

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ПЕТЛЬОВАНІЙ Михайло Володимирович



УДК 622.831.6:502.174

**НАУКОВІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОЇ ЛІКВІДАЦІЇ
ТЕХНОГЕННИХ ПУСТОТ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ**

Спеціальності:

05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин
21.06.01 – екологічна безпека

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро).

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
декан гірничо-металургійного факультету
Криворізького національного університету
(м. Кривий Ріг)

КАЛІНІЧЕНКО
Всеволод
Олександрович

доктор технічних наук, член-кореспондент
НАН України, заступник директора з
наукової роботи Інституту геотехнічної
механіки ім. М.С. Полякова НАН України
(м. Дніпро)

КРУКОВСЬКИЙ
Олександр
Петрович

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри геоінженерії
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» (м. Київ)

ТВЕРДА
Оксана
Ярославівна

Захист відбудеться «11» вересня 2026 р. о 12-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.852.63 із разового захисту дисертації при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. (0562) 47-24-11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19).

Реферат розісланий «11» серпня 2026 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.852.63
доктор технічних наук,
професор



Тетяна ЯКОВИШИНА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Україна є однією з провідних країн за запасами мінеральних ресурсів, у надрах якої виявлено понад 20 тисяч родовищ, з них – більше ніж 8,9 тисяч мають промислове значення. Найбільше розробляються родовища залізних руд, кам'яного вугілля, марганцевих руд, титано-цирконієвих руд та родовищ будівельної сировини. Окрім важливого значення мінеральних ресурсів для розвитку економіки, процеси їх видобування та переробки формують масштабне техногенне навантаження на довкілля. Україна сьогодні входить до топ-20 країн світу за площею земель, зайнятих об'єктами гірничодобувної промисловості. Так, згідно національної доповіді про стан навколишнього середовища, видобутком мінеральних ресурсів зайнято понад 52,7 тис. га земельних площ, серед яких найбільшого впливу зазнають Дніпропетровська, Донецька та Житомирська області.

Серед усіх гірничодобувних галузей України особливо виразною, з точки зору економічного та екологічного впливу, є залізорудна, яка у 2021 році забезпечила державі 4 млрд дол. валютних надходжень від експорту сировини та продукції. Сьогодні 75% обсягу залізних руд видобувається у крупному Криворізькому залізорудному басейні, де сконцентровано 48,6% всіх запасів.

Інтенсивний видобуток залізних руд, що триває понад 120 років, призвів до важкої техногенно-екологічної ситуації: утворилися численні форми порушень земної поверхні, зокрема провальні зони (глибиною 50 – 200 м), непогашені підземні пустоти закритих шахт, вироблені простори закритих кар'єрів та значні накопичення відходів гірничо-металургійного комплексу. Провальні зони та непогашені пустоти створюють неконтрольовані техногенні ризики, загрожують безпеці населення, інфраструктурі, родючим ґрунтам та ускладнюють підземні гірничі роботи, а саме вентиляцію та шахтний водовідлив. Закриті кар'єри, над якими не відновлена земна поверхня, призводять до втрат промислово-економічного потенціалу територій. Екологічна ситуація суттєво погіршена накопиченням значних обсягів промислових відходів, переважною більшістю гірничо-металургійного комплексу, частка яких сягає 92% від загального обсягу Дніпропетровської області та 65,5% України, що створює суттєве техногенне навантаження.

Безперервне розширення контурів утворених провальних зон у синтезі з наявністю в надрах непогашених підземних пустот старих шахт формує масштабний техногенно-екологічний ризик для навколишнього середовища регіону. Подальший неконтрольований розвиток цих деформаційних процесів на земній поверхні становить загрозу безповоротного руйнування ґрунтового покриву, деградації прилеглих лісових масивів та критичного пошкодження об'єктів промислової і цивільної інфраструктури. Існує нагальна потреба у превентивній стабілізації гірського масиву, що є першоджерелом цих руйнівних явищ на поверхні.

Проведений аналіз наукових досягнень закордонних і українських вчених у галузі підземної, відкритої розробки й раціонального освоєння залізорудних родовищ показав недостатню вивченість впливу утворених підземною розробкою родовищ різнотипних техногенних пустот на земну поверхню та екологічний стан постмайнінгових територій, а також розробки дієвих заходів їх ефективного попередження та ліквідації.

