

УДК 504.3.054:628.511(622)  
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).30](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).30)

## EVALUATION OF THE ABILITY OF SPRINKLER SYSTEMS TO SUPPRESS DUST EMISSIONS AT TAILINGS FACILITIES

### ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ СПРИНКЛЕРНИХ СИСТЕМ ПРИГНІЧУВАТИ ПИЛОВИДІЛЕННЯ НА ХВОСТОСХОВИЩАХ

**Valeriia M. Tishyna**  
valeriya.tishina92@gmail.com  
ORCID: 0009-0000-9171-2852  
**Nataliia M. Maksymova**  
natalya.maksimova@mipolytech.education,  
ORCID: 0000-0003-1684-7479

**В. М. Тішина,**  
здобувач вищої освіти  
**Н. М. Максимова,**  
канд. техн. наук, доцент

*LIMITED LIABILITY COMPANY "TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC»,  
Zaporizhzhia*

*ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя*

**Abstract.** One of the most significant problems is dust emission from the dry surfaces of tailings facilities, which leads to a deterioration in air quality. This problem is particularly acute in industrial regions of Ukraine, such as Kryvyi Rih, where the accumulation of beneficiation waste in tailings ponds creates significant environmental and social impacts. Fine dust can penetrate the respiratory tract, causing serious illness. Rising temperatures and increasing drought conditions are exacerbating the problem. In this regard, reducing dust emissions from dry surfaces of tailing ponds is an urgent scientific and practical task.

**Aim.** The aim of the research is to find and substantiate environmentally efficient solutions to reduce dusting of dry tailings dumps by means of their dewatering.

**Methods.** The results of analytical studies are presented, namely: the main parameters of the sprinkler system for moistening the tailings dump maps, which is in operation and will be further expanded with the help of protective dams, are calculated.

**Results.** Based on the analysis of modern methods of dust control, including chemical, biological and technical approaches, attention is paid to the feasibility of using sprinkler systems to moisten dry surfaces of tailings maps. The artificial dewatering of the tailings maps can be considered in combination with chemical and biological methods of dust control. Irrigation of the maps creates favourable conditions for consolidation of the surfaces by means of landscaping. The proposed recommendations can be used to improve the efficiency of tailings management at mining and processing plants.

**Scientific novelty.** It is proposed to consider the introduction of sprinkler systems to reduce dust formation at tailing dumps of mining and processing plants as an independent technical measure, as well as in a successful combination with biological and chemical methods of surface fixation.

**Practical significance.** The article presents proposals for the implementation of sprinkler systems in the conditions of mining and processing plants to improve the environmental safety of tailings management and adjacent territories. These results create a basis for further scientific and applied research and can also be used in the development of regulatory documents in the field of environmental safety of liquid multi-tonnage waste storage facilities.

**Key words:** tailing dump; dusting; sprinkler system; irrigation; consolidation methods; reagents; biological reclamation.

**Анотація.** Однією з найбільш вагомих проблем є пиловиділення з сухих поверхонь хвостосховищ, що призводить до погіршення якості атмосферного повітря. Ця проблема є особливо гострою для промислових регіонів України, таких як Криворіжжя, де накопичення відходів збагачення у хвостосховищах створює значний екологічний та соціальний вплив. Дрібнодисперсний пил здатний проникати у дихальні шляхи, спричиняючи серйозні захворювання. Зростання температури та посилення посушливих умов загострюють проблему. У зв'язку з цим зменшення пиловиділення з сухих поверхонь хвостосховищ є актуальною науково-практичною задачею. **Мета.** Метою досліджень є пошук та обґрунтування екологічно ефективних рішень для зменшення пиління сухих карт хвостосховищ за рахунок їх зволоження.

*Методика.* Представлені результати аналітичних досліджень, а саме: розрахунково визначені основні параметри спринклерної системи для зволоження карт хвостосховища, яке знаходиться в експлуатації та в подальшому будуть нарощуватись огороджувальні дамби.

*Результати.* На підставі аналізу сучасних методів боротьби з пилоутворенням, включаючи хімічні, біологічні та технічні підходи, приділено увагу доцільності використання спринклерних систем для зволоження сухих поверхонь карт хвостосховищ. Штучне зволоження карт хвостосховищ може розглядатись в комбінації з хімічними та біологічними методами боротьби з пиловиділенням. Зрошення карт створює сприятливі умови для закріплення поверхонь шляхом їх озеленення. Запропоновані рекомендації можуть бути використані для підвищення ефективності управління хвостовим господарством на гірничо-збагачувальних комбінатах.

*Наукова новизна.* Запропоновано розглядати впровадження спринклерних систем для зменшення пилоутворення на хвостосховищах гірничо-збагачувальних комбінатів як самостійний технічний захід, так й у вдалому поєднанні з біологічними та хімічними методами закріплення поверхонь.

*Практична значимість.* Представлено пропозиції щодо реалізації спринклерних систем в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів для підвищення екологічної безпеки хвостового господарства та прилеглих територій. Ці результати створюють основу для подальших науково-прикладних досліджень, а також можуть бути використані при розробці нормативних документів у сфері екологічної безпеки накопичувачів рідких багатотонажних відходів.

