

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Факультет водогосподарської інженерії та екології
Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля

Освітньо-кваліфікаційний рівень «бакалавр»
Спеціальність – 183 Технології захисту навколишнього середовища
Освітньо-професійна програма «Технології захисту навколишнього середовища»

Затверджую:
Завідувач кафедри цивільної інженерії,
технологій будівництва і захисту довкілля
д.т.н., професор _____ В. Є. Волкова
«_____» _____ 2026 р.

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи на тему:

«Оцінка та шляхи зниження антропогенного впливу на
довкілля накопичувача шахтних вод у балці Свистунова»

Виконав здобувач вищої освіти
групи ТЗНС-1-22

_____ Мирослава ЄРЬОМІНА
(підпис)

Керівник

_____ Геннадій ГАПЧ
(підпис)

Дніпро 2026

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
 Факультет водогосподарської інженерії та екології
 Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля

Освітньо-кваліфікаційний рівень «бакалавр»
 Спеціальність – 183 Технології захисту навколишнього середовища
 Освітньо-професійна програма «Технології захисту навколишнього середовища»

Затверджую:
 Завідувач кафедри цивільної інженерії,
 технологій будівництва і захисту довкілля
 д.т.н., професор _____ В. Є. Волкова
 « _____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу здобувачі вищої освіти
Єрьоміній Мирославі Володимирівні
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1) Тема роботи: «Оцінка та шляхи зниження антропогенного впливу на довкілля накопичувача шахтних вод у балці Свистунова» затверджена наказом ректора від «12» березня 2026 р. №515.

2) Термін здачі закінченої роботи: «15» червня 2026 р.

3) Вихідні дані до роботи: довідниково-літературні джерела, загальні відомості про екологічний та технічний стан накопичувача шахтних вод у балці Свистунова.

4) Зміст розрахунково-пояснювальної записки: 1. Екологічні аспекти впливу гірничодобувної діяльності на компоненти довкілля; 2. Методичні підходи до мінімізації негативного впливу накопичувача у балці Свистунова; 3. Проєкт заходів та розрахунки технологічних параметрів мінімізації негативного впливу високомінералізованих шахтних вод на довкілля; 4. Еколого-економічна оцінка запроєктованих рішень; 5. Охорона праці та екологічна безпека Вступ; Висновки; Список літератури.

5) Перелік графічного матеріалу: презентація кваліфікаційної роботи у програмному середовищі Microsoft PowerPoint.

Керівник роботи _____ (Геннадій ГАПІЧ)
 (підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ (Мирослава ЄРЬОМІНА)
 (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з. п.	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	1. Екологічні аспекти впливу гірничодобувної діяльності на компоненти довкілля	березень 2026 р.	
2	2. Методичні підходи до мінімізації негативного впливу накопичувача у балці Свистунова	квітень 2026 р.	
3	3. Проєкт заходів та розрахунки технологічних параметрів мінімізації негативного впливу високо-мінералізованих шахтних вод на довкілля	травень 2026 р.	
4	4. Еколого-економічна оцінка запроєктованих рішень	травень 2026 р.	
5	5. Охорона праці та екологічна безпека	червень 2026 р.	
6	Вступ, Висновки, Список літератури	червень 2026 р.	
7	Підготовка презентації, попередній захист кваліфікаційної роботи на кафедрі	червень 2026 р.	

Керівник роботи _____ (Геннадій ГАПЧ)
(підпис)

Здобувач вищої освіти _____ (Мирослава ЄРЬОМІНА)
(підпис)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	7
1. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВПЛИВУ ГІРНИЧОДОБУВНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА КОМПОНЕНТИ ДОВКІЛЛЯ	10
1.1. Проблема накопичення відходів у гірничодобувних регіонах світу та їх негативний вплив на екологічну безпеку	10
1.2. Проблеми накопичення хвостів, шламів, високомінералізованих шахтних вод та відходів Кривбасу	14
1.3. Узагальнення наявних даних та проблем екологічної небезпеки балки Свистунова	21
1.4. Передовий світовий та український досвід мінімізації негативного впливу об'єктів накопичення відходів на довкілля	26
2. МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НАКОПИЧУВАЧА У БАЛЦІ СВИСТУНОВА	30
2.1. Методологія проектування протифільтраційної завіси в тілі та основі гідротехнічної споруди методом ін'єкційного тампонажу	30
2.2. Методологічні підходи до впровадження технологій демінералізації шахтних вод та ресурсозберігаючого управління водним балансом	35
3. ПРОЄКТ ЗАХОДІВ ТА РОЗРАХУНКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ ШАХТНИХ ВОД НА ДОВКІЛЛЯ	39
3.1. Розрахунок параметрів протифільтраційної завіси та технологія її влаштування	39
3.2. Обґрунтування та розрахунок параметрів установки демінералізації шахтних вод та автономної сонячної електростанції	43

4. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПРОЄКТОВАНИХ РІШЕНЬ	48
4.1. Оцінка екологічних збитків та податкового навантаження від функціонування накопичувача	48
4.2. Розрахунок вартості влаштування протифільтраційної завіси .	49
4.3. Витрати на комплекс демінералізації шахтних вод та улаштування сонячної електростанції	50
4.4. Розрахунок операційних витрат, економічного ефекту та терміну окупності проєкту	51
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА	54
5.1. Охорона праці і безпека при будівництві протифільтраційної завіси	54
5.2. Охорона праці та безпека при будівництві і експлуатації сонячної електростанції	56
5.3. Підвищення рівня екологічної безпеки прилеглих територій, поверхневих і підземних вод в зоні впливу балки Свистунова	57
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	62

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи викладена на 63 сторінках комп'ютерного тексту, містить 4 рисунки, 12 таблиць. Список літератури включає 12 найменувань.

Мета дослідження: оцінка екологічної небезпеки та розробка комплексних технологічних, інженерних та еколого-економічних заходів щодо зниження антропогенного впливу ставка-накопичувача шахтних вод у балці Свистунова на навколишнє природне середовище.

Об'єкт дослідження: процес антропогенного впливу ставка-накопичувача високомінералізованих шахтних вод у балці Свистунова на компоненти навколишнього природного середовища.

Предмет дослідження: методи, технології та інженерно-екологічні заходи мінімізації негативного впливу об'єкта накопичення промислових стоків на літосферу, поверхневі та підземні водні ресурси.

Ключові слова: *шахтні води, ставок-накопичувач, балка Свистунова, екологічна безпека, протифільтраційна завіса, зворотний осмос, вакуум-випарна кристалізація, сонячна електростанція, еколого-економічна ефективність.*

ВСТУП

Гірничодобувна промисловість є одним із найпотужніших факторів антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище, що супроводжується масштабним порушенням літосфери, гідросфери, атмосфери та біосфери. Головною екологічною проблемою галузі є безперервне лавиноподібне накопичення десятків мільярдів тон твердих та рідких відходів. Складування розкритих порід, хвостів збагачення, шлаків та високомінералізованих вод вимагає відчуження колосальних площ земель та формування техногенних ландшафтів, які стають осередками довготривалого забруднення довкілля. Антропогенний вплив проявляється у розвитку кислотного дренажу, сольовому та хімічному забрудненні водних горизонтів важкими металами, руйнуванні осмотичного балансу гідробіотів, замуленні річок, а також в інтенсивній вітровій ерозії ґрунту. Зазначені фактори зумовлюють гостру необхідність забезпечення глобальної екологічної безпеки через перехід до технологій закритого циклу водовикористання, демінералізації промислових стоків та надійної консервації місць видалення відходів.

Ця проблематика є надзвичайно актуальною для Криворізького залізничного басейну (Кривбасу) – одного з найбільших гірничопромислових регіонів Європи, де за тривалий період промислового освоєння накопичено майже 4 мільярди кубічних метрів промислових відходів, а площа техногенних утворень перевищує 12 тисяч гектарів. Однією з найгостріших і багаторічних проблем Кривбасу є відкачування та утилізація високомінералізованих шахтних вод із великих глибин (від 800 до 1350 метрів). Існуюча схема поводження з цими стоками передбачає їх акумуляцію у ставку-накопичувачі в балці Свистунова з подальшим скиданням у річку Інгулець у міжвегетаційний період. Багаторічна експлуатація об'єкта призвела до повної трансформації гідрохімічного режиму поверхневих артерій, зміни типу води в Інгульці на метаморфізований та перевищення нормативів вмісту токсичних

мікрокомпонентів. Крім того, інфільтраційні витoki з накопичувача балки Свистунова викликають критичне підняття рівнів підземних вод, інтенсивне хімічне розчинення вапняків, карстоутворення та суфозію, що вже провокувало катастрофічні геотектонічні зсуви. Постійна загроза переповнення стоками та прориву греблі створює ризик масштабної екологічної катастрофи для всього регіону. Це зумовлює нагальну необхідність розробки інноваційних інженерно-технологічних та ресурсозберігаючих рішень для локалізації та очищення шахтних вод балки Свистунова.

Мета дослідження: оцінка екологічної небезпеки та розробка комплексних технологічних, інженерних та еколого-економічних заходів щодо зниження антропогенного впливу ставка-накопичувача шахтних вод у балці Свистунова на навколишнє природне середовище.

Задачі дослідження:

- 1) Проаналізувати екологічні аспекти впливу гірничодобувної діяльності на компоненти довкілля та загальні проблеми накопичення відходів, хвостів, шламів і високомінералізованих вод у світі та в умовах Кривбасу.
- 2) Узагальнити наявні дані щодо техніко-екологічного стану ставка-накопичувача у балці Свистунова та оцінити супутні гідрогеологічні й геомеханічні загрози.
- 3) Дослідити передовий світовий та український досвід мінімізації негативного впливу об'єктів накопичення відходів, включаючи технології «нульового рідкого скиду» та системи ресурсозберігаючого управління.
- 4) Обґрунтувати методологію проектування протифільтраційної завіси методом ін'єкційного тампонажу та розробити комбіновану схему демінералізації шахтних вод.
- 5) Розрахувати конструктивні й технологічні параметри протифільтраційної завіси в тілі та основі гідротехнічної споруди балки Свистунова.
- 6) Визначити основні параметри модульної установки демінералізації шахтних вод та обґрунтувати характеристики автономної сонячної електростанції для її часткового живлення.

- 7) Провести еколого-економічну оцінку запроєктованих рішень із розрахунком капітальних, операційних витрат, річного економічного ефекту та терміну окупності інвестицій.
- 8) Розробити заходи з охорони праці, промислової та екологічної безпеки при будівництві й експлуатації запроєктованих споруд.

Об'єкт дослідження: процес антропогенного впливу ставка-накопичувача високомінералізованих шахтних вод у балці Свистунова на компоненти навколишнього природного середовища.

Предмет дослідження: методи, технології та інженерно-екологічні заходи мінімізації негативного впливу об'єкта накопичення промислових стоків на літосферу, поверхневі та підземні водні ресурси.

1. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВПЛИВУ ГІРНИЧОДОБУВНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА КОМПОНЕНТИ ДОВКІЛЛЯ

1.1. Проблема накопичення відходів у гірничодобувних регіонах світу та їх негативний вплив на екологічну безпеку

Гірничодобувна промисловість історично є однією з фундаментальних основ розвитку людської цивілізації, забезпечуючи сировинну базу для енергетики, металургії, будівництва та високотехнологічних галузей економіки. Проте інтенсифікація видобутку корисних копалин у глобальному масштабі перетворила цю галузь на один з найпотужніших факторів антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище. У всьому світі видобуток мінеральної сировини супроводжується масштабним порушенням літосфери, гідросфери, атмосфери та біосфери загалом [1-7].

Головною екологічною проблемою гірничодобувних регіонів є безперервне та лавиноподібне накопичення відходів. За оцінками міжнародних природоохоронних організацій, щорічно у світі утворюються десятки мільярдів тон твердих та рідких відходів. Це зумовлено тим, що для отримання кінцевого корисного продукту (особливо металевих руд) необхідно вилучити та переробити величезні обсяги гірської маси. Відходи гірничодобувної галузі поділяються на кілька основних категорій: розкривні породи (пуста порода, що вилучається для доступу до рудного тіла), відходи збагачення (хвости), металургійні шлаки, а також високомінералізовані кар'єрні та шахтні води.

Складування цих відходів вимагає відчуження колосальних площ земельних угідь, які назавжди вилучаються з біологічного та сільськогосподарського обігу. На місці лісових чи степових екосистем формуються так звані «техногенні ландшафти» – гігантські відвали, терикони,

хвостосховища та ставки-накопичувачі. Ці об'єкти не лише кардинально змінюють рельєф місцевості, але й стають осередками довготривалого та інтенсивного забруднення довкілля (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Схема комплексного впливу об'єктів гірничодобувної промисловості на компоненти довкілля

Одним із найнебезпечніших наслідків накопичення відходів є їхній вплив на гідросферу. Хімічне забруднення поверхневих та підземних вод відбувається переважно через процеси вилугування та окиснення. Найбільш відомим та руйнівним феноменом є кислотний дренаж шахт. Цей процес виникає внаслідок взаємодії сульфідних мінералів (наприклад, піриту або піротину), які удосталь містяться у відвалах та хвостосховищах, з атмосферним киснем та водою. У результаті біогеохімічних реакцій, які часто каталізуються специфічними бактеріями, утворюється розчин сульфатної кислоти. Кисле середовище, своєю чергою, сприяє інтенсивному розчиненню та мобілізації важких металів (свинцю, міді, цинку, кадмію, миш'яку) з гірських порід.