На початкових стадіях розробки рудних родовищ у світовій практиці застосовуються системи розробки із закладанням виробленого простору, що дозволяє запобігти деформаціям земної поверхні. В умовах рудників України, де глибина розробки запасів значно перевищила граничний рівень, ці заходи сьогодні є технологічно та економічно неефективними через наявність вже утворених глибоких провальних пустот та порушеність масиву гірських порід.

Засипання провальних зон шахт та закритих кар'єрів відвальними пустими породами, що є традиційним заходом рекультивації, має недостатню геомеханічну ефективність і не дозволяє утилізувати більш широкий спектр промислових відходів, що зумовлює пошук нових комплексних технологій.

Одним з перспективних та невивчених на сьогодні видів закладання для умов розробки залізрудних родовищ України є пастове, що дозволяє утилізувати у своєму складі значні об'єми хвостів збагачення та при додаванні в'язучого матеріалу сформувати монолітний штучний масив, і може бути використано для керування напружено-деформованим станом масиву при ліквідації різнотипних техногенних пустот, блокування розвитку зон обвалення та превентивної стабілізації масиву, що перебуває у граничному стані.

Відсутність наукових основ керування геомеханічним станом масиву гірських порід і земної поверхні при ліквідації різнотипних техногенних пустот залізрудних родовищ із використанням технології пастового закладання та екологічнобезпечною утилізацією у його складі відходів гірничо-металургійного комплексу, адаптованої до підземного та відкритого просторів, стримує розробку нових ефективних природоохоронних заходів та реалізацію принципів раціонального надрокористування та цілей сталого розвитку, що визначає *актуальну наукову проблему*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тематика дисертаційної роботи відповідає Загальнодержавній програмі розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року (Закон України № 3268-VI від 21.04.2011 р.); Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року (Постанова КМУ № 820-р від 8.11.2017 р.); Розпорядженню Кабінету Міністрів України «Деякі питання забезпечення досягнення Цілей сталого розвитку в Україні» (№ 1190-р від 29.11.2024 р.).

Дисертаційну роботу виконано в рамках низки держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт, що виконувались в НТУ «Дніпровська політехніка», де автор брав та бере участь як керівник і виконавець:

– «Наукове обґрунтування методологічної, технологічної, екологічної і правової бази вилучення корисних компонентів з техногенних родовищ України» (№ держреєстрації 0116U004619, 2016 – 2017 рр., *основний виконавець*);

– «Наукове обґрунтування та розробка енергоефективних маловідходних технологій видобування вуглеводневої та мінеральної сировини» (№ держреєстрації 0116U008041, 2016 – 2018 рр., *відповідальний виконавець*);

– «Розробка прогресивних технологій повноцінного вилучення енергетичного вугілля з акумуляцією пустих порід у підземному просторі» (№ держреєстрації 0120U101099, 2020 – 2022 рр., *основний виконавець*);

– «Розробка технології відновлення порушених гірничими роботами територій шляхом формування закладних масивів на основі природно-

техногенних матеріалів» (Грант Національного Фонду Досліджень України, реєстраційний номер 2021.01/0306, 2023 – 2024 рр., *науковий керівник*);

– «Розробка нових прикладних і нормативних рішень для ресурсоефективної утилізації техногенних відходів та ліквідації пустот гірничорудних регіонів у контексті циркулярної економіки» (№ держреєстрації 0126U001271, 2026 – 2028 рр., *науковий керівник*);

– «Розробка циркулярних технологій освоєння критичної сировини з природних та техногенних мінеральних ресурсів» (№ держреєстрації 0126U001271, 2026 – 2028 рр., *виконавець*);

– «Робочий проєкт технології безвідходного видобутку кам'яної солі в умовах Західної частини Райгородської ділянки Славянського родовища кам'яної солі» (№ 7/19, 2019 р., *основний виконавець*);

– «Створити концепцію комплексного видобутку та переробки мінеральної сировини вугільних шахт у контексті сталого розвитку та ESG-стратегії» (№ 10146-22/4122-ПУ, 2023 р., *основний виконавець*).