**Ключові слова:** хвостосховище; пиління; спринклерна система; зрошення; методи закріплення; реагенти; біологічна рекультивация.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Хвостосховища є об'єктами високої потенційної екологічної небезпеки, зокрема розглядаються як потужні джерела забруднення атмосферного повітря [1–3].

Під час експлуатації хвостосховищ виникає проблема пилоутворення, яка може бути наслідком вітрової ерозії сухих ділянок хвостосховищ. Вітрова ерозія може бути основною причиною втрати і розсіювання хвостового матеріалу з дамби хвостосховища в навколишнє середовище.

Прикладом потенційного джерела пиловиділення слугують карти наживу, де у зонах випуску пульпи утворюються сухі ділянки. Укоси, складені хвостами, швидко висихають та стають джерелами дефляції при великих поривах вітру [4].

Можливість забруднення навколишнього середовища пилом, яке виноситься з поверхонь хвостосховищ, та пошук шляхів попередження та мінімізації цих дефляційних процесів, розглядається багатьма науковцями вже тривалий час [5–6]. Для закріплення сухих поверхонь хвостосховищ бажано використовувати екологічно безпечні матеріали для покриття. Такі технології мають забезпечувати стійкість до агресивних впливів та змін погодних умов, характерних для середовища хвостосховищ.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У Криворізькому регіоні, внаслідок впливу пилу на працівників відкритих цехів гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК), щорічно фіксуються професійні легеневі захворювання, такі як пиловий бронхіт та пневмокозіоз [7–8]. Рівень професійної захворюваності за 2015–2019 роки тут склав 17,7% (1826/10307), що є досить високим показником, як для окремо взятого міста [9]. Одним з основних негативних факторів

виробничого середовища на здоров'я працівників вважається пил переважно фіброгенної дії [1].

Переважає більшість хвостів – ерозійно-небезпечний пил, що містить частинки діаметром менше 5 мкм [2].

Захворювання, які виявляються у працівників гірничо-збагачувальних комплексів, розвиваються протягом тривалого часу, що ускладнює визначення чітких причин їх появи (стаж роботи хворих становить понад 10 років) [9]. Одним із найбільш ефективних рішень для зменшення пилового забруднення навколишнього середовища та захисту персоналу є розробка заходів та засобів, спрямованих на обмеження викидів пилу в атмосферу. Вибір таких засобів має включати варіанти, які знижують рівень пилу з сухих поверхонь промислових об'єктів ГЗК. Важливо, щоб ці засоби були універсальними і могли ефективно працювати не тільки на хвостосховищах, а й на автодорогах за будь-яких температур і вологості повітря [9–10].

Проблема боротьби з вітровою ерозією на поверхнях хвостосховищ та їх закріплення за допомогою різноманітних організаційних, технічних, хімічних та біологічних підходів залишається досі важливою, незважаючи на численні наукові дослідження в цій сфері [2].

Процес вітрової ерозії поверхонь хвостосховищ є фізичним явищем, що формується під впливом як внутрішніх факторів, наприклад характеристики хвостів, рельєф поверхні, так і зовнішніх умов. Основними факторами, що впливають на процес здимання пилу хвостів є [11]: гранулометричний склад хвостів, швидкість вітру, вологість повітря та матеріалу.

За швидкості вітру від 4,5 до 6,7 м/с на висоті 0,1 м від поверхні відбувається рух частинок до 0,25 мм в діаметрі. За швидкості від 6,7 до 8,4 м/с розпочинають рухатись частинки діаметром до 0,5 мм, а піщинки діаметром від 1 до 1,5 мм починають

рухатись за швидкості вітру коло поверхні хвостосховища 10–13 м/с. Утворення пилу на хвостосховищах спостерігається вже при швидкості вітру на поверхні 4 м/с. При сухій погоді піщинки хвостосховищ приходять в рух навіть за нижчої швидкості вітру [12–13]. З вологою поверхні хвостосховища пиління піщаної фракції не спостерігається [13].

Аутогезія малих пилових частинок хвостів при вологості повітря понад 70 % збільшується, а при низькій вологості повітря – знижується [4].

У літній період, коли температура повітря висока, а вологість низька, зневоднена поверхня хвостосховища перетворюється на активне джерело пиловиділення. Натомість взимку більшість поверхні хвостосховища замерзає, що значно зменшує вітрову ерозію.

Одним з найбільш поширеним є спосіб закріплення поверхонь відвалів та хвостосховищ різними реагентами [14–16], зокрема полімерами, латексами, бітумними емульсіями [17].

Бітумні матеріали ефективно зв'язують пил та створюють надійну захисну плівку, що запобігає вітровій ерозії [12, 18]. Вони легко наносяться, але можуть вимагати повторного застосування залежно від погодних умов. Використання бітумних емульсій є ефективним методом закріплення поверхні хвостосховищ, проте вимагає значних витрат на матеріали та транспорт.