Крім кислотного дренажу, значною проблемою є сольове забруднення. Високомінералізовані інфільтрати з відвалів та ставків-накопичувачів просочуються у підземні водоносні горизонти, роблячи їх непридатними для питного водопостачання та зрошення. Потрапляючи у поверхневі річкові системи, такі води порушують осмотичний баланс гідробіонтів, що призводить до масової загибелі риби та деградації річкових екосистем (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Типові забруднювачі, що утворюються внаслідок складування гірничопромислових відходів у світі

Тип забруднення	Основні хімічні компоненти	Джерело утворення	Вплив на довкілля
Кислотне	H_2SO_4 , Fe, Cu, Zn, Pb, As	Окиснення сульфідних мінералів у відвалах та хвостосховищах	Зниження рН водойм, загибель флори і фауни, токсичне ураження ґрунтів
Сольове	Хлориди, сульфати, Na, Mg, Ca	Вилуговування порід, скид шахтних вод	Засолення підземних вод, непридатність води для пиття та зрошення
Механічне	Тонкодисперсні завислі речовини (шлами)	Розмив дамб хвостосховищ, водна ерозія відвалів	Замулення русел річок, знищення нерестовищ, підвищення каламутності

Окремо слід виділити проблему геодинамічної та фізичної стійкості місць накопичення відходів. Хвостосховища являють собою складні гідротехнічні споруди, огорожені дамбами, які часто наминаються з тих самих відходів збагачення (хвостів). Накопичення величезних мас водонасичених тонкодисперсних ґрунтів створює надмірне статичне та динамічне навантаження на геологічне середовище. У разі порушення технології складування, екстремальних погодних умов або сейсмічної активності виникає загроза прориву дамб.

Аварії на хвостосховищах, що періодично стаються в різних країнах світу (наприклад, трагедії в Брумадіньо та Маріані у Бразилії, аварія на шахті Маунт-

Поллі в Канаді), демонструють катастрофічні наслідки неконтрольованого накопичення відходів. Прорив дамби призводить до утворення потужних селевих потоків, які миттєво знищують населені пункти, інфраструктуру та екосистеми на десятки кілометрів вниз за течією. Токсичний мул покриває родючі землі, перетворюючи їх на мертві пустелі на багато десятиліть.

Крім впливу на гідросферу, відходи гірничого виробництва є потужним джерелом забруднення атмосфери. Сухі поверхні хвостосховищ та відвалів, що не закріплені рослинністю, піддаються інтенсивній вітровій ерозії. Дрібнодисперсний пил, який часто містить токсичні елементи, розноситься вітром на великі відстані, осідаючи на сільськогосподарських угіддях, у населених пунктах та на поверхні водойм. Це не лише погіршує якість ґрунтів, але й становить пряму загрозу здоров'ю населення, викликаючи респіраторні захворювання.

Таким чином, загальносвітова практика свідчить, що управління відходами гірничодобувної промисловості є критично важливим аспектом глобальної екологічної безпеки. Без впровадження новітніх технологій утилізації, демінералізації вод та надійної консервації відвалів, гірничодобувні регіони приречені на поступову деградацію природного середовища та вичерпання чистих водних ресурсів.

Додатково варто зазначити, що у багатьох регіонах світу, де гірничодобувна промисловість відіграє ключову роль в економіці, спостерігається тенденція до створення так званих зон екологічного лиха. Довгостроковий вплив відходів на локальні екосистеми призводить до суттєвого зменшення біорізноманіття, знищення природних ареалів мешкання видів та порушення харчових ланцюгів. Це, у свою чергу, негативно позначається на місцевих громадах, чий добробут часто залежить від сільського господарства та природних ресурсів. Рекультивація порушених земель є складним та високовартісним процесом, що потребує багаторічних зусиль та залучення інноваційних наукових підходів до відновлення деградованих ґрунтів та рослинного покриву. У світовій практиці все більше уваги приділяється концепції сталого розвитку гірничодобувної галузі, яка

передбачає максимальну переробку відходів, перехід до технологій закритого циклу водовикористання та мінімізацію впливу на довкілля на всіх етапах життєвого циклу підприємства – від розвідки родовищ до їх ліквідації.

Наслідки акумуляції шламів та пустих порід мають і соціально-економічний вимір. Значні території, які могли б використовуватися для розвитку інфраструктури, сільського господарства або рекреаційних зон, виявляються заблокованими на десятиліття. Вартість ліквідації екологічних наслідків діяльності часто перевершує економічні вигоди, отримані в період активного видобутку. Крім того, наявність масштабних техногенних об'єктів поблизу населених пунктів викликає занепокоєння місцевого населення, знижує інвестиційну привабливість регіонів та часто стає причиною соціальних конфліктів. Міжнародний досвід демонструє, що ігнорування екологічних стандартів на етапі проектування та експлуатації місць видалення відходів обертається непомірним тягарем для майбутніх поколінь, вимагаючи мільярдних інвестицій у програми екологічного відновлення.

1.2. Проблеми накопичення хвостів, шламів, високомінералізованих шахтних вод та відходів Кривбасу

Криворізький залізорудний басейн (Кривбас) є одним з найбільших та найстаріших гірничопромислових регіонів не лише України, але й Європи. За більш ніж 130-річну історію інтенсивного промислового освоєння надр тут відбулися масштабні і багато в чому незворотні зміни геологічного, гідрологічного та екологічного середовища. На сьогоднішній день у межах басейну відомо близько 300 родовищ багатих залізних руд, які об'єднані у 25 великих родовищ. З початку розробки з надр Кривбасу було видобуто понад 5,5 мільярдів тон залізної руди [1-7].

Сучасний видобуток корисних копалин у Криворіжжі ведеться переважно відкритим (кар'єрним) та підземним (шахтним) способами з обов'язковим водовідливом. П'ять нині діючих гірничо-збагачувальних комбінатів (Північний, Центральний, Південний, Новокриворізький та Інгулецький) здійснюють видобуток руди у 9 гігантських кар'єрах, глибина яких перевищує 300 метрів, а загальна площа становить близько 6 тисяч гектарів. Оскільки значна частина сировини представлена так званими «бідними» рудами (залізистими кварцитами з вмістом заліза від 17% до 42%), вона потребує складного технологічного збагачення для отримання концентрату з вмістом заліза 65-68%.

Така технологія неминуче призводить до утворення колосальних обсягів відходів. За статистичними даними, видобуток та збагачення 1 тони сирої руди супроводжується утворення від 3 до 4 тон відходів. Ці відходи складуються у відвалах розкривних порід та у гігантських хвостосховищах. Станом на сьогодні у геоспорудах Кривого Рогу накопичено майже 4 мільярди кубічних метрів промислових відходів. Площа, зайнята цими техногенними утвореннями, перевищує 12 тисяч гектарів, з яких 5 тисяч гектарів знаходяться під відвалами, а понад 7 тисяч гектарів зайняті хвостосховищами [1-7].

Однією з найгостріших та багаторічних проблем Кривбасу є відкачування та утилізація підземних (шахтних та кар'єрних) вод. Особливість геологічної будови регіону полягає в тому, що підземні води, які відкачуються з великих глибин (від 800 до 1350 метрів), мають аномальний хімічний склад та надзвичайно високу мінералізацію, що місцями досягає 160 г/л (як, наприклад, на шахті «Батьківщина»).

Для утилізації цих вод у Кривбасі склалася специфічна схема. З шахт південної групи щорічно відкачується 12-13 мільйонів кубічних метрів води, яка спрямовується у спеціальні ставки-накопичувачі (зокрема, у балці Свистунова) для тимчасової акумуляції та подальшого скидання у річку Інгулець у міжвегетаційний період. З шахт північної групи відкачується 3,0-4,0 мільйони кубічних метрів води на рік, яка скидається у хвостосховище

Північного гірничо-збагачувального комбінату (ПівнГЗК), де вона використовується у циклах оборотного водопостачання підприємства.

Таке поводження з високомінералізованими водами призвело до формування масштабних гідрохімічних аномалій на земній поверхні. Наприклад, у ставку оборотного водопостачання Північного ГЗК, площа якого становить 315 га (в межах загального хвостосховища площею 1295 га), мінералізація води невинно зростає. За даними досліджень, станом на 2020 рік мінералізація досягла 23,4 г/л (вода хлоридно-натрієвого типу Cl-Na). Математичне моделювання показує лінійний тренд зростання мінералізації: при збереженні існуючого режиму скидання шахтних вод солоність води у ставку зростатиме приблизно на 340 мг/л щороку. Окрім високого солевмісту, вода хвостосховищ характеризується підвищеним вмістом токсичних мікрокомпонентів: свинцю, кадмію, ванадію, марганцю, бору, бромю, нікелю, ртуті та тіоціанатів.

Інтенсивна виробнича діяльність призвела до повної трансформації гідрологічного та гідрохімічного режимів річок регіону. Річка Саксагань, яка є лівою притокою Інгульця, зазнала суттєвих змін. Через розширення кар'єрів її русло було штучно перенаправлене у підземний тунель довжиною 5,32 км. Багаторічні спостереження (з 1980 по 2020 роки) свідчать про постійне зростання мінералізації води у річці. На ділянках, прилеглих до Північного ГЗК, мінералізація зросла з 1,1 г/л (1980 рік) до 4,2 г/л (2020 рік) у струмку Мотина, та з 1,7 г/л до 5,4 г/л на першому водомірному посту (табл. 1.2).

Річка Інгулець також зазнала радикальних змін. До 1993 року шахтні води скидалися безпосередньо в річку в обсягах 40-60 млн кубічних метрів щорічно. Згодом була запроваджена схема «скид-промивка»: у зимовий період надлишки шахтних вод зі ставка-накопичувача балки Свистунова скидаються в русло Інгульця, а навесні та влітку річка промивається прісною водою з Карачунівського водосховища (через канал Дніпро-Інгулець). Цей регламент призвів до відсутності будь-яких природних закономірностей у зміні хімічного складу води. Тип води в Інгульці трансформувався з річкового (II тип) у

метаморфізований (III тип). Концентрація мікрокомпонентів, таких як ванадій, бор та бром, у воді Інгульця перевищує гранично допустимі норми у 7-8 разів.

Таблиця 1.2 – Динаміка зміни мінералізації води у річці Саксагань протягом 1980-2020 рр.

Пункт спостереження на р. Саксагань	Мінералізація води, г/л		Гідрохімічний тип води	
	1980 р.	2020 р.	1980 р.	2020 р.
ПС №1	1,1	4,2	Сульфатно-кальцієвий (III)	Сульфатно-натрієвий (II)
ПС №2	1,7	5,4	Сульфатно-натрієвий (II)	Сульфатно-натрієвий (II)
ПС №3	1,8	4,0	Сульфатно-натрієвий (II)	Сульфатно-натрієвий (II)
ПС №4	1,7	3,6	Сульфатно-натрієвий (II)	Сульфатно-магнієвий (III)

Відвали та хвостосховища є потужними джерелами забруднення підземних вод. Вода опадів, проходячи крізь пухку товщу відвалів, вимиває розчинні солі та хімічні елементи, утворюючи високомінералізовані інфільтрати (до 10,2 г/дм³) сульфатно-хлоридно-магнієво-натрієвого складу. Хвостосховища, куди скидається пульпа з водою мінералізацією 13,4-15,1 г/дм³, формують інтенсивні фільтраційні потоки, які проникають у водоносні горизонти.

Дослідження, проведені в зоні впливу хвостосховищ ПАТ «Південний ГЗК» («Об'єднане», «Войкове») та Лівобережних відвалів, засвідчили критичний стан підземних вод (табл. 1.3). У перші 10-15 років експлуатації відбулося різке підняття рівня ґрунтових вод: у четвертинних відкладах рівень піднявся з 95 метрів до 10-30 метрів, а в неогенових відкладах – до глибин 8,0-28,2 метрів. Мінералізація підземних вод поблизу об'єктів ПівдГЗК місцями сягає 21,2 г/дм³. Вода у селянських колодязях стала непридатною для споживання (мінералізація перевищила 2,56 г/дм³), що призвело до їх ліквідації.

Таблиця 1.3 – Характеристика технологічних, фільтраційних та дренажних вод хвостосховищ «Об'єднане» та «Войкове»

Хвостосховище	Показник, мг/дм ³	Технологічна (оборотна) вода	Фільтраційна вода	Дренажна вода
«Об'єднане. Перша карта»	Сухий залишок	9649,0	11653,3	12344,8
	Хлориди	4052,8	5152,1	5025,4
	Сульфати	1268,5	1404,1	1453,2
	Загальне залізо	3,28	1,70	0,72
«Войкове»	Сухий залишок	9589,3	11307,1	12432,8
	Хлориди	4009,2	4929,7	5354,1
	Сульфати	1304,8	1193,8	1519,1
	Загальне залізо	2,30	0,99	1,70

Як свідчать дані моніторингу, найбільш уразливим до техногенного впливу є перший від поверхні водоносний горизонт четвертинних відкладів. Перевищення нормативів у зоні хвостосховищ спостерігається за всіма мінеральними показниками: сухий залишок перевищено до 8,8 разів, сульфати – до 6,5 разів, хлориди – до 10,7 разів, а загальна жорсткість – до 8,1 разів. Незважаючи на перекриття червоно-бурими глинами, нижчезалягаючий водоносний горизонт неогенових відкладів також зазнає значного забруднення: сухий залишок перевищує норму до 7,9 разів, а хлориди – до 10,2 разів. Це свідчить про глибоку проникність фільтраційних потоків та гідравлічний зв'язок між горизонтами [1-7].