Мета роботи – створення науково-методологічних основ комплексної ліквідації техногенних пустот, утворених підземним та відкритим видобутком мінеральних ресурсів, на основі дослідження оптимальних властивостей пастових і комбінованих закладних масивів, що містять відходи гірничо-металургійного комплексу, їх впливу на забезпечення геомеханічної стійкості масиву та земної поверхні, підвищення рівня екологічної безпеки та сприяння сталому розвитку гірничих регіонів.

Поставлену мету реалізовано послідовним розв'язанням таких наукових завдань дослідження:

1. Виконано аналіз впливу гірничодобувної галузі на стан земної поверхні, наукових досліджень та існуючих заходів щодо мінімізації її негативного впливу.

2. Визначено ступінь екологічної небезпеки техногенних пустот, відходів гірничо-металургійного комплексу та напрям їх раціональної утилізації у технологіях закладання.

3. Розроблено нову екологоорієнтовану концепцію комплексної ліквідації техногенних пустот із використанням відходів гірничо-металургійного комплексу.

4. Розроблено аналітичні моделі визначення міцнісних властивостей та стійкості закладних масивів, сформованих у різних видах техногенних пустот.

5. Виконано експериментальні дослідження комплексу властивостей пастового та комбінованого закладання техногенних пустот з використанням різноманітних відходів.

6. Досліджено трансформацію геомеханічної ситуації земної поверхні та масиву гірських порід під впливом закладного масиву в техногенних пустотах.

7. Розроблено технологію та методики розрахунку параметрів закладання утвореного комплексу техногенних пустот.

8. Надано еколого-економічну оцінку доцільності комплексної ліквідації техногенних пустот на основі пастового закладання.

Ідея роботи полягає у створенні в просторі техногенних пустот штучного опорного масиву шляхом екологобезпечного перетворення відходів гірничо-металургійного комплексу в пастові багатокомпонентні суміші, з яких формується закладний масив, що у взаємодії з породами забезпечує перерозподіл гірського тиску та стабілізацію природно-техногенного масиву гірських порід.

Об'єкт дослідження – процеси взаємодії природно-техногенного масиву гірських порід із штучно сформованими пастовими та комбінованими закладними масивами при ліквідації техногенних пустот.

Предмет дослідження – закономірності формування властивостей пастових закладних сумішей і закладних масивів з утилізацією промислових відходів та механізми їх впливу на напружено-деформований стан оточуючого техногенну пустоту масиву, що забезпечує зниження деформацій земної поверхні та екологічну безпеку при їх ліквідації.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених наукових завдань використано комплексний науково-методичний інструментарій: аналіз, узагальнення та систематизація інформаційних даних та наукових праць українських і закордонних вчених щодо стану порушень земної поверхні й масиву під впливом підземного й відкритого видобутку мінеральних ресурсів та існуючих заходів його мінімізації; вивчення аерокосмічних знімків стану земної поверхні та геометричних параметрів техногенних пустот (ресурси *Google Earth* та *Blender GIS*); вивчення просторово-часових змін рослинного покриву (ресурс *Copernicus Open Hub Access*); загальні положення механіки гірських порід, будівельної механіки та хімії в'язучих речовин; аналітичних досліджень – метод граничної рівноваги та багаточасового пружного середовища з інтеграцією механізму імітації пластичної поведінки; фізико-хімічні дослідження – рентгенофлюоресцентний, рентгенодифракційний та мікроскопічний методи визначення хімічного та мінералогічного складу промислових відходів як закладних матеріалів; комплекс лабораторних та експериментальних досліджень – визначення концентрацій забруднюючих речовин фотометричним методом, дослідження фізико-хімічних, реологічних, фізико-механічних властивостей пастових закладних сумішей та монолітного масиву; багатоваріантне чисельне моделювання геомеханічних процесів та стійкості масиву методом скінченних елементів у багатоцільовому ліцензійному програмному пакеті *Phase 2*; методи статистичної обробки даних, ранжування факторів, техніко-економічної мінімізації витрат та еколого-економічної оцінки технологічних рішень.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Просторове розширення провальної зони у постаптивній фазі обвалення змінюється за логарифмічною залежністю у часі й через дію залишкових деформацій та ерозії спричиняє деградацію ґрунтового-рослинного покриву прилеглих територій, що підтверджується зниженням нормалізованого вегетаційного індексу NDVI з 0,49 до 0,36. Мінімізація цієї техногенно-екологічної небезпеки досягається шляхом трансформації хвостів збагачення залізних руд, які у місцях накопичення під впливом кліматичних факторів є джерелом вторинного забруднення прилеглих територій, у монолітний закладний масив, що іммобілізує у своїй структурі забруднюючі речовини та токсичні елементи з його формуванням у провальному просторі. Це обґрунтовує безпечний спосіб рекультивації та обмежує подальше розширення площі провальних зон.