Дослідження [2] плівок з бітумної емульсії показали, якщо наявними є порушення (розриви), з яких можуть видуватися часточки ґрунту, то руйнування відбувається при швидкості вітру 5 м/с та більше. У зв'язку з цим зазначені поверхні мають бути закріплені повторно, що суттєво впливає на показники економічної ефективності пилопригнічуючого заходу [2, 12].

Біологічні методи включають себе висадку рослинності на поверхні хвостосховищ [12, 17, 19]. Недоліком є необхідність значних витрат на підтримку рослинного покриву та тривалий період її росту.

Біологічну рекультивацию використовують для вирішення проблеми винесення пилу за рахунок формування на зовнішніх укосах дамби хвостосховища рослинного покриву, який буде зменшувати швидкість вітру та затримувати пилові частинки, не дозволяючи їм розноситись на порівняно великі відстані від хвостосховища.

Такі озимі культури, як озиме жито і озиме трикале, є оптимальним вибором для рекультивации хвостосховищ залізородних шламів через їх високу стійкість до умов навколишнього середовища. Ці культури можуть ефективно використовувати обмежені ресурси продуктивної вологи, що накопичуються у шламах, особливо взимку і весняний період [12].

Озиме жито і тритикале озиме належать до порівняно посухостійких рослин, що пов'язано з могутністю і глибшою, чим у інших зернових культур, кореневою системою [2].

Мульчування є одним з популярних біологічних методів стабілізації поверхонь хвостосховища, що пилять. Для цього поверхня хвостосховища покривається такими органічними речовинами рослинного походження, як солома, сіно, тирса, кора дерев та інші [12, 17]. Мульчування сприяє росту рослин, покращуючи умови проростання насіння та забезпечуючи захист молодих сходів. Ефективність цього методу визначається властивостями конкретного матеріалу та його морфологічними характеристиками.

Деякі органічні речовини є ефективними меліорантами, оскільки покращують водопоглинальну, іонообмінну здатність піщаних хвостосховищ. Загальновідомими речовинами органічного походження для забезпечення поживного режиму хвостосховищ є тирса, зола, гіпс, зелені добрива, гній, компост, осад стічних вод [12].

Для озеленення схилів укосів дамби хвостосховища доцільно застосовувати мулові осади, отримані в результаті анаеробного очищення стічних вод, які пройшли повне знезараження на спеціальних відкритих мулових майданчиках [11].

## ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Екологічна проблема запиленості повітря є особливо гострою для промислових регіонів України, таких як Криворіжжя. Експлуатація цих гідротехнічних споруд потребує постійного контролю та удосконалення технологічних рішень щодо зменшення негативного впливу на довкілля, зокрема, врахування можливих екологічних ризиків і впливів на здоров'я людей. Досі триває пошук шляхів удосконалення методів запобігання утворення пиловиділення на сухих поверхнях хвостосховищ.

Пиління хвостосховищ є потенційним джерелом забруднення повітря, що негативно впливає на здоров'я людей і стан екосистем. Дрібнодисперсний пил, діаметром менше 5 мкм, здатний проникати у дихальні шляхи, спричиняючи серйозні захворювання. Зміна кліматичних умов, а саме зростання температури та посилення посушливих умов, поглиблюють проблему. У зв'язку з цим мінімізації пиління сухих поверхонь хвостосховищ є досі актуальною науково-практичною задачею.

## МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою досліджень є пошук та обґрунтування екологічно ефективних рішень для зменшення пиління сухих карт хвостосховищ за рахунок їх зволоження.

## МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Об'єкт дослідження** – пилові поверхні карт хвостосховища як можливе джерело пилового забруднення атмосферного повітря.

**Предмет дослідження** – сучасні методи мінімізації пиління з поверхонь хвостосховищ за рахунок їх зволоження.

Представлені результати аналітичних досліджень, а саме: розрахунково визначені основні параметри спринклерної системи для зволоження карт хвостосховища, яке знаходиться в експлуатації та в подальшому передбачено нарощування огорожувальні дамби.

**ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ**

Спринклерні системи поливу є одним із найбільш ефективних способів зрошення, що забезпечують рівномірний розподіл вологи у верхньому прошарку ґрунтового покриву на значних територіях, а також підвищують вологість повітря в приземному шарі. Їх застосування знаходить широке використання у сільському господарстві, ландшафтному дизайні, промисловості [20], а також для мінімізації пиління на поверхнях хвостосховищ. Завдяки автоматизованому управлінню та високій точності розподілу, спринклерні системи дозволяють раціонально використовувати водні ресурси, що особливо актуально в умовах сучасних екологічних викликів.

Монтаж таких систем розбірного типу виконується на підготовлених ділянках. Після прокладання та монтажу трубопровідної мережі, встановлюють розпилювачі (спринклери).

Для виконання розрахунків основних параметрів роботи мережі, приймаємо схему стаціонарного розташування спринклерних систем по квадратах для умовно прийнятих карт № 1 хвостосховища, загальною зрошуваною площею 13,0 га при поливній нормі 20 м<sup>3</sup>/га. Для досягнення рівномірного розподілу

дощу по зрошуваній площі спринклери, при розташуванні їх по схемі «квадрат» (рис. 1), встановлюють по довжині трубопроводу на відстані 1,42R, де R – дальність польоту струменя, м [21]. Для досягнення кращого пилопригнічуючого ефекту розглядаємо умови одразу одночасно працюючих всіх спринклерів на розподільчій мережі.

Оптимальну частоту обертання апарата підбирають із умов, щоб лінійна швидкість руху струменя по крайніх краплях повинна бути менше 2 м/с.

Визначимо оптимальну частоту обертання кожного спринклера скориставшись залежністю частоти від лінійної швидкості [21]:

$$\varphi_{opt} = \frac{30 \cdot v_{opt}}{\pi \cdot R}, \tag{1}$$

де R – дальність польоту струменя, м; v<sub>opt</sub> – оптимальна частота обертання апарата, м/с.

Тобто при частоті обертання менше, чим 0,55 хв.<sup>-1</sup> не буде згину струменя.

Середню інтенсивність дощу визначимо за формулою [21]:

$$\rho_{сep} = \frac{60 \cdot Q}{\pi \cdot R^2}, \tag{2}$$

де Q – витрата води, л/с; R – дальність польоту струменя, м.

Параметри і характер розпаду струменя на краплі визначають за відношенням напору до діаметра сопла (H/d), як розпад струменя на дрібні краплі [21].

Гідравлічний розрахунок спринклерної системи проводимо для встановлення діаметрів магістрального та розподільчих трубопроводів, швидкості руху води та втрат напору в трубопроводах

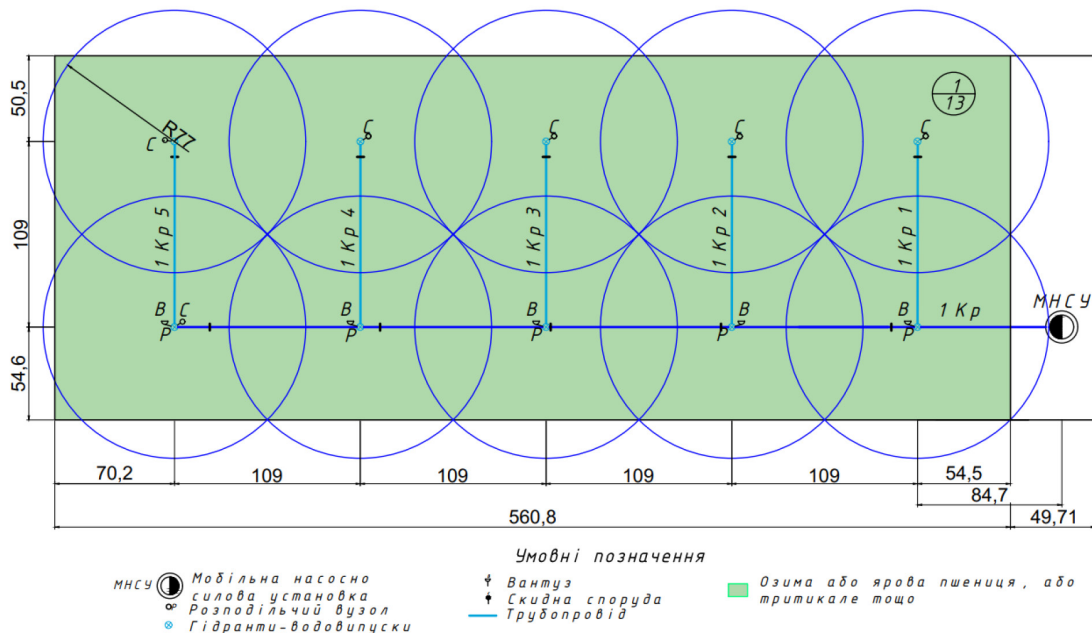


Рис. 1. Розрахункова схема спринклерної системи

з високощільного поліетилену. За відсутності топографічної зйомки різницю висот приймаємо умовно.

Розрахунковий діаметр трубопроводу визначається за формулою [21]:

$$d = 1000 \sqrt{\frac{4Q}{\delta v}}, \quad (3)$$

де  $Q$  – витрата води в трубопроводі, м<sup>3</sup>/с;  $v$  – оптимальна швидкість руху води, м/с.

Швидкість води в поліетиленових трубах приймається рівною 2 м/с. Мінімально допустиме значення цієї швидкості зумовлене недопущенням замулення труб наносами. Збільшення швидкості дозволяє зменшити діаметр труб, а значить, і їх вартість, але збільшує напір.

Витрати води в трубопроводі визначається [21]:

$$Q = \frac{q}{S} \cdot n, \quad (4)$$

де  $q$  – витрати води спринклером, л/с;  $S$  – площа зрошення, га;  $n$  – кількість працюючих трубопроводів, шт.

Приймаємо найближчий стандартний діаметр трубопроводу, що становить 225 мм, з товщиною стінки 10,8 мм.

Швидкість руху води визначається за формулою [21]:

$$v_{cep} = \frac{4Q}{\pi d_{cm}^2}, \quad (5)$$

де  $d_{cm}$  – стандартний внутрішній діаметр трубопроводу, м.

Уточнюємо швидкість руху води за формулою (5).

Отримана уточнена швидкість 1,84 м/с знаходиться в рекомендованому діапазоні швидкостей 1–3 м/с та більше аніж допустима швидкість на замулювання 0,2–0,3 м/с.

Втрати напору по довжині трубопроводу визначаємо за рівнянням [21]:

$$h_l = \lambda \frac{v_{cep}^2 \cdot l}{2 \cdot g \cdot d_{cm}}, \quad (6)$$

де  $l$  – витрати води спринклером, л/с;  $v_{cep}$  – площа зрошення, га;  $d_{cm}$  – кількість працюючих трубопроводів, шт;  $g$  – швидкість вільного падіння,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $\lambda$  – гідравлічний коефіцієнт тертя.

Втрати напору на подолання місцевих опорів приймаємо як для гідравлічнодовгих трубопроводів, тобто  $h_M = 0,1h_s$ , м [21].

Загальні втрати напору в трубопроводі визначимо як суму втрат по довжині та місцевих, тобто  $h_W = 1,1 \cdot h_s$ , м.

На підставі гідравлічного розрахунку трубопроводів зрошувальної системи на умовно прийнятій карті хвостосховища № 1, обрано застосування спринклерів діаметром 32 мм у кількості 10 шт. Зрошувальна система запроектована з труб поліетиленових

Ду 225 мм (загальна довжина 1065,68 м), Ду 315 мм (загальна довжина 411,68 м), Ду 450 мм (загальна довжина 581,04 м). Реалізація проекту спринклерної системи може забезпечити полив карти (за необхідності цілодобово) зрошувальною нормою 20 м<sup>3</sup>/га за умови як ввімкнення всіх розприскувачів одночасно, так і, за потреби, по чергово.

Проведені розрахунки підтверджують можливість використання спринклерних систем для дозволення карт хвостосховищ та створення більш сприятливих умов для їх озеленення. Для більш детального проектування спринклерної системи рекомендується використовувати більш точні фактичні дані відповідних технічних завдань.

### ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Впровадження спринклерної системи поливу є ключовим елементом для забезпечення стійкості зелених насаджень таких, як озиме жито і озиме триликале, висаджених на сухих картах хвостосховищ.

Регулярний полив озимих культур забезпечує оптимальний рівень вологи для росту рослин. Крім того, можливість внесення добрив через зрошувальну систему сприяє активному розвитку кореневої системи, що в свою чергу зміцнює поверхню сухих карт хвостосховищ. Рослинний покрив виступає природним бар'єром, який ефективно утримує пилові частки та запобігає їх розповсюдженню.

Підтримка належного зволоження через зрошення допомагає зберегти структурну цілісність рослинного шару.

Після завершення вегетаційного періоду рослин доцільно провести розпилення спеціальними реагентами, які утворюють захисний шар, що фіксує ґрунтовий покрив та сприяє утриманню пилових часток, навіть за умов впливу вітру і сухого повітря.

Комбінування таких пилопригнічуючих заходів, як монтаж зрошувальної системи, високоякісного поливу озимих культур з можливістю додавання мікродобрив та розпилення реагенту створює комплексний захисний механізм. Такий інтегрований підхід гарантує довгострокову стабільність сухої поверхні хвостосховища.

### ВИСНОВКИ

Виконані аналітичні дослідження підтвердили, що застосування спринклерних систем може забезпечити рівномірний розподіл води на зрошуваних площах карт хвостосховищ. Можливість підбору оптимальних параметрів роботи спринклера забезпечує мінімальні втрати води через випаровування та рівномірний розподіл навіть у складних погодних умовах.

Розбірна закрита мережа може адаптуватись до умов промислових територій, в тому числі враховуючи особливості місцевості.

Впровадження спринклерної системи поливу дозволить забезпечити належне зволоження карт хвостосховищ, що сприятиме сталому використанню «зелених» методів закріплення пилових поверхонь. Додатково, подібні мережі можуть розглядатись як системи подання закріплюючих розчинів на відкриті

пилові поверхні, що потребує подальших науково-практичних досліджень.

Таким чином, спринклерні системи ефективно розглядати як складову комбінованого підходу для закріплення пилових поверхонь накопичувачів рідких багатотонажних відходів.

## REFERENCES

- [1] Basilu, A. M., Deguchi, Y., Nlandu, R. N., Eitoku, M., Hirota, R., & Suganuma, N. (2015). Selenium and exposure to fibrogenic mineral dust: A mini-review, *Environment International*, Volume 77, Pages 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.01.002>
- [2] Domnichev, M. V., Malenko, Ya. V., Nehrii, T. O., & Shepelenko, R. M. (2021). Skorochennia vynosu pyly z poverkhon khvostoskhovyshch yak element pidhotovky do rekuityvatsii. [Reducing dust removal from tailing pond surfaces as part of preparation for reclamation]. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, № 1(48), 172–180. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2021-1-91-101>. [in Ukrainian].
- [3] Wise, J. & Al Dushaishi, M. (2024). Prediction of Soil Erosion Using 3D Point Scans and Acoustic Emissions. *Water*, 16, 1009. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16071009>
- [4] Domnichev, M. V., Malakhovskiy, M. I., Nehrii, T. O., Nesterenko, O. V., & Blyzniukova O. Yu. (2020). Provedennia biolohichnoi rekuityvatsii diiuchykh khvostoskhovyshch. [Biological reclamation of existing tailing dumps]. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, № 1, 172–180. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vdgi\\_2020\\_1\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vdgi_2020_1_19) (date of access: 12.07.2025). [in Ukrainian].
- [5] Blight, G. E. (2008). Wind Erosion of Waste Impoundments in Arid Climates and Mitigation of Dust Pollution. *Waste Management & Research*, 26, 523–533. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X07082027>
- [6] Slingerland, N., Sommerville, A., O’Leary, D., & Beier, N. (2018). Identification and quantification of erosion on a sand tailings dam. *Geosystem Engineering*, 23, 3, 131–145. DOI: <https://doi.org/10.1080/12269328.2018.1538823>
- [7] Duarte, J., Castelo Branco, J., Rodrigues, F., Vaz, M., & Santos Baptista, J. (2022). Occupational Exposure to Mineral Dust in Mining and Earthmoving Works: A Scoping Review. *Safety*, 8(1), 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/safety8010009>
- [8] Duarte, J., Vaz, M., Tóres Costa, J., & Baptista, J. (2019). Occupational exposure to dust in the mining industry context – a short review. DOI: [https://doi.org/10.24840/978-972-752-260-6\\_0022-0026](https://doi.org/10.24840/978-972-752-260-6_0022-0026)
- [9] Ivchuk, V. V. (2020). Riven profesiinnoi zakhvoriuvanosti u misti Kryvyi Rih za 2015–2019 roky [Occupational morbidity rate in Kryvyi Rih in 2015–2019] *Visnyk problem biolohii i medytsyny*, 3, № 157, 76–78. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5803774>. [in Ukrainian].
- [10] Tishyna, V. M. (2024). Ohliad skorochennia vynesennia pyly z poverkhon khvostoskhovyshch. [Overview of the reduction of dust from tailings surfaces]. *48-ma Naukovo-tekhnichna konferentsiia molodi z nahody 91-richchia PAT “Zaporizhstal”* (P. 46-48). Vydavnytstvo Oldi+. [in Ukrainian].
- [11] Domnichev, M. V., Nesterenko, O. V., & Blyzniukova, O. Yu. Obgruntuvannia vykorystannia rozchynu pryrodnoho bishofitu dlia obrobky pyliachykh poverkhon. [Rationale for the use of natural bischofite solution for the treatment of sawing surfaces]. Kryvyi Rih: Sinielnikov D. A., 2020. 111 p. Retrieved from: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/3098> (date of access: 12.07.2025). [in Ukrainian].
- [12] Kramarov, S. M., Bandura, L. P., Hulin, V. V., & Hulin, V. M. Zakriplennia poverkhon khvostoskhovyshch dlia pylopyrnychnennia tekhnosozemiv, zabrudnennykh promyslovymy vidkhodamy, sposobom vyroshchuvannia silskohospodarskykh kultur, stiikykh do povitrianoi ta gruntovoi posukhy v umovakh hostroho defitsytu rukhomykh form pozhyvnykh rehovyn : Naukovo-praktychnyi posibnyk. [Fixing the surfaces of tailing dumps for dust suppression of techno-soils contaminated with industrial waste by growing crops resistant to air and soil drought in conditions of acute shortage of mobile forms of nutrients]. Dnipro : TOV “Driant”, 2020. 57 p. [in Ukrainian].
- [13] Shvahr, N. Yu., Domnichev, M. V., Nesterenko, O. V., & Blyzniukova, O. Yu. (2018). Shliakhy skorochennia vynosu pyly z poverkhon diiuchykh khvostoskhovyshch. [Ways to reduce dust emissions from the surfaces of existing tailings facilities]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, № 3, 32–36. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebkrd\\_2018\\_3\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebkrd_2018_3_7) (date of access: 12.07.2025). [in Ukrainian].
- [14] Shchokin, V. P., Nalyvaiko, V. G., & Ezhov, V. V. (2018). Application of Leksol surfactant aqueous solution to bind the dust on quarries’ roads and reduce the dust emission during large-scale blasts. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8, № 1, 755–761. DOI: [https://doi.org/10.15421/2018\\_277](https://doi.org/10.15421/2018_277)
- [15] Nalyvaiko, V. H., & Losiev, K. V. (2018). Vykorystannia vodnoho rozchynu PAR «Leksol» dlia znyzhennia pylovydilennia na prykladni kariera PrAT “InHZK”. [Using an aqueous solution of Lexol surfactant to reduce dust emission on the example of the open pit of PJSC “Ingulets GZK”]. *Hirnychiy visnyk*, № 104, 121–125. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi\\_2018\\_104\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi_2018_104_27) (date of access: 12.07.2025). [in Ukrainian].
- [16] Nalyvaiko, V. H., & Konovaliuk, V. A. (2019). Doslidzhennia efektyvnosti zastosuvannia vodnoho rozchynu reahentu “Leksol” dlia pylopodavlenntia. [Study of the effectiveness of the use of an aqueous solution of the reagent “Lexol” for dust suppression]. *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohazopostachannia*, № 29, 43–49. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp\\_2019\\_29\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp_2019_29_8) (date of access: 12.07.2025). [in Ukrainian].

- [17] Hryhorieva L. I., & Tomilin Yu. A. Upravlinnia ryzykom deflatsiinykh yavlyshch na khvostokshovyshchakh u systemi ryzyk-menedzhmentu pererobnykh pidpriemstv : monohrafiia. [Managing the risk of deflationary phenomena in tailing dumps in the risk management system of processing enterprises]. Mykolaiv : Vyd-vo ChDU im. Petra Mohyly, 2016. 188 p. [in Ukrainian].
- [18] Tverda, O. Ya., Tkachuk, K. K., & Davydenko, Yu. A. (2016). Porivnialnyi analiz sposobiv minimizatsii pyloutvorennia z vidvaliv hranitnykh karieriv. [Comparative analysis of methods for minimising dust generation from granite quarry dumps]. *Skhidno-Yevropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii*, № 2(10), 40-46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.64840> [in Ukrainian].
- [19] Tyshchuk, V. Yu. (2014). Zakriplennia pylnykh poverkhon na hirnychykh pidpriemstvakh z vykorystanniam biotekhnolohii. [Fixing dusty surfaces at mining enterprises using biotechnology]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, № 37, 79–84. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu\\_2014\\_37\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2014_37_19) (date of access: 12.07.2025). [in Ukrainian].
- [20] Pohorilyi, V., Sydorenko, V., & Maliarchuk, V. (2024). Zastosuvannia suchasnykh robochykh orhaniv doshchuvalnykh mashyn yak zasib pokrashchennia yakosti doshchu ta minimizatsii yoho vplyvu na fizychni vlastyvoli ta strukturu grunt. [Application of modern working bodies of sprinklers as a means of improving the quality of rain and minimising its impact on the physical properties and structure of the soil]. *Zbirnyk naukovykh prats Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vuprobuvannia novoi tekhniki i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*, 34 (48), 29-46. DOI: [https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34\(48\)-3](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34(48)-3). [in Ukrainian].
- [21] Tkachenko S. Y., Stepanova N. D. Hidrohazodynamika (prykady i zadachi) : navchalnyi posibnyk. [Fluid dynamics (examples and problems)]. Vinnytskyi Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet. Vinnytsia : VNTU, 2012. 180 p. Retrieved from: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/tkachenko\\_gidro\\_gazo\\_dunamika/zmist.html](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/tkachenko_gidro_gazo_dunamika/zmist.html) (date of access: 12.07.2025). [in Ukrainian].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Basilua, A. M., Deguchi, Y., Nlandu, R. N., Eitoku, M., Hirota, R., & Suganuma, N. (2015). Selenium and exposure to fibrogenic mineral dust: A mini-review, *Environment International*, Volume 77, Pages 16-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.01.002>
- [2] Домнічев, М. В., Маленко, Я. В., Негрій, Т. О., & Шепеленко, Р. М. (2021). Скорочення виносу пилу з поверхонь хвостосховищ як елемент підготовки до рекультивації. *Вісті Донецького гірничого інституту*, Вип. № 1(48), С. 172–180. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2021-1-91-101>
- [3] Wise, J. & Al Dushaishi, M. (2024). Prediction of Soil Erosion Using 3D Point Scans and Acoustic Emissions. *Water*, 16, 1009. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16071009>
- [4] Домнічев, М. В., Малаховський, М. І., Негрій, Т. О., Нестеренко, О. В., & Близнюкова О. Ю. (2020). Проведення біологічної рекультивації діючих хвостосховищ. *Вісті Донецького гірничого інституту*, № 1, С. 172–180. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vdgi\\_2020\\_1\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vdgi_2020_1_19) (дата звернення: 12.07.2025).
- [5] Blight, G. E. (2008). Wind Erosion of Waste Impoundments in Arid Climates and Mitigation of Dust Pollution. *Waste Management & Research*, Vol (26), P. 523–533. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X07082027>
- [6] Slingerland, N., Sommerville, A., O’Leary, D., & Beier, N. (2018). Identification and quantification of erosion on a sand tailings dam. *Geosystem Engineering*, 23, 3, 131–145. DOI: <https://doi.org/10.1080/12269328.2018.1538823>
- [7] Duarte, J., Castelo Branco, J., Rodrigues, F., Vaz, M., & Santos Baptista, J. (2022). Occupational Exposure to Mineral Dust in Mining and Earthmoving Works: A Scoping Review. *Safety*, 8(1), 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/safety8010009>
- [8] Duarte, J., Vaz, M., Tórees Costa, J., & Baptista, J. (2019). Occupational exposure to dust in the mining industry context – a short review. DOI: [https://doi.org/10.24840/978-972-752-260-6\\_0022-0026](https://doi.org/10.24840/978-972-752-260-6_0022-0026)
- [9] Івчук, В. В. (2020). Рівень професійної захворюваності у місті Кривий Ріг за 2015–2019 роки. *Вісник проблем біології і медицини*, Вип. 3, № 157, С. 76–78. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5803774>
- [10] Тишина, В. М. (2024). Огляд скорочення винесення пилу з поверхонь хвостосховищ. *48-ма Науково-технічна конференція молоді з нагоди 91-річчя ПАТ «Запоріжсталь»* (С. 46–48). Видавництво Олді+.
- [11] Домнічев, М. В., Нестеренко, О. В., & Близнюкова, О. Ю. Обґрунтування використання розчину природного бішофіту для обробки пилячих поверхонь. Кривий Ріг: Сінельников Д. А., 2020. 111 с. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/3098> (дата звернення: 27.12.2024).
- [12] Крамарьов, С. М., Бандура, Л. П., Гулін, В. В., & Гулін, В. М. Закріплення поверхонь хвостосховищ для пилопригнічення техноземів, забруднених промисловими відходами, способом вирощування сільськогосподарських культур, стійких до повітряної та ґрунтової посухи в умовах гострого дефіциту рухомих форм поживних речовин : Науково-практичний посібник. Дніпро : ТОВ «Дріант», 2020. 57 с.
- [13] Швагер, Н. Ю., Домнічев, М. В., Нестеренко, О. В., & Близнюкова, О. Ю. (2018). Шляхи скорочення виносу пилу з поверхонь діючих хвостосховищ. *Екологічна безпека та природокористування*, Вип. №3, С. 32–36. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebkrd\\_2018\\_3\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebkrd_2018_3_7) (дата звернення: 12.07.2025).
- [14] Shchokin, V. P., Nalyvaiko, V. G., & Ezhov, V. V. (2018). Application of Leksol surfactant aqueous solution to bind the dust on quarries’ roads and reduce the dust emission during large-scale blasts. *Ukrainian Journal of Ecology*, Vol. 8, No. 1, P. 755–761. DOI: [https://doi.org/10.15421/2018\\_277](https://doi.org/10.15421/2018_277)

- [15] Наливайко, В. Г., & Лосьєв, К. В. (2018). Використання водного розчину ПАР «Лексол» для зниження пиловиділення на прикладі кар'єра ПрАТ «ІнГЗК». *Гірничий вісник*, Вип. №104, С. 121–125. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi\\_2018\\_104\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi_2018_104_27) (дата звернення: 12.07.2025).
- [16] Наливайко, В. Г., & Коновалюк, В. А. (2019). Дослідження ефективності застосування водного розчину реагенту «Лексол» для пилоподавлення. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, Вип. № 29, С. 43–49. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/votr\\_2019\\_29\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/votr_2019_29_8) (дата звернення: 12.07.2025).
- [17] Григор'єва Л. І., & Томілін Ю. А. Управління ризиком дефляційних явищ на хвостосховищах у системі ризик-менеджменту переробних підприємств : монографія. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. 188 с.
- [18] Тверда, О. Я., Ткачук, К. К., & Давиденко, Ю. А. (2016). Порівняльний аналіз способів мінімізації пилоутворення з відвалів гранітних кар'єрів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, №2(10), С. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.64840>
- [19] Тишук, В. Ю. (2014). Закріплення пильних поверхонь на гірничих підприємствах з використанням біотехнологій. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, Вип. № 37, С. 79–84. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu\\_2014\\_37\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2014_37_19) (дата звернення: 12.07.2025).
- [20] Погорілий, В., Сидоренко, В., & Малярчук, В. (2024). Застосування сучасних робочих органів дощувальних машин як засіб покращення якості дощу та мінімізації його впливу на фізичні властивості та структуру ґрунту. *Збірник наукових праць Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, Вип. 34 (48), С. 29–46. DOI: [https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34\(48\)-3](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34(48)-3)
- [21] Ткаченко С. Й., Степанова Н. Д. Гідрогазодинаміка (прикладні задачі) : навчальний посібник. Вінницький Національний Технічний Університет. Вінниця : ВНТУ, 2012. 180 с. URL: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/tkachenko\\_gidro\\_gazo\\_dunamika/zmist.html](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/tkachenko_gidro_gazo_dunamika/zmist.html) (дата звернення: 12.07.2025).

© Тішина В. М., Максимова Н. М.

Дата надходження статті до редакції: 15.07.2025

Дата затвердження статті до друку: 30.07.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0