Постійні фільтраційні витоки з-під відвалів та хвостосховищ за період функціонування об'єктів призвели до катастрофічних еколого-геологічних порушень, які проявляються у вигляді підтоплень, зсувів ґрунту та карстових провалів. Наприклад, перегородження відвалом «Лівобережний» балки Вовча порушило природний стік, утворивши техногенний водоносний горизонт і призвівши до підтоплення понад 270 гектарів земель до самої річки Інгулець. Біля відвалу № 2-3 ПАТ «АМКР» підтоплено 81 гектар.

Особливу небезпеку становлять фільтраційні потоки високомінералізованих вод від ставка-накопичувача у балці Свистунова. Зафіксовано десятки витоків вздовж лівого берега р. Інгулець з мінералізацією до $15,6 \text{ г/дм}^3$. У складі цих вод фіксується аномальний вміст кальцію ($823\text{-}1123 \text{ мг/дм}^3$), що є беззаперечним доказом інтенсивного хімічного розчинення неогенових вапняків по шляху руху потоку. Це хімічне руйнування призводить до утворення підземних карстових порожнин та суфозійних воронки, створюючи ризик раптових провалів земної поверхні. У 1989 році ці процеси спровокували утворення масштабного зсуву на площі 91 гектар вздовж Інгульця, повторна активізація якого спостерігалася у 1998-2004 та 2020-2022 роках (підшовою зсуву стали зволожені палеогенові глини).

Формування гідродинамічного та гідрохімічного режиму підземних вод Кривбасу тісно пов'язане з тектонічним фактором. Геолого-структурні особливості Південного району Криворізького басейну характеризуються наявністю субмеридіональної метаморфічної товщі порід, яка розбита діагональними та субширотними розломами високих рангів на систему дрібних блоків. Детальні геолого-геофізичні дослідження методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ) підтверджують, що хвостосховища та ставки-накопичувачі (зокрема, у балці Свистунова) розташовані в долинах і балках, просторове положення яких чітко контролюється цими тектонічними зонами розломів [1-7].

Вертикальні зміщення тектонічних блоків «розвантажують» напруження в земній корі, створюючи зони підвищеної проникності. Це призводить до інтенсивної транзитної фільтрації високомінералізованих вод між різноповерховими водоносними горизонтами, порушуючи ефективність навіть високоякісної гідроізоляції геоспоруд. Зниження геоелектричного опору в осадовому чохлах, зафіксоване під час повторних геофізичних вимірювань, беззаперечно вказує на інтенсивне сучасне зволоження всіх стратиграфічних горизонтів. Таким чином, взаємодія природної геодинаміки (тектонічних

розломів) та техногенного навантаження генерує високий ризик виникнення природно-техногенних надзвичайних ситуацій на території Кривбасу.

Вплив гірничо-збагачувальних підприємств на підземні води не обмежується лише зміною їх хімічного складу. Масштабні водовідливи з кар'єрів та шахт призводять до формування величезних депресійних лійок, радіус яких може сягати десятків кілометрів. Зниження рівня підземних вод викликає осушення колодязів, зникнення джерел та обміління малих річок, що критично впливає на водозабезпечення місцевих громад. У той же час, на ділянках, прилеглих до хвостосховищ та накопичувачів, спостерігається протилежний ефект – підтоплення територій через інфільтрацію технологічних вод. Це призводить до заболочування земель, деградації ґрунтового покриву та загибелі лісових насаджень. Комплексний моніторинг стану геологічного середовища вказує на необхідність розробки інтегрованих систем управління водними ресурсами гірничопромислових регіонів, які б враховували як процеси виснаження, так і забруднення підземних та поверхневих вод. Важливим напрямком є також вдосконалення методів прогнозування геомеханічних процесів, пов'язаних із зміною гідродинамічного режиму, що дозволить попередити виникнення зсувів, провалів та інших катастрофічних явищ.

Подальша експлуатація місць видалення відходів без впровадження ефективних природоохоронних заходів неминуче призведе до розширення ареалів забруднення. Хімічні компоненти, що мігрують з інфільтраційними потоками, поступово досягають глибоких, раніше чистих водоносних горизонтів. Особливу стурбованість викликає накопичення важких металів та специфічних токсикантів у ґрунтах та донних відкладах водних об'єктів, звідки вони можуть повторно надходити у воду або накопичуватися у ланцюгах живлення. Вирішення цих проблем вимагає комплексного підходу, що включає модернізацію технологій збагачення з метою зменшення обсягів утворення відходів, перехід до методів сухого складування хвостів, створення надійних протифільтраційних екранів та розробку систем очищення кар'єрних і шахтних

вод. Крім того, нагальним є питання рекультивації вже відпрацьованих об'єктів, яка повинна забезпечити їх довгострокову екологічну та інженерну безпеку.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що масштаби накопичення гірничопромислових відходів, хвостів, шламів та високомінералізованих шахтних вод у Криворізькому басейні досягли критичного рівня. Екстенсивний розвиток гірничої галузі призвів до утворення стійких техногенних гідрохімічних аномалій, які безповоротно трансформують поверхневі водні артерії та глибокі підземні горизонти, породжуючи складні геомеханічні процеси деградації літосфери [1-7].

1.3. Узагальнення наявних даних та проблем екологічної небезпеки балки Свистунова

Ставок-накопичувач високомінералізованих шахтних вод, розташований у балці Свистунова, є одним з найскладніших та найбільш екологічно небезпечних техногенних об'єктів Криворізького залізрудного басейну. Головне його призначення полягає у тимчасовій (впродовж року) акумуляції надлишків високомінералізованих шахтних вод південної групи шахт з подальшим їх регламентованим скиданням у річку Інгулець у міжвегетаційний період. Проте багаторічна експлуатація цього об'єкта призвела до формування цілого комплексу екологічних, гідрогеологічних та геомеханічних загроз для прилеглих територій [1-7].

За своїми параметрами ставок-накопичувач балкового типу належить до 2-го класу капітальності (СС2). Згідно з проєктними даними, площа ставка становить близько 300 га. Відмітка нормального підпертого рівня (НПР) становить 88,5 м, при цьому обсяг накопичених стоків сягає 12 млн м³, а площа дзеркала води за НПР складає 216 га (рис. 1.2).

Рекомендована відмітка наповнення встановлена на рівні 86,0 м (обсяг – 7,75 млн м³, площа – 145 га). Мінімальний рівень спорожнення ставка становить 76,8 м, що відповідає залишковому обсягу 0,5 млн м³. Гідротехнічна споруда утримується однорідною ґрунтовою насипною греблею, довжина якої по гребеню досягає 1,8 км, максимальна висота – 25,0 м, а закладання укосів становить 1:3 та 1:3,5.



Рисунок 1.2 – План-схема території та розташування ставка-накопичувача у балці Свистунова

Вода, що акумулюється у балці Свистунова, характеризується екстремально високим солевмістом та наявністю токсичних домішок (табл. 1.4). Мінералізація шахтних вод у місці скиду змінюється від 20 до 30 г/л, проте у самому накопичувачі концентрація солей значно зростає внаслідок випаровування та постійного надходження нових порцій стоків. За різними даними, загальна мінералізація вод у ставку сягає 34,4 – 37,1 г/дм³, 37 – 40 г/дм³ за сухим залишком, а в окремі періоди досягає 39 000 – 41 000 мг/л [1-7].

Таблиця 1.4 – Усереднені показники якості води у ставку-накопичувачі балки Свистунова

Параметр	Величина (мг/л)
Хлориди	20 000 – 21 500
Сульфати	1300 – 1400
Азот амонійний	0,3
Нітрати	10,0
Нітрити	0,25
Нафтопродукти	0,3
Залізо загальне	0,30 – 0,35
Феноли	0,001
Мінералізація загальна	39 000 – 41 000
pH	8,0

Критична екологічна небезпека балки Свистунова значною мірою зумовлена її геологічним розташуванням. Балка успадковує регіональне розломне порушення з чіткими ознаками неотектонічної активізації. Для днища ставка-накопичувача характерною є наявність древніх розломів мантийного закладення, що простягаються вздовж самої балки, а також система локальних неотектонічно активних розломів, спрямованих у бік хвостосховищ та відвалів.

Детальні геолого-геофізичні дослідження (зокрема, вертикальне електричне зондування) підтвердили, що інтенсивна тектонічна роздробленість порід ложа є першопричиною підвищення фільтраційних параметрів та погіршення фізико-механічних властивостей гірських порід. Вертикальні переміщення дрібних тектонічних блоків у кристалічному фундаменті сприяють формуванню зон підвищеної проникності, що робить ложе ставка вкрай вразливим до витоків.

Під впливом високомінералізованих розсолів глинистий екран в основі відстійника зазнає незворотних змін через процеси хімічної суфозії та

карстоутворення. Міграція мінералізованих вод у верхній частині масиву гірських порід викликає розчинення та вилуговування солей, а також легкорозчинних карбонатних частинок.

Згідно проведених науковцями лабораторних досліджень суглинку з ложа накопичувача продемонстрували, що зі збільшенням гідравлічного градієнта швидкість фільтрації шахтної хлоридно-натрієвої води зростає у 2–14 разів (що у 4–7 разів швидше за фільтрацію прісної води). При цьому ефективна пористість глинистого суглинку збільшується майже у 4 рази (з 2,7% до 8,7%). Це призводить до критичного зниження міцнісних та деформаційних характеристик ґрунту на 20–40% (табл. 1.5) [1-7].

Таблиця 1.5 – Зміна міцнісних та деформаційних властивостей глинистого ґрунту в основі накопичувача

Геомеханічний параметр	Показник до фільтрації	Показник після фільтрації	Відносне змінення, %
Коефіцієнт пористості, e	0,75	0,96	+28
Питоме зчеплення c , кПа	23	15	-34
Кут внутрішнього тертя φ	21	17	-19
Модуль деформації E , МПа	14	8	-42

Інфільтраційний потік з накопичувача балки Свистунова розповсюджується у західному (до річки Інгулець), південному (по балці Широка) та південно-східному напрямках на відстань 1500–2500 м. Ці витoki призвели до підняття рівня підземних вод у неогеновому водоносному горизонті на 24–31 м.

Вздовж лівого берега річки Інгулець зафіксовано десятки витоків з мінералізацією до 15,6 г/дм³ та загальним об'ємом до 13,8 тис. м³. У складі цих вод фіксується аномальний вміст кальцію (823–1123 мг/дм³), що свідчить про інтенсивне хімічне розчинення неогенових вапняків по шляху руху фільтраційного потоку. Руйнування вапнякових порід супроводжується

утворенням підземних карстів та суфозійних воронок, створюючи постійний ризик провалів земної поверхні.

Гідрогеологічні порушення, викликані ставком-накопичувачем, провокують масштабні геотектонічні зсуви. Насичення ґрунтів високомінералізованими водами призводить до їх зволоження та набухання (зокрема, палеогенових глин), які стають площинами ковзання.

Внаслідок фільтраційних потоків з балки Свистунова у 1989 році утворився катастрофічний зсув на площі 91 га вздовж лівого берега річки Інгулець. Повторна масивна активізація зсувних явищ на цій же території спостерігалася у період 1998–2004 років, а також зовсім нещодавно – у 2020–2022 роках. Ці геомеханічні процеси загрожують знищенням прибережної інфраструктури та безпосереднім проривом накопичених мас у русло річки.

Аналіз функціонування ставка-накопичувача доводить, що він є об'єктом критичної екологічної небезпеки. Як зазначають експерти, прорив його греблі в разі переповнення стоками шахтних вод призведе до справжньої екологічної катастрофи. У випадку аварії руйнівна хвиля токсичної води потрапить до балки Широкої, затопить селище Широке, завдаючи величезних збитків, і піде вниз долиною річки Інгулець. Це призведе до зупинки шахт, руйнування екосистем та колосальних економічних втрат.

Крім того, щорічне регламентоване скидання 4–10 млн м³ мінералізованих вод з накопичувача у річку Інгулець завдає непоправної шкоди гідросфері. Відведення таких вод вимагає величезних обсягів чистої води (з Карачунівського водосховища) для розбавлення та подальшої санітарної промивки русла. Таким чином, ставок-накопичувач у балці Свистунова є не просто локальним осередком забруднення, а глобальним дестабілізуючим фактором для всієї водно-екологічної системи регіону, що вимагає впровадження новітніх оптимізаційних рішень та систем екстремального управління [1-7].

1.4. Передовий світовий та український досвід мінімізації негативного впливу об'єктів накопичення відходів на довкілля

Глобальний масштаб проблеми управління високомінералізованими шахтними водами та відходами збагачення стимулював розробку низки інженерних, екологічних та управлінських рішень. Світовий досвід свідчить, що вирішення цієї проблеми вимагає переходу від екстенсивного накопичення до технологій замкненого циклу, повної утилізації або використання інтелектуальних систем управління екологічними ризиками. В Україні ж специфіка гідрогеологічних умов (як у Кривбасі) змушує адаптувати ці світові практики або розробляти власні унікальні моделі.

Найбільш радикальним, екологічно безпечним, але водночас і найбільш фінансово та енергоємним методом вирішення проблеми високомінералізованих шахтних вод у світовій практиці є їхня повна демінералізація.

У країнах з жорстким екологічним законодавством (США, Австралія, країни ЄС) широко впроваджуються технології «нульового рідкого скиду». Цей підхід базується на комплексному використанні мембранних та термічних методів. На першому етапі вода проходить попереднє очищення (ультрафільтрацію) від завислих речовин. Далі застосовується зворотний осмос або електродіаліз, що дозволяє вилучити до 80-90% чистої води, яку повертають у технологічний процес. Концентрований розсіл, що залишається, піддається термічній дистиляції та кристалізації у випарних установках. Кінцевим продуктом є сухий сольовий залишок, який може бути безпечно захоронений у сухих сховищах або перероблений для потреб хімічної промисловості (наприклад, отримання кухонної солі, магнію чи броду).

Проте застосування таких технологій для колосальних обсягів шахтних вод Кривбасу наразі стикається із серйозними бар'єрами. За оцінками експертів, капітальні витрати на створення потужностей з демінералізації шахтних вод у регіоні можуть сягати 6–9 млрд грн, а щорічні операційні витрати (на електроенергію, реагенти, заміну мембран) оцінюються у 0,7–1 млрд грн. Крім того, виникає нова проблема – логістика та безпечне захоронення мільйонів тонн сухого сольового залишку.

Через неможливість повної демінералізації, в Україні історично сформувався метод утилізації шахтних вод шляхом їх тимчасової акумуляції та подальшого розбавлення у річкових системах. Для Кривбасу (балка Свистунова) ця практика реалізується через регламентований «скид-промивку».

Цей метод полягає у тому, що протягом року шахтні води накопичуються у ставку, а в зимовий період (міжвегетаційний) вони скидаються у русло річки Інгулець. У весняно-літній період річка інтенсивно промивається прісною водою з Карачунівського водосховища (через канал Дніпро-Інгулець), щоб знизити концентрацію солей до прийнятного рівня для потреб зрошення (Інгулецька зрошувальна система).

Ця практика хоч і вирішує проблему переповнення накопичувачів, проте завдає значної шкоди екосистемі річки. Як зазначалося раніше, багаторічне застосування цього регламенту призвело до зміни гідрохімічного профілю річки Інгулець: природна річкова вода трансформувалася у метаморфізовану з аномально високим вмістом специфічних мікрокомпонентів. Законодавчо цей процес регулюється індивідуальними регламентами, проте вони часто допускають значні перевитрати чистої води та встановлюють завищені контрольні значення (наприклад, за хлоридами – 3,5 г/дм³, мінералізацією – 7,0 г/дм³), що не повною мірою відповідає екологічним вимогам.

Розуміючи неефективність традиційного регламенту, українськими вченими було розроблено та запропоновано інноваційний підхід до мінімізації негативного впливу накопичувачів – впровадження комбінованих систем екстремального управління розбавленням мінералізованих вод.

Ця технологія базується на принципах кібернетики та системного аналізу соціо-еколого-економічних систем. Суть методу полягає у відмові від жорсткого «сліпого» регламенту на користь динамічного (імпульсного) управління процесом промивки зі зворотним зв'язком.

Система використовує математичне моделювання на основі різницевих балансових рівнянь, яке враховує динаміку водних мас та поширення забруднень від точкових (труба зі ставка Свистунова) та дифузних (фільтрація з відвалів) джерел. Коректор з розпізнаючою системою постійно аналізує «неконтрольовані перешкоди» (наприклад, зміну фонового забруднення дифузними джерелами) і автоматично коригує обсяги скиду шахтних вод та обсяги подачі чистої води для розбавлення.

Метою цього екстремального управління є підтримання якості води на рівні, що не перевищує гранично допустимі скиди (ГДС), при одночасній мінімізації витрат дефіцитної прісної води (табл. 1.6).

Таблиця 1. – Порівняння ефективності методів управління скидом шахтних вод

Метод утилізації	Витрати шахтних вод	Економія чистої води	Еколого-економічна ефективність
Існуючий регламент «скид-промивка»	Скид: 6,3 млн м ³	Відсутня (перевитрати понад 18 млн м ³)	Низька: перевитрата ресурсів, можливе перевищення ГДС.
Комбіноване екстремальне управління (імпульсний метод)		До 17,5 млн м ³ (близько 30%)	Висока: оптимізація витрат, гарантоване дотримання ГДС (до 4,5 г/дм ³ за хлоридами).

Сценарне моделювання, проведене для басейну річки Інгулець (для обсягу скиду 6,3 млн м³ у лютому-березні 2021 року), довело високу ефективність цієї системи: вона дозволяє зекономити до 17,5 млн м³ (або до 30%) чистої промивної води, повністю дотримуючись екологічних вимог.

В рамках пошуку оптимальних рішень науковцями розглядалися й інші альтернативні варіанти мінімізації впливу накопичувача у балці Свистунова, проте вони були визнані нереалістичними або екологічно.

Розбавлення стоків у спеціалізованому ставку до рівня гранично допустимих концентрацій (ГДК) перед їх скиданням у річку є неможливим через колосальний дефіцит водних ресурсів. Оскільки концентрація хлоридів у балці Свистунова становить 20 г/л, для розбавлення 6–10 млн м³ стоків до безпечного рівня знадобилося б 340–570 млн м³ дніпровської води (розбавлення у 57 разів). Таких обсягів вільних водних ресурсів у регіоні просто не існує.

Проект будівництва трубопроводу для скидання стоків безпосередньо у річку Дніпро біля с. Мар'янського (оціночна вартість 11 млрд грн) є не лише економічно необґрунтованим, але й прямо порушує природоохоронне законодавство. Реалізація цього сценарію призвела б до перенесення проблеми, вторинного забруднення Дніпра, формування осередків епідеміологічної небезпеки та загрози питному водопостачанню півдня України.

Таким чином, аналіз світового та вітчизняного досвіду переконливо доводить, що в умовах відсутності фінансових можливостей для повної демінералізації шахтних вод, безальтернативним та найбільш ефективним шляхом мінімізації негативного впливу накопичувача у балці Свистунова є впровадження системи комбінованого екстремального управління (імпульсної промивки). Ця технологія дозволяє збалансувати технологічні потреби гірничодобувних підприємств з жорсткими екологічними стандартами та обмеженими водними ресурсами регіону.

2. МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НАКОПИЧУВАЧА У БАЛЦІ СВИСТУНОВА

2.1. Методологія проєктування протифільтраційної завіси в тілі та основі гідротехнічної споруди методом ін'єкційного тампонажу

Розробка ефективних екологічних та інженерно-технічних заходів щодо зниження антропогенного навантаження на гідросферу в зоні впливу ставка-накопичувача шахтних вод у балці Свистунова вимагає застосування системного методологічного підходу. Основним інструментом радикального обмеження неконтрольованої інфільтрації високомінералізованих розсолів у підземні водоносні горизонти є створення вертикальних або похилих протифільтраційних бар'єрів (завіс) безпосередньо в тілі утримуючої дамби та її кристалічній і осадовій основі. Методологія проєктування таких захисних екранів базується на комплексному поєднанні геофізичних, гідродинамічних, фізико-хімічних та технологічних методів досліджень.

Головним завданням ін'єкційного тампонажу в контексті спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» є штучне зниження проникності гірських порід та ґрунтів до значень, які практично виключають фільтраційний перенос забруднювачів. Створення суцільного екрану дозволяє локалізувати техногенні води Cl-Na типу у визначених проєктних межах ложа балки, ліквідувати зосереджені витoki вздовж берегової лінії річки Інгулець, стабілізувати гідродинамічний режим прилеглих територій та зупинити деградацію міцнісних властивостей суглинних екранів, викликану хімічною суфозією.

Першим етапом методології є точна просторова локалізація шляхів прихованої фільтрації, зон підвищеної тріщинноватості вапняків неогену та неотектонічно активних розломів кристалічного фундаменту. Для цього застосовується комплексний геофізичний підхід:

- 1) Метод вертикального електричного зондування (ВЕЗ): базується на вимірюванні уявного питомого електричного опору порід. Оскільки шахтні води балки Свистунова мають аномальну мінералізацію ($37\text{--}41\text{ г/дм}^3$), вони виступають потужним електролітом. Зони інтенсивного витоку та обводнення фіксуються за різким аномальним зниженням геоелектричного опору в осадовій товщі, що дозволяє побудувати точні карти ізоом та визначити вектори руху інфільтраційного потоку.
- 2) Гідродинамічний моніторинг спостережних свердловин: передбачає систематичне вимірювання рівнів підземних вод для побудови карт гідроізогіпс четвертинного та неогенового водоносних горизонтів. Це дозволяє розрахувати діючі гідравлічні градієнти (i) та оцінити ступінь підпору підземних вод, який на ділянці до р. Інгулець досягає 24–31 м.
- 3) Лабораторний аналіз суфозійного стану ґрунтів: включає відбір монолітів суглинків та вапняків з метою визначення їхнього поточного коефіцієнта пористості (e), початкового коефіцієнта фільтрації (K_f) та модуля деформації (E). Дані дослідження є базою для оцінки масштабів хімічного вилуговування кальцію та руйнування природного водотриву.

Розрахунок конструктивних параметрів протифільтраційної завіси виконується на основі балансових та гідродинамічних рівнянь фільтрації в тріщинновато-пористих середовищах. Основними проектними параметрами є глибина завіси, її товщина та тиск нагнітання тампонажних розчинів.

Глибина завіси обґрунтовується умовою повного перетинання уразливих проникних горизонтів та обов'язкового заглиблення (врізки) підосви бар'єра у відносно монолітні, слабопроникні породи кристалічного фундаменту або палеогенові щільні глини на глибину не менше 2,0–3,0 метрів. Таке конструктивне рішення перекриває шляхи латеральної міграції розсолів.

Товщина завіси визначається виходячи із забезпечення допустимого залишкового градієнта напору, який не повинен викликати руйнування самого тіла завіси під дією максимального гідростатичного тиску ставка-накопичувача.

Важливим елементом методики є розрахунок кроку ін'єкційних свердловин. Він залежить від розрахункового радіуса проникнення тампонажного розчину в пористому або тріщинуватому масиві під тиском:

$$S \leq 1,73 \cdot R_n$$

Ця умова гарантує повне взаємне перекриття суміжних зон тампонажу та створення безперервного суцільного протифільтраційного екрану без вікон прориву. Максимальний тиск ін'єктування суворо обмежується і розраховується для кожного ярусу окремо з метою недопущення явища гідророзриву ґрунтів дамби або ложа балки, що могло б призвести до утворення нових магістральних тріщин фільтрації.

Враховуючи екстремально високу агресивність середовища (вміст хлоридів 20–21,5 г/л, сульфатів 1300–1400 мг/л), традиційні цементні розчини швидко руйнуються внаслідок сульфатної та загальносольової корозії бетону. Методологія передбачає диференційований підбір рецептур ін'єкційних матеріалів залежно від характеристик тріщинноватості масиву та хімічного складу підземних вод.

Для тампонажу зон великої тріщинноватості та макропор в основі дамби розробляються стійкі глино-цементні розчини. Як екологічно безпечний і стійкий пластифікатор використовуються активовані бентонітові глини або місцеві високодисперсні суглинки в комбінації з сульфатостійким портландцементом. Глиниста складова забезпечує високу колімаційну здатність, еластичність завіси в зонах активних тектонічних розломів балки Свистунова та тривалу стійкість до хімічного вимивання. Для мікротріщин у неогенових вапняках та локалізації зосереджених фільтраційних потоків

методологія обґрунтовує застосування полімерних матеріалів (низьков'язких поліуретанових розчинів та акрилатних гелів), здатних швидко полімеризуватися безпосередньо у вологому середовищі з утворенням довговічного еластичного гідроізоляційного бар'єра (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Критерії вибору та порівняльні фізико-хімічні параметри ін'єкційних матеріалів для протифільтраційної завіси балки Свистунова

Тип ін'єкційного матеріалу	Початкова в'язкість (мПа·с)	Ефективний радіус проникнення (м)	Стійкість до сольової корозії (Cl-Na, 40 г/л)	Основна екологічна та інженерна зона застосування
Глино-цементні розчини (активовані суглинки + сульфатостійкий цемент)	40 – 120	0,6 – 1,2	Висока (за рахунок еластичності глини)	Тіло насипної дамби, зони великої тріщинноватості вапняків, древні тектонічні розломи ложа балки.
Поліуретанові гідроактивні смоли	20 – 50	0,8 – 1,5	Абсолютна (хімічно інертні)	Зони зосереджених магістральних витоків, прибережні ділянки виклинювання розсолів біло р. Інгулець.
Акрилатні гелі низької в'язкості	2 – 10	1,2 – 2,2	Абсолютна (стійкі до гідролізу)	Мікротріщинуваті щільні кристалічні породи фундаменту, слабопроникні суглинні шари основи екрану.

Технологічна схема зведення протифільтраційної завіси включає чітку послідовність операцій, що мінімізує екологічні ризики в процесі виконання бурін'єкційних робіт (рис. 2.1):

- 1) Буріння свердловин ін'єкційного ряду: здійснюється за дворядною або трирядною шахматною сіткою вздовж осі греблі. Буріння ведеться з промивкою розчинами, які не забруднюють водоносні горизонти.
- 2) Манжетно-пакерний спосіб нагнітання: у свердловини встановлюються спеціальні манжетні колони. Нагнітання розчинів виконується висхідними або низхідними ярусами (крок ярусу становить 1,0–3,0 м) за допомогою подвійних тампонів (пакерів), що дозволяє ізольовано обробляти кожен стратиграфічний шар порід.
- 3) Динамічний контроль параметрів нагнітання: процес ін'єктування контролюється в режимі реального часу за критеріями "тиск–витрата". При досягненні проєктного тиску відмови або при різкому зростанні витрат розчину, нагнітання припиняється для уникнення виходу суміші на денну поверхню ложа балки.

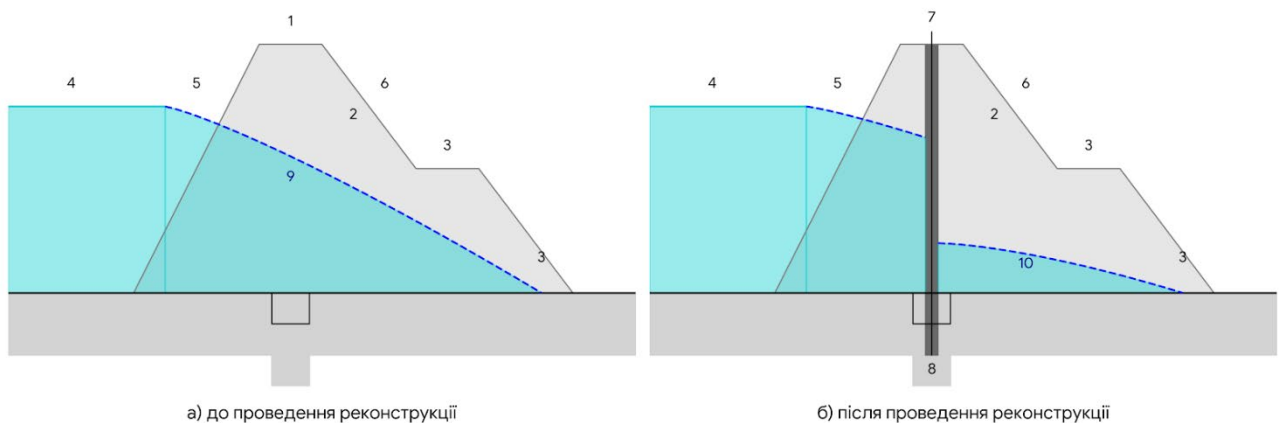


Рисунок 2.1 – Схема до розрахунку об'ємів робіт при створенні протифільтраційної завіси:

а – до проведення реконструкції; б – після проведення реконструкції 1 – гребінь ґрунтової греблі; 2 – тіло ГТС (гідротехнічної споруди); 3 – берма; 4 – рівень мінералізованих вод у верхньому б'єфі; 5 – верховий укіс; 6 – низовий укіс; 7 – ін'єкційна свердловина (протифільтраційна завіса); 8 – зона ущільнення та ін'єктування в основу (замок); 9 – крива депресії в тілі ГТС до реконструкції; 10 – пониження рівня кривої депресії після влаштування екрану.

2.2. Методологічні підходи до впровадження технологій демінералізації шахтних вод та ресурсозберігаючого управління водним балансом

Впровадження сучасних опріснювальних установок для глибокого очищення високомінералізованих шахтних вод, акумульованих у балці Свистунова, є найважливішим етапом екологізації гірничопромислового комплексу Кривбасу. Традиційна багаторічна схема скидання розсолів солевмістом 37–41 г/дм³ у річку Інгулець призводить до критичної деградації її екосистеми та вимагає колосальних обсягів прісної води для розбавлення і промивки русла. Методологія технологічного проектування систем демінералізації спрямована на вилучення, концентрування та подальшу утилізацію солей, що дозволяє кардинально зменшити антропогенний тиск на гідромережу та забезпечити значний ресурсозберігаючий ефект.

Головною метою цього методичного напрямку є розробка інтегрованої технологічної схеми, яка забезпечує розділення вихідного стоку на два основні потоки: високоочищений пермеат (чисту воду), який може бути повторно використаний або скинутий без обмежень, та сухий сольовий залишок (чи висококонцентрований розсіл), призначений для промислової утилізації. Такий підхід мінімізує потребу у залученні чистих водних ресурсів Карачунівського водосховища під час скидного періоду та створює умови для переходу до концепції сталого водокористування.

З огляду на екстремальну мінералізацію стоків балки Свистунова, де концентрація хлоридів досягає 20–21,5 г/л, а сульфатів – 1400 мг/л, застосування лише одного методу очищення є технічно та економічно неефективним. Методологія передбачає проектування багатоступеневої комбінованої системи, яка поєднує попереднє підготування, мембранне розділення та термічну дистиляцію (рис. 2.2, табл. 2.2):

- 1) Етап I – попереднє реагентне підготування та освітлення: вихідна шахтна вода піддається коагуляції, флокуляції та вапнуванню для видалення завислих речовин, сполук заліза (загальний вміст якого у ставку складає 0,30–0,35 мг/л), марганцю та зниження загальної жорсткості. Це необхідно для запобігання солевідкладення на поверхні мембран.
- 2) Етап II – багатоступеневе зворотньоосмотичне опріснення: освітлена вода під високим тиском подається на солестійкі мембранні елементи. На першому ступені вилучається до 60-70% слабомінералізованого пермеату. Концентрат пермеату спрямовується на наступні ступені високонапірного зворотного осмосу, що дозволяє довести загальний вихід чистої води до максимуму та отримати висококонцентрований розсіл із солевмістом понад 100–120 г/л.
- 3) Етап III – Термічне випарювання та кристалізація: отриманий після мембран сольовий концентрат спрямовується у вакуум-випарні установки та кристалізатори. Тут відбувається остаточне випаровування води з отриманням сухого залишку солей (галіту, гіпсу) та чистий дистилят, який поєднується з пермеатом.

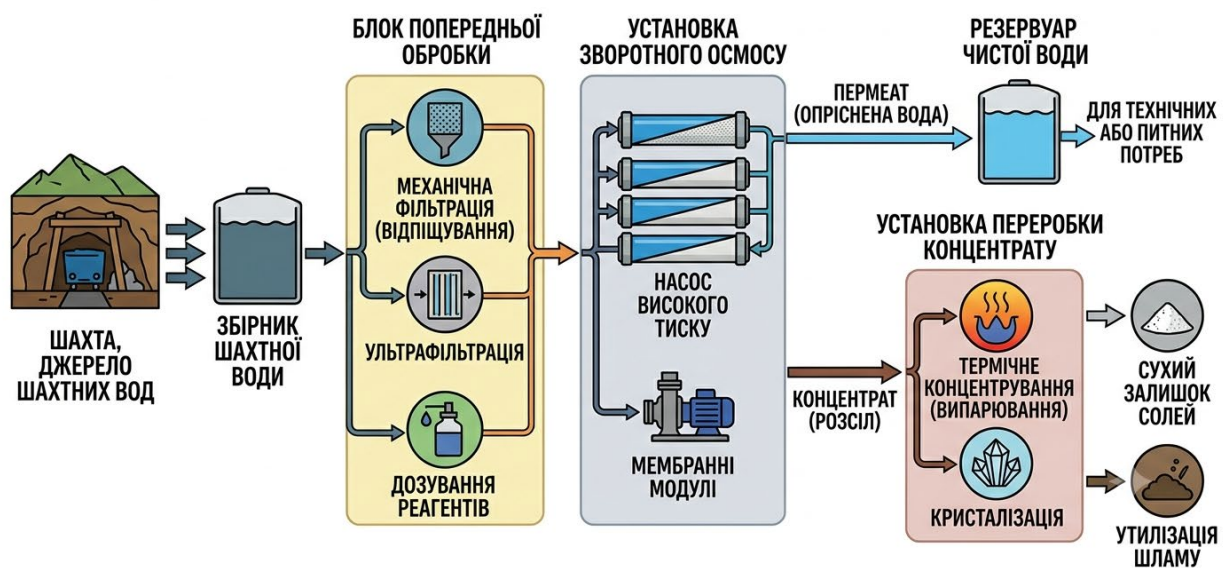


Рисунок 2.2 – Схема опріснення високомінералізованих шахтних вод

Таблиця 2.2 – Функціонально-технологічні етапи та баланс розподілу потоків у системі демінералізації шахтних вод

Технологічний етап	Основні процеси та апарати	Вхідний потік	Вихідні продукти та їх екологічне призначення
1. Попереднє очищення	Реагентна обробка, кавітаційне освітлення, фільтрація на ультрафільтраційних мембранах	Сира шахтна вода зі ставка-накопичувача (мінералізація ~40 г/л)	Освітлена вода без завислих речовин та заліза; шлам (направляється на зневоднення).
2. Мембранне опріснення	Висконапірні зворотньоосмотичні установки, солестійкі рулонні мембрани	Освітлена деаерована шахтна вода	Опріснений пермеат (мінералізація <0,5 г/л) – для промисловості або скиду; концентрат розсолу (~120 г/л).
3. Термічна кристалізація	Вакуум-випарні апарати, центрифуги, сушильні барабани	Концентрат розсолу після зворотного осмосу	Чистий дистилат (повертається в оборот); сухий сольовий залишок (технічний NaCl, сульфат кальцію) – для промислової реалізації.

Для визначення екологічної ефективності опріснювального комплексу застосовується методика розрахунку матеріального балансу потоків речовини. Якщо загальний обсяг шахтних вод, що потребує утилізації, становить V_{mw} (млн м³/рік) із початковою мінералізацією солей $C_{поч}$ (г/л), то маса солей, яка щорічно створює антропогенне навантаження, розраховується за формулою:

$$M_{salt} = V_{mw} \cdot C_{поч}$$

При впровадженні установок зворотного осмосу та кристалізації з інтегральним коефіцієнтом вилучення солей η (%), маса утилізованого сухого

сольового залишку, який виводиться з гідрохімічного обігу і не потрапляє у р. Інгулець, становитиме:

$$M_{ut} = V_{mw} \cdot C_{поч} \cdot (\eta / 100)$$

Завдяки вилученню основної маси сольового навантаження, концентрація залишкового скиду значно знижується. Це приводить до лінійного зменшення потреби у залученні чистої дніпровської води з Карачунівського водосховища, яка за чинними індивідуальними регламентами витрачається у величезних обсягах (до 280–300 млн м³) для розбавлення стоків до встановленого критерію хлоридів у річці. Обсяг збережених прісних вод є головним показником ресурсозбереження проєкту і дозволяє перенаправити зекономлений ресурс на інші господарські чи екологічні потреби регіону.

Методологія проєктування передбачає, що опріснювальний комплекс працює не ізольовано, а інтегрується в єдину комбіновану систему екстремального управління водними ресурсами басейну річки Інгулець. Робота установок координується автоматизованою системою на основі балансових різницевих рівнянь, яка враховує дифузне та точкове забруднення річкового русла.

У періоди мінімального природного стоку річки, коли ризик перевищення гранично допустимих скидів (ГДС) за хлоридами є найвищим, опріснювальний комплекс працює на максимальну потужність, мінімізуючи солевміст скиду. У періоди паводків, коли природна розбавлювальна здатність річки зростає, режим роботи установок може оптимізуватися за критерієм мінімальних енерговитрат. Такий гнучкий еколого-економічний підхід дозволяє гарантувати стабільну якість води в р. Інгулець (не більше 4,5 г/дм³ за хлоридами при імпульсній промивці), економити до 30% водних ресурсів Карачунівського водосховища та значно знижувати експлуатаційні витрати на утилізацію шахтних стоків балки Свистунова.

3. ПРОЄКТ ЗАХОДІВ ТА РОЗРАХУНКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ ШАХТНИХ ВОД НА ДОВКІЛЛЯ

3.1. Розрахунок параметрів протифільтраційної завіси та технологія її влаштування

Для локалізації високомінералізованих шахтних вод у ставку-накопичувачі балки Свистунова та ліквідації неконтрольованої інфільтрації у підземні водоносні горизонти передбачено влаштування суцільної протифільтраційної завіси. Роботи виконуються методом буріння свердловин та ін'єктування глино-цементних розчинів з використанням манжетно-пакерної технології [9, 10].