2. Оптимальний пастоподібний стан закладної суміші для ліквідації техногенних пустот досягається при вмісті твердої фази 75%, з яких 70,5% хвостів збагачення з осушених карт хвостосховищ, 4,5% в'язучого матеріалу та 25% води. Реологічна поведінка суміші описується моделлю Гершеля-Баклі та

покращується введенням 1,0 – 1,5% суглинку, що компенсує водовіддачу при високому вмісті меленого граншлаку в комбінованому в'язучому. При цьому електропровідність суміші є кількісним індикатором інтенсивності гідратаційних процесів та формування міцності закладного масиву: величина міцності лінійно залежить від пікового значення електропровідності та обернено пропорційна степеневій функції часу досягнення цього максимуму. Отримані закономірності створюють основу експрес-методу неруйнівного прогнозування міцності й оперативної оптимізації складу сумішей.

3. В умовах розвитку зсувних процесів при поглибленні підземної розробки рудних покладів Кривбасу від 1300 до 1800 м земна поверхня зі сторони висячого боку зазнає подальшого руйнування, а часткове блокування цих деструктивних процесів досягається шляхом формування у провальних зонах упорної призми з монолітного пастового закладання, ефективність якої описується поліноміальною залежністю від кута відкосу провалу та жорсткості закладного масиву й набуває максимальних значень до 30% інтенсивно зростаючи при кутах падіння рудного покладу понад 50°. Це дозволяє попередити розширення площі провалу у просторі, зменшити розмір мульди зсуву, інтенсивність розкриття тріщин на земній поверхні й підвищити рівень техногенно-екологічної безпеки.

4. В інтервалі глибин 50 – 150 м існують нижня та верхня межі граничного розміру непогашеної підземної пустоти за падінням, при яких налягаючі породи ще не втратили стійкість, але вже розвинений деформаційний зв'язок із земною поверхнею. Виявлені критичні межі логарифмічно залежать від глибини розташування її покрівлі, а відстань між ними звужується зі збільшенням кута падіння рудного тіла від 50 до 70°. Наявність пустот, розміри за падінням яких перебувають у встановлених межах, свідчить про формування приграничного геомеханічного стану масиву ($H / L_{кр} = 0,4...1,2$), який просторово оцінюється зіставленням еквівалентного прольоту пустоти з цими ж межами. Отримані результати дозволяють прогнозувати наявність підземних пустот у приграничному стані, визначати необхідну міцність пастового закладання та своєчасно запобігти розвитку прогресуючих деформацій земної поверхні.

Наукова новизна отриманих результатів:

Вперше:

- розроблено концепцію комплексної ліквідації різнотипних техногенних пустот на території гірничо-промислових регіонів, у якій досягається синергетичний ефект стабілізації земної поверхні й масиву та утилізації екологічно небезпечних відходів гірничо-металургійного комплексу, що забезпечує перехід від локальних заходів до системного управління техногенно-екологічною безпекою;

- виявлено механізм формування перехідного приграничного стану масиву порід навколо підземних пустот між стійким і нестійким, межі якого описуються логарифмічними залежностями від глибини та кута падіння покладу й ідентифікація якого є критерієм доцільності ліквідації пустот;

- встановлено закономірності зв'язку міцності з параметрами електропровідності (пікове значення, час настання піку), що дозволяє здійснювати оперативний прогноз якості суміші та міцності штучного масиву техногенних пустот;

– виявлено логарифмічний характер розвитку площі провальних зон шахт у просторі та часі з кількісною оцінкою його впливу на деградацію ґрунтово-рослинного покриву у постактивній фазі обвалення.

Уточнено:

– ефект часткового блокування деформацій земної поверхні провальних пустот через формування упорної призми з монолітного масиву, який при кутах відкосу провалу понад 50° та підвищенