attention is paid to the role of the solid granular phase in the flocculation process, which not only increases the treatment efficiency but also reduces the consumption of flocculants. This, in turn, helps to reduce operating costs and improves the environmental safety of the process. Reducing the use of chemicals reduces the negative impact on the environment, reduces the risk of secondary water pollution and improves the environmental situation in the regions where the mines operate. It has been established that achieving the permissible level of suspended solids in mine water (up to 25 mg/l) is possible provided that the technological chain of devices is used in a continuous mode of operation, which ensures the stability and efficiency of the treatment process. Studies have shown that the addition of granular sludge with a hydraulic size of more than 40 microns significantly improves the aggregation of fine particles, contributing to the formation of heavy flocs that quickly settle in the settling tank. This significantly reduces cleaning time and increases process efficiency. Of particular importance is that the use of a solid granular phase in the flocculation process reduces the consumption of flocculants, which reduces operating costs and contributes to the environmental safety of the treatment process. Reducing the use of chemicals reduces the negative impact on the environment and reduces the risk of water pollution. The results of the study have great practical potential for implementation in real-world mine water treatment facilities, where they can provide not only effective mine water treatment, but also significantly increase economic efficiency by reducing the cost of chemicals. Given the need to ensure the sustainable development of the mining industry, the proposed results can be an important step towards the introduction of environmentally friendly and cost-effective technologies for mine water treatment. The development of such technologies will contribute to the improvement of water resources protection methods and ensure the long-term stability of natural ecosystems.

**Keywords:** mine water, flocculation, fine suspended solids, granular sludge, treatment module, environmental safety.