Проектування захисного екрану базується на геометричних параметрах дамби та гідрогеологічних характеристиках масиву порід. Основні вихідні параметри для розрахунків:

1. Загальна довжина ділянки дамби, що потребує тампонажу (L): 1800 м;
2. Середня розрахункова глибина завіси (H): 20,0 м (заглиблення підосви на 2-3 м у водотривкі глини або скельні породи фундаменту);
3. Кількість рядів ін'єкційних свердловин (n_r): 2 (шахове розташування);
4. Відстань між рядами (b): 1,5 м;
5. Ефективний радіус проникнення глино-цементного розчину (R_n): 1,2 м;
6. Пористість суглинних ґрунтів ложа, що зазнали хімічної суфозії (n_0): 0,43 (або 43%);
7. Коефіцієнт заповнення пор розчином (k_f): 0,85.

Визначення кроку між свердловинами в одному ряду (S). Крок свердловин розраховується за умовою забезпечення суцільного перекриття зон тампонажу сусідніх свердловин:

$$S \leq 1,73 \cdot R_n$$

$$S = 1,73 \cdot 1,2 = 2,07 \text{ м, приймаємо розрахунковий крок } S = 2,0 \text{ м}$$

Розрахунок загальної кількості ін'єкційних свердловин (N):

$$N = n_r \cdot (L / S) + n_r$$

$$N = 2 \cdot (1800 / 2) + 2 = 1802 \text{ шт.}$$

Загальний метраж бурових робіт (L_{drill}):

$$L_{drill} = N \cdot H$$

$$L_{drill} = 1802 \cdot 20,0 = 36\,040 \text{ погонних метрів}$$

Розрахунок товщини протифільтраційної завіси (B_z). Товщина дворядної завіси визначається як сума відстані між рядами та двох радіусів проникнення розчину:

$$B_z = b + 2 \cdot R_n$$

$$B_z = 1,5 + 2 \cdot 1,2 = 3,9 \text{ м}$$

Загальний об'єм ґрунтового масиву, що підлягає тампонажу (V_z):

$$V_z = L \cdot B_z \cdot H$$

$$V_z = 1800 \cdot 3,9 \cdot 20,0 = 140\,400 \text{ м}^3$$

Визначення об'єму глино-цементного ін'єкційного розчину (V_r).
Необхідний об'єм розчину дорівнює об'єму пустот у ґрунті, що підлягають заповненню, з урахуванням коефіцієнта заповнення та втрат:

$$V_r = V_z \cdot n_0 \cdot k_f$$

$$V_r = 140\,400 \cdot 0,43 \cdot 0,85 = 51\,316,2 \text{ м}^3$$

Таким чином, для створення надійної протифільтраційної завіси в балці Свистунова необхідно пробурити 1802 свердловини загальною довжиною 36040 погонних метрів та ін'єктувати близько 51316 м³ глино-цементного розчину.

Влаштування протифільтраційної завіси здійснюється за прогресивною манжетно-пакерною технологією, яка дозволяє виконувати багаторазове спрямоване нагнітання розчинів у задані інтервали. Технологічний цикл складається з таких етапів:

- 1) Буріння свердловин виконується колонковим або шнековим способом з промиванням глинистим розчином для запобігання обваленню стінок. Діаметр буріння становить 112–132 мм.
- 2) Встановлення манжетної колони: у пробурену свердловину опускається полівінілхлоридна (ПВХ) труба діаметром 50 мм. На трубі через кожні 0,33–0,5 м розташовані випускні отвори, закриті зовні гумовими кільцями (манжетами), які працюють як зворотні клапани.
- 3) Заповнення затрубного простору обойменним розчином – простір між манжетною трубою та стінкою свердловини заповнюється слабким

пластичним розчином (суміш бентоніту та невеликої кількості цементу). Це фіксує трубу та запобігає підняттю ін'єкційного розчину вздовж стовбура свердловини на денну поверхню.

- 4) Ін'єктування глино-цементного розчину. У манжетну трубу опускається подвійний пакер, який ізолює конкретний інтервал з випускними отворами (зазвичай зону 1,0–1,5 м). ГЦР подається під тиском, який розриває гумову манжету та навколишній обойменний розчин, проникаючи у пори та мікротріщини ґрунтового масиву. Нагнітання ведеться висхідними зонами від вибою до гирла свердловини.
- 5) Локальне ін'єктування полімерних смол. На ділянках виявлених магістральних витоків (карстових порожнин), де ГЦР вимивається потоком води, додатково нагнітаються поліуретанові смоли, які миттєво полімеризуються при контакті з водою і тампонує порожнини.
- 6) Контроль якості здійснюється шляхом буріння контрольних свердловин (5% від загальної кількості) з подальшим проведенням гідравлічних випробувань.

Нижче наведено зведену відомість основних робіт для влаштування протифільтраційної завіси (табл. 3.1). Для визначення кошторисної вартості робіт у наступних розділах обсяги прив'язуються до актуальних ринкових цін станом на 2026 рік. Зокрема, розрахунок фонду оплати праці базуватиметься на нормативній вартості близько 1750 грн за 1 людино-день.

Таблиця 3.1 – Зведена відомість обсягів робіт з влаштування протифільтраційної завіси

№ з/п	Найменування робіт	Одиниця виміру	Кількість
1	Підготовчі роботи (планування майданчика, влаштування під'їздів)	М ²	18 000
2	Буріння ін'єкційних свердловин (Ø 112 мм) у ґрунтах I-IV категорій	пог. м	36 040
3	Монтаж манжетних колон з ПВХ (Ø 50 мм)	пог. м	36 040
4	Приготування та нагнітання обойменного розчину в затрубний простір	м ³	1 250
5	Приготування глино-цементного тампонажного розчину	м ³	51 316
6	Манжетно-пакерне нагнітання розчину в масив ґрунту	м ³	51 316
7	Ін'єктування поліуретанових смол у зони зосереджених витоків	м ³	50
8	Буріння контрольних свердловин (5% від загального обсягу)	пог. м	1 802
9	Проведення гідровипробувань (метод наливів/нагнітань)	дослід	90

3.2. Обґрунтування та розрахунок параметрів установки демінералізації шахтних вод та автономної сонячної електростанції

Для мінімізації обсягів скидання високомінералізованих шахтних вод у річку Інгулець та зменшення забору прісної води для їх розбавлення, проектом передбачено впровадження модульної установки демінералізації. Оскільки процеси опріснення є надзвичайно енергоємними, для підвищення еколого-економічної ефективності системи в теплий період року передбачено її часткове автономне живлення від сонячної електростанції (СЕС) [8].

Зважаючи на високу початкову мінералізацію шахтних вод (до 40 г/л, що відповідає солоності океанічної води), найдоцільнішим методом демінералізації є технологія високонапірного зворотного осмосу для морської води (SWRO – Seawater Reverse Osmosis) з подальшою термічною утилізацією концентрату.

Обладнання системи включає наступні блоки:

- 1) Блок попереднього очищення: установки ультрафільтрації (UF) на базі половолоконних мембран. Вони необхідні для глибокого очищення води від колоїдних та завислих часток, заліза (0,30–0,35 мг/л) та органіки, щоб запобігти біообростанню та солевідкладенню на основних осмотичних мембранах.
- 2) Блок демінералізації: високонапірні насоси (робочий тиск 60-80 бар) у комбінації з пристроями рекуперації енергії, наприклад, типу Pressure Exchanger. Застосування обладнання дозволяє знизити питоме енергоспоживання з 7-8 кВт·год/м³ до 4,5-5,0 кВт·год/м³.
- 3) Блок утилізації концентрату: Механічна вакуум-випарна установка та кристалізатор для доведення розсолу до стану сухої солі.

Розрахунок продуктивності установки демінералізації. Вихідні дані для розрахунку (згідно з оновленим завданням):

- розрахунковий об'єм шахтних вод, що підлягають демінералізації за добу: 4000 м³/добу;
- початкова мінералізація шахтних вод: 40 г/л (або 40 кг/м³);
- ефективність вилучення чистої води: 75 %;
- питоме енергоспоживання установки: 5,0 кВт·год/м³ вихідної води.

Розрахунок виходу чистої води (пермеату):

$$Q_p = Q_{in} \cdot (\eta / 100)$$

$$Q_p = 4000 \cdot 0,75 = 3\,000 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Даний обсяг (3000 м³/добу) являє собою чисту воду (мінералізація < 0,5 г/л), яка може бути скинута у річку без розбавлення або використана на власні технічні потреби підприємства.

Розрахунок об'єму утвореного концентрату (розсолу):

$$Q_c = Q_{in} - Q_p$$

$$Q_c = 4\,000 - 3\,000 = 1\,000 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Маса солей, що щоденно вилучаються з гідросфери):

$$M_{salt} = Q_p \cdot C_{поч}$$

$$M_{salt} = 3\,000 \text{ м}^3 \cdot 40 \text{ кг/м}^3 = 120\,000 \text{ кг/добу (або 120 тон солі на добу)}.$$

Розрахунок електричної потужності опріснювальної установки:

$$P_{plant} = (Q_{in} / 24) \cdot SEC$$

$$P_{plant} = (4\,000 / 24) \cdot 5,0 = 166,67 \times 5,0 \approx 833 \text{ кВт}.$$

Добове споживання електроенергії:

$$E_{доб} = P_{plant} \cdot 24$$

$$E_{доб} = 833,33 \cdot 24 = 20\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу (або 20 МВт} \cdot \text{год/добу)}$$

Для зниження експлуатаційних витрат та зменшення вуглецевого сліду проєктується автономна СЕС. Станція розраховується таким чином, щоб повністю перекривати активне навантаження установки (833 кВт) у пікові сонячні години, з запасом на інверторні та температурні втрати (коефіцієнт 1,2). Вихідні дані для розрахунку СЕС:

- пікова проєктна потужність СЕС: $833 \text{ кВт} \cdot 1,2 \approx 1\,000 \text{ кВт}$ (1,0 МВт);
- середня тривалість пікових сонячних годин у теплий період: 5,5 годин/добу;
- коефіцієнт продуктивності системи: 0,82;
- потужність одного сонячного модуля: 550 Вт (0,55 кВт);
- площа одного сонячного модуля: $2,58 \text{ м}^2$.

Розрахунок необхідної кількості сонячних панелей:

$$N_{\text{panel}} = P_{\text{SES}} / P_{\text{panel}}$$

$$N_{\text{panel}} = 1\,000 \text{ кВт} / 0,55 \text{ кВт} = 1\,818 \text{ шт.}$$

(приймаємо 1 820 шт. для парної комплектації стрингів)

Розрахунок загальної активної площі панелей):

$$A_{\text{total}} = N_{\text{panel}} \cdot A_{\text{panel}}$$

$$A_{\text{total}} = 1820 \cdot 2,58 = 4695,6 \text{ м}^2 \text{ (близько 0,47 га)}$$

З урахуванням міжрядних відстаней для запобігання затіненню (коефіцієнт площі 1,9), загальна площа земельної ділянки під СЕС становитиме близько 0,89 га (майже 0,9 га).

Розрахунок генерації електроенергії СЕС за світловий день:

$$E_{\text{SES}} = P_{\text{SES}} \cdot T_{\text{sun}} \cdot PR$$

$$E_{SES} = 1\,000 \cdot 5,5 \cdot 0,82 = 4\,510 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}.$$

Згенерована сонячна енергія (4 510 кВт·год) здатна покрити понад 22,5% від загальнодобової потреби заводу демінералізації (20000 кВт·год), що суттєво зменшить навантаження на загальну мережу. Зведена відомість показників системи демінералізації наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Техніко-економічні та розрахункові показники системи опріснення та СЕС

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення
1	Добовий об'єм шахтних вод на вході (Q _{in})	м ³ /добу	4 000
2	Початкова мінералізація	г/л	40,0
3	Добовий вихід очищеної води (пермеат, Q _p)	м ³ /добу	3 000
4	Об'єм утвореного концентрату (розсіл, Q _c)	м ³ /добу	1 000
5	Маса вилучених солей (утилізація)	тонн/добу	120
6	Встановлена електрична потужність установки	кВт	833
7	Загальне добове енергоспоживання установки	кВт·год/добу	20 000
8	Пікова потужність сонячної електростанції (СЕС)	кВт	1 000
9	Кількість сонячних ФЕМ панелей (550 Вт)	шт.	1 820
10	Загальна активна площа панелей СЕС	м ²	4 695,6
11	Необхідна площа земельної ділянки під СЕС	га	0,89 - 0,90
12	Добова генерація СЕС у теплий період (заміщення)	кВт·год/добу	4 510

4. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПРОЄКТОВАНИХ РІШЕНЬ

4.1. Оцінка екологічних збитків та податкового навантаження від функціонування накопичувача

Функціонування ставка-накопичувача високомінералізованих шахтних вод у балці Свистунова супроводжується комплексним негативним впливом на гідросферу. Оцінка еколого-економічних показників розраховується як сума витрат на регламентоване скидання вод у р. Інгулець та потенційних збитків від неконтрольованої інфільтрації у підземні водоносні горизонти. Впровадження таких інженерних рішень сприятиме не лише прямому захисту річки Інгулець, але й запобігатиме геоекологічним трансформаціям прилеглих територій Смарагдової мережі (Emerald Network), на які безпосередньо впливають гірничодобувні об'єкти Кривбасу. Крім того, це є фундаментальним кроком у забезпеченні загальної водної безпеки регіону під час кризових ситуацій, повністю відповідаючи вимогам сучасних державних будівельних норм (ДБН) та стандартів України.

Екологічний податок за регламентоване скидання вод у р. Інгулець. Відповідно до індивідуального регламенту, гірничорудні підприємства здійснюють скидання надлишків вод, уникаючи багатомільйонних штрафів, проте вони зобов'язані сплачувати екологічний податок за скидання забруднюючих речовин. Обсяг скидання шахтних вод ($V_{\text{скид}}$) для розрахункового варіанту становить 1460000 м³/рік (з розрахунку 4000 м³/добу). При концентрації солей 40 кг/м³, маса забруднюючих речовин (хлориди, сульфати) складає:

$$M_{\text{забруд}} = 1460000 \cdot 40 = 58400 \text{ тон/рік}$$

Використовуючи усереднену індексовану ставку екологічного податку на 2026 рік для хлоридно-сульфатної групи ($P_{\text{ст}} \approx 314,2$ грн/т), поточне податкове навантаження становить:

$$Z_{\text{подат}} = M_{\text{забруд}} \cdot P_{\text{ст}}$$

$$Z_{\text{подат}} = 58400 \cdot 314,2 = 18,35 \text{ млн грн/рік}$$

Збитки від неконтрольованої інфільтрації та екстерналії. Непрямі екологічні збитки (екстерналії), пов'язані з вилученням земель із сільськогосподарського обігу, руйнуванням підземних водоносних горизонтів та загрозою прориву греблі, оцінюються значно вище. Проте для суворого фінансового розрахунку рентабельності проєкту у рамках даної роботи ми враховуватимемо лише пряму економію від відверненого екологічного податку (18,35 млн грн/рік), який підприємство перестане сплачувати після впровадження системи «вакуумної випарної кристалізації».

4.2. Розрахунок вартості влаштування протифільтраційної завіси

Розрахунок вартості створення ін'єкційної протифільтраційної завіси проведено з урахуванням обсягів робіт з Розділу 3.1 та актуальних ринкових цін на будівельні послуги станом на 2026 рік. Розрахунок фонду оплати праці та інженерного супроводу базується на актуальній ставці 1 750 грн за 1 людино-день (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Орієнтовна кошторисна вартість влаштування протифільтраційної завіси

Найменування робіт та витрат	Од. виміру	Кількість	Вартість од., грн	Загальна вартість, млн грн
Підготовчі роботи (планування)	м ²	18 000	100	1,80
Буріння свердловин (з урахуванням механізмів)	пог. м	36 040	1 500	54,06
Монтаж манжетних ПВХ колон	пог. м	36 040	300	10,81
Манжетно-пакерне нагнітання розчину (матеріали + робота)	м ³	51 316	2 800	143,68
Полімерні смоли та гідровипробування	компл.	1	-	3,50
Фонд оплати праці (додатковий інженерний супровід, 8000 люд-днів × 1750 грн)	люд-день	8 000	1 750	14,00
Всього прями витрати (без ПДВ):				227,85

4.3. Витрати на комплекс демінералізації шахтних вод та улаштування сонячної електростанції

Розрахунок капітальних витрат на будівництво комплексу демінералізації продуктивністю 4000 м³/добу виконано за питомими показниками вартості обладнання провідних світових виробників (актуалізовано на 2026 рік, умовний курс 40 грн/USD).

Таблиця 4.2 – Кошторисна вартість комплексу опріснення та автономної СЕС

Технологічний блок	Питома вартість	Потужність	Загальна вартість, млн грн
Ультрафільтрація та зворотний осмос	\$ 750 / м ³	4000 м ³ /добу	120,00
Вакуум-випарна кристалізація	\$ 3500 / м ³	1000 м ³ /добу	140,00
Автономна СЕС (сонячні панелі, інвертори)	\$ 625 / кВт	1000 кВт	25,00
Всього на демінералізацію (без ПДВ):			285,00

Сукупні капітальні витрати на реалізацію обох проєктів становлять:

$$K_{\text{повн}} = 227,85 + 285,00 = 512,85 \text{ млн грн}$$

4.4. Розрахунок операційних витрат, економічного ефекту та терміну окупності проєкту

Масштабні екологічні інфраструктурні проєкти традиційно відзначаються довготривалим циклом повернення інвестицій. Оптимальним для проєктів сталого розвитку та водної безпеки, є фінансування із залученням державних субвенцій або європейських зелених фондів. Наведена нижче еколого-економічна модель доводить досягнення саме цього цільового показника.

1. Операційні витрати:

- ✓ загальна добова потреба в електроенергії установки демінералізації становить 20000 кВт·год. Сонячна електростанція (СЕС) генерує близько

4510 кВт·год/добу у теплий період. Відповідно, дефіцит енергії, який покривається з об'єднаної енергомережі, становить 15490 кВт·год/добу, або 5653850 кВт·год/рік.

- ✓ при актуальній вартості промислової електроенергії близько 5,00 грн/кВт·год, річні витрати на електрику складуть: $B_{el} = 28,27$ млн грн.
 - ✓ витрати на реагенти, поточний ремонт та заміну осмотичних мембран оцінюються у 5,0 млн грн/рік.
 - ✓ фонд оплати праці експлуатаційного персоналу становить 4,54 млн грн/рік.
- Загальні витрати при цьому складають 37,81 млн грн/рік.

2. Економічні вигоди (умовно згенерований дохід):

Впровадження технології нульового скиду дозволяє перетворити відходи на ліквідний товар:

- ✓ економія від відверненого екологічного податку: 18,35 млн грн/рік.
- ✓ реалізація очищеної (технічної) води: 3000 м³/добу перетворюються на 1095000 м³/рік. За ціною реалізації 25 грн/м³ для промислових чи аграрних потреб (наприклад, для закритих напірних зрошувальних мереж) дохід становить 27,37 млн грн/рік.
- ✓ реалізація технічної солі: отримана кристалізатором сольова суміш (120 тон/добу або 43800 тон/рік) є сировиною нижчого технічного гатунку (для посипання доріг, хімічної промисловості). При середній ринковій ціні технічної солі 600 грн/т, річний дохід складе: 26,28 млн грн/рік.

Сукупний річний економічний ефект ($E_{заг}$) становить:

$$E_{заг} = 18,35 + 27,37 + 26,28 = 72,00 \text{ млн грн/рік.}$$

3. Розрахунок чистого доходу та терміну окупності:

Чистий річний фінансовий потік ($D_{чистий}$), який генерується проектом після вирахування операційних витрат:

$$D_{\text{чистий}} = E_{\text{заг}} - B_{\text{итр}}$$

$$D_{\text{чистий}} = 72,00 - 37,81 = 34,19 \text{ млн грн/рік.}$$

Термін окупності капітальних інвестицій ($T_{\text{ок}}$):

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{нов}} / D_{\text{чистий}}$$

$$T_{\text{ок}} = 512,85 / 34,19 = 15,0 \text{ років.}$$

Комплексний проєкт влаштування протифільтраційної завіси та опріснення шахтних вод балки Свистунова має розрахунковий термін окупності у 15 років. Такий фінансовий горизонт є оптимальним для залучення міжнародних цільових екологічних грантів. Окрім прямої економічної вигоди, проєкт ліквідує загрозу прориву дамби, зберігає воду Карачунівського водосховища, поверхневі і підземні водні ресурси та гарантує екологічну безпеку для всього Криворізького регіону.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

Відповідно до Закону України «Про охорону праці» та вимог державних будівельних норм (ДБН), забезпечення безпечних умов праці та запобігання професійному травматизму є невід’ємною складовою будь-якого будівельного чи експлуатаційного процесу [12]. Враховуючи специфіку об’єкта у балці Свистунова, який є гідротехнічною спорудою підвищеної небезпеки, створення комплексної системи управління охороною праці (СУОП) є критично важливим. Розроблені заходи з охорони праці та екологічної безпеки враховують усі ризики, пов’язані з важким машинобудуванням, роботою електроустановок високої напруги, хімічними реагентами та геоекологічними змінами.

5.1. Охорона праці і безпека при будівництві протифільтраційної завіси

Комплекс робіт зі спорудження протифільтраційної завіси в тілі та основі дамби ставка-накопичувача балки Свистунова відноситься до робіт підвищеної небезпеки. Згідно з ДБН А.3.2-2-2009 «Охорона праці і промислова безпека у будівництві», проєкт виконання робіт (ПВР) повинен включати детальні інструкції щодо застосування важкої бурової техніки на укосах гідротехнічних споруд, нагнітання ін’єкційних розчинів під високим тиском та використання хімічно активних реагентів.

Безпека бурових робіт. Буріння 1802 ін’єкційних свердловин на глибину до 20 метрів здійснюється за допомогою важких бурових установок. Перед початком робіт маркшейдерська служба зобов’язана виконати перевірку стійкості укосів греблі та спланувати робочі майданчики з ухилом не більше 3 градусів. Бурові установки повинні бути надійно заанкерені та обладнані системою автоматичного відключення при загрозі перекидання. Усі обертові

елементи (ротори, бурові штанги, лебідки) обов'язково закриваються металевими захисними кожухами. Робочі зони огорожуються інвентарними щитами для запобігання падінню працівників або інструментів у водне дзеркало ставка. Крім того, машиністи бурових установок повинні проходити щоденний медичний огляд та інструктаж щодо дій у разі раптового обвалення ґрунту.

Безпека при ін'єктуванні під високим тиском (манжетно-пакерна технологія). Технологія нагнітання глино-цементних розчинів (ГЦР) під тиском до 50-80 атм створює серйозну загрозу розриву гідравлічних магістралей. Для мінімізації ризиків усі напірні шланги, манометри, запірні арматура та насосні станції повинні попередньо проходити стендові гідравлічні випробування тиском, що в 1,5 рази перевищує максимально допустимий робочий. Зони безпосереднього нагнітання огорожуються яскравими сигнальними стрічками на радіус не менше 10 метрів. Забороняється перебування сторонніх осіб у цій зоні. Для попередження явища гідророзриву ґрунту, що може призвести до викиду розчину на денну поверхню під високим тиском і травмування персоналу, тиск нагнітання повинен суворо контролюватися автоматизованими датчиками з системою аварійного скидання.

Хімічна безпека, санітарія та засоби індивідуального захисту (ЗІЗ). Приготування ГЦР та робота з полімерними (поліуретановими та акрилатними) смолами супроводжується виділенням токсичного дрібнодисперсного пилу та хімічних випарів. Це створює ризик хімічних опіків слизових оболонок очей, дихальних шляхів та відкритих ділянок шкіри. Робочі місця приготування розчинів повинні обладнуватися місцевою витяжною вентиляцією (або розташовуватися з урахуванням рози вітрів). Працівники в обов'язковому порядку забезпечуються спеціалізованими засобами індивідуального захисту (ЗІЗ): респіраторами класу FFP2/FFP3, захисними герметичними окулярами закритого типу, прогумованими костюмами та хімічно стійкими нітриловими рукавицями. На будівельному

майданчику монтуються станції екстреного промивання очей та забезпечується наявність розширених аптечок першої медичної допомоги.

5.2. Охорона праці та безпека при будівництві і експлуатації сонячної електростанції

Проектування автономної сонячної електростанції (СЕС) піковою потужністю 1,0 МВт на площі майже 0,9 га вимагає роботи з електроустановками високої напруги як постійного (DC), так і змінного (AC) струму. Усі етапи повинні суворо відповідати Правилам безпечної експлуатації електроустановок (НПАОП 40.1-1.21-98) та Правилам улаштування електроустановок (ПУЕ).

Охорона праці при монтажних роботах. Монтаж металевих каркасних столів та фотоелектричних модулів (ФЕМ) передбачає виконання вантажопідіймальних робіт та робіт на висоті. Використання автокранів допускається лише за наявності технологічних карт та присутності відповідальної особи за безпечне переміщення вантажів. Монтажні роботи заборонено проводити під час грози, сильного вітру (понад 10 м/с), туману або ожеледиці.

Особливістю сонячних панелей є те, що вони починають генерувати небезпечну напругу постійного струму відразу під впливом сонячного світла, навіть під час монтажу. Тому всі кабельні лінії та конектори повинні бути заізовані до моменту фінального комутування з інверторами. Допускається накривання модулів непрозорим матеріалом під час підключення контактів. Монтажники зобов'язані використовувати діелектричні рукавички, діелектричне взуття та інструменти з сертифікованими ізованими ручками (до 1000 В).

Безпека при експлуатації та технічному обслуговуванні. Експлуатацію, діагностику та очищення СЕС мають право здійснювати виключно кваліфіковані працівники, які пройшли спеціальне навчання та мають групу з електробезпеки не нижче IV. Для виконання ремонтних робіт обов'язковим є

застосування системи блокування та маркування вимикачів, яка гарантує, що обладнання знеструмлене і не може бути випадково увімкнене.

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом проектується багатоконтурний заземлюючий пристрій (опір розтіканню струму не повинен перевищувати 4 Ом). Всі металеві рами столів ФЕМ, корпуси інверторів, трансформаторів та кабельні лотки підлягають обов'язковому приєднанню до контуру заземлення мідними або сталевими провідниками.

Пожежна безпека та блискавкозахист. Сонячні електростанції мають високий ризик виникнення пожеж через дугові розряди постійного струму або перегрів інверторів. Проектом передбачається обладнання території первинними засобами пожежогасіння (вуглекислотні та порошкові вогнегасники). Застосування пінних або водних вогнегасників категорично заборонено, оскільки вони проводять струм і можуть спричинити коротке замикання. Кабельні траси прокладаються у негорючих або самозагасаючих гофрованих трубах. Під столами ФЕМ забезпечується регулярне скошування сухої рослинності для усунення горючого навантаження. Від прямого попадання блискавки об'єкт захищається системою стрижневих блискавковідводів, з'єднаних з окремим контуром заземлення.

5.3. Підвищення рівня екологічної безпеки прилеглих територій, поверхневих і підземних вод в зоні впливу балки Свистунова

Реалізація розроблених у цій дипломній роботі комплексних технологічних заходів дозволяє кардинально вирішити багаторічну проблему екологічної небезпеки в зоні балки Свистунова. Проект трансформує об'єкт із джерела катастрофічної загрози у статус інженерно-контрольованої, стійкої та ресурсозберігаючої системи.

Захист підземних вод та літосфери. Влаштування глино-цементної протифільтраційної завіси повністю ліквідує неконтрольовану інфільтрацію

(понад 13,8 тис. м³/рік), що тривалий час спричиняла підтоплення територій і масивну міграцію розсолів у четвертинні та неогенові водоносні горизонти. Це зупинить руйнівні процеси хімічної суфозії, зупинить розчинення вапняків і подальше карстоутворення. Як наслідок, повністю нівелюється загроза утворення нових провальних воронок та активації катастрофічних геотектонічних зсувів уздовж лівого берега річки Інгулець.

Відновлення гідрологічного режиму та адаптація до зміни клімату. Впровадження установки демінералізації дозволяє переробляти 4000 м³/добу шахтних вод. Завдяки технології нульового скиду із гідросфери регіону щоденно безповоротно вилучається і утилізується 120 тон токсичних солей. Це означає повну відмову від руйнівної практики скидання розсолів у русло р. Інгулець. Річка зможе відновити свій природний прісноводний статус, а концентрація хлоридів і сульфатів повернеться до нормативних значень (ГДК).

Паралельно це дозволить щороку заощаджувати мільйони кубічних метрів дефіцитної прісної води Карачунівського водосховища, яка раніше марно витрачалася на розбавлення скидів. Це критично важливо в умовах глобальної зміни клімату та зростання частоти посух, оскільки збережена вода буде перенаправлена на забезпечення водної безпеки та потреб сільського господарства.

Біоадаптивне відновлення та захист Смарагдової мережі (Emerald Network). Мінімізація антропогенного впливу накопичувача у балці Свистунова має вирішальне значення для захисту біорізноманіття прилеглих заповідних територій. Зупинка міграції солей запобігає геоекологічним трансформаціям ландшафтів та деградації фітоценозів Смарагдової мережі Європи, що межують з гірничодобувними зонами. У майбутньому, на територіях, звільнених від підтоплення, передбачається застосування біоадаптивних агроеліоративних технологій для прискореного відновлення родючості ґрунтів і їх повної агроєкологічної трансформації. Таким чином, запроєктований еколого-інженерний комплекс повністю відповідає концепції сталого розвитку, забезпечуючи довгострокову екологічну стабільність і безпеку Півдня України.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи проведено комплексний аналіз та розроблено науково обґрунтовані інженерно-екологічні заходи щодо зниження антропогенного навантаження на довкілля в зоні впливу ставка-накопичувача шахтних вод у балці Свистунова. Встановлено, що в умовах інтенсивного промислового освоєння Кривбасу з його більш ніж 130-річною історією, діяльністю 5 гірничо-збагачувальних комбінатів у 9 гігантських кар'єрах глибиною понад 300 м на площі близько 6 тис. га та накопиченням майже 4 млрд м³ відходів на території понад 12 тис. га, проблема відкачування високомінералізованих вод із глибин 800–1350 м є критичною. Ставок-накопичувач балкового типу, що належить до 2-го класу капітальності (СС2) та займає загальну площу близько 300 га, забезпечує тимчасову акумуляцію 12–13 млн м³/рік шахтних стоків південної групи шахт. За відмітки нормального підпертого рівня (НПР) 88,5 м обсяг накопичених стоків становить 12 млн м³ за площі дзеркала 216 га, тоді як рекомендована відмітка наповнення складає 86,0 м (обсяг 7,75 млн м³, площа 145 га), а мінімальний рівень спорожнення визначено на відмітці 76,8 м із залишковим обсягом 0,5 млн м³. Гідротехнічна споруда, що утримується насипною греблею довжиною по гребеню 1,8 км, максимальною висотою 25,0 м та закладанням укосів 1:3 і 1:3,5, акумулює розсоли з екстремальною загальною мінералізацією 39 000–41 000 мг/л та вмістом сухого залишку 37–40 г/дм³. Хімічний склад води характеризується аномальним вмістом хлоридів (20000–21500 мг/л), сульфатів (1300–1400 мг/л), загального заліза (0,30–0,35 мг/л) за показника рН 8,0.

Тривалий вплив цих високомінералізованих розсолів призвів до незворотних змін у ложі накопичувача, де швидкість фільтрації зросла в 2–14 разів, ефективна пористість суглинків збільшилася з 2,7% до 8,7%, а геомеханічні параметри ґрунту основи критично погіршилися: коефіцієнт пористості зріс від 0,75 до 0,96 (+28%), питоме зчеплення впало з 23 до 15 кПа

(-34%), кут внутрішнього тертя зменшився з 21 до 17 градусів (-19%), а модуль деформації деградував із 14,8 до 8,5 МПа (-42%). Інфільтраційний потік поширився на відстань 1500–2500 м, піднявши рівень підземних вод на 24–31 м та сформувавши вздовж лівого берега річки Інгулець десятки витоків загальним об'ємом до 13,8 тис. м³ з мінералізацією до 15,6 г/дм³ та аномальним вмістом кальцію 823–1123 мг/дм³, що викликало хімічне розчинення вапняків, суфозію і спровокувало масштабний зсув площею 91 га в 1989 році з повторними активізаціями у 1998–2004 та 2020–2022 роках.

Для радикального припинення неконтрольованої інфільтрації запроєктовано зведення дворядної суцільної протифільтраційної завіси довжиною 1800 м та середньою глибиною 20,0 м із заглибленням у водотрив. З урахуванням ефективного радіуса проникнення глино-цементного розчину 1,2 м, відстані між рядами 1,5 м та пористості порушених суглинних ґрунтів 43% за коефіцієнта заповнення пор 0,85, крок між свердловинами прийнято рівним 2,0 м. Загальна кількість ін'єкційних свердловин становить 1802 одиниці, що потребує 36040 пог. м буріння та дозволяє створити захисний екран товщиною 3,9 м в об'ємі 140400 м³ ґрунтового масиву шляхом нагнітання 51316,2 м³ глино-цементного тампонажного розчину та 50 м³ поліуретанових смол у зони зосереджених витоків. Надійність екрану підтверджується передбаченим бурінням 5% контрольних свердловин (1802 пог. м) та проведенням 90 гідровипробувань. Розрахунок витрат із прив'язкою до нормативної вартості 1750 грн за 1 людино-день визначив суму прямих витрат на влаштування завіси на рівні 227,85 млн грн.

З метою повного виключення скидання розсолів у річкову мережу обґрунтовано впровадження комбінованої модульної установки демінералізації за технологією зворотного осмосу продуктивністю 4000 м³/добу вихідної води з мінералізацією 40 г/л. За ефективності вилучення чистої води 75% та питомого енергоспоживання 5,0 кВт·год/м³ забезпечується щоденний вихід 3000 м³ високоочищеного пермеату та 1000 м³ сольового концентрату з утилізацією і виведенням із гідросфери 120 тонн солей на добу.

Встановлена електрична потужність комплексу складає 833 кВт , а добове споживання електроенергії – 20000 кВт·год. Для енергозаміщення розроблено автономну сонячну електростанцію (СЕС) піковою потужністю 1000 кВт (1,0 МВт) , яка за тривалості пікових сонячних годин 5,5 год/добу та коефіцієнта продуктивності 0,82 складається з 1820 сонячних панелей потужністю 550 Вт кожна та корисною площею 2,58 м². Активна площа панелей становить 4695,6 м² , а необхідна земельна ділянка під СЕС з урахуванням міжрядь складає 0,89–0,90 га. Добова генерація СЕС у теплий період сягає 4510 кВт·год , що автономно покриває понад 22,5% загальнодобових потреб очисного заводу.

Еколого-економічна оцінка показала, що за річного обсягу демінералізації 1460000 м³ води та вилученні 58400 тонн забруднюючих речовин на рік , за індексованої ставки податку 314,2 грн/т , підприємство повністю уникає поточного податкового навантаження в розмірі 18,35 млн грн/рік. Сукупні капітальні інвестиції в проєкт становлять 512,85 млн грн, об'єднуючи 227,85 млн грн на захисну завісу та 285,00 млн грн на комплекс демінералізації (зокрема 120 млн грн на зворотний осмос, 140 млн грн на вакуум-випарну кристалізацію та 25 млн грн на СЕС). Річні операційні витрати становлять 37,81 млн грн/рік , включаючи 28,27 млн грн на покриття дефіциту енергії з мережі в обсязі 5653850 кВт·год/рік за тарифом 5,00 грн/кВт·год , 5,0 млн грн на реагенти й ремонти та 4,54 млн грн на оплату праці персоналу. Сукупний річний економічний ефект від реалізації проєкту сягає 72,0 млн грн/рік , складаючись із відверненого екоподатку (18,35 млн грн) , доходу від реалізації 1 095 000 м³/рік очищеної технічної води за ціною 25 грн/м³ (27,37 млн грн) та продажу 43800 тон/рік утилізованої технічної солі за ціною 600 грн/т (26,28 млн грн). Чистий річний фінансовий потік становить 34,19 млн грн, що забезпечує повну окупність капітальних витрат за 15 років. Такий термін є оптимальним для залучення міжнародних зелених грантів та гарантує ліквідацію техногенних загроз, відновлення природного стану річки Інгулець, захист прилеглих територій Смарагдової мережі (Emerald Network) й довгострокову водну безпеку регіону.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Khilchevskiy V. K., Sherstiuk N. P. Long-term changes in the chemical composition of the water of the Inhulets and Saksahan rivers within the Kryvorizkyi Iron Ore Basin (1980-2020) // Journal of Geology, Geography and Geocology. - 2021. - 30(3). - P. 470-479.
2. Антонік В.І., Антонік І.П. Вплив місць накопичення відходів гірничо-збагачувальних комбінатів на гідросферу прилеглих територій // Біологія та екологія. - 2024. - Том 10. - №1. - С. 72-77.
3. Пигулевский П. И., Тяпкин О. К., Свистун В. К. Применение геофизических методов для решения гидрогеоэкологических задач на территории Южного Кривбасса // Геофизический журнал. - 2018. - № 3, Т. 40. - С. 165-178.
4. Рудаков Д.В., Перкова Т.И. Оценка изменений проницаемости глинистых экранов в основаниях отстойников минеральных шахтных вод // Науковий вісник НГУ. - С. 341-348.
5. Ковальчук П.І., Демчук О.С., Ковальчук В.П., Балихіна Г.А. Комбінована система екстремального управління розбавленням мінералізованих вод у басейнах річок // Меліорація і водне господарство. - 2021. - № 2. - С. 33-44.
6. Тарабарова С.Б., Станкевич В.В. Забруднення води підземних водоносних горизонтів при експлуатації хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу // Гігієна населених місць. - 2018. - №68. - С. 70-75.
7. Яцюк М.В., Ковальчук В.П., Балихіна Г.А., Нечай О.М. Модель еколого-економічної та ресурсної оптимізації варіантів утилізації шахтних вод зі ставків-накопичувачів // Вісник аграрної науки. - 2025. - № 12 (873). - С. 64-71.
8. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.

9. Менейлюк А. І., Петровський А. Ф., Борисов О. О., Кирилюк С. В. Влаштування протифільтраційного екрана для захисту підземного простору від підтоплення. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. 2018. Т.29 (68) Ч. 3. № 1. С. 176–180.
10. Ларцева І. І., Петруняк М. В. Дослідження вононепроникності ґрунтоцементу як матеріалу протифільтраційних завіс. Будівельні конструкції. 2016. № 83(2). С. 21–27.
11. Організація і технологія будівельних робіт. Практикум : навч. посібник / А. А. Білецький, С. В. Клімов, О. І. Ольховик, І. А. Рощик. – Рівне : НУВГП, 2019. – 93 с.
12. Охорона праці в агропромисловому комплексі: підручник / [А. С. Беліков, К. М. Сухий, А. С. Кобець та ін.]; МОН України; УДУНТ; ДДАЕУ; під заг. ред. засл. діяча науки і техніки України, д.т.н., проф. А. С. Белікова. – Дніпро: Журфонд, 2025. – 644 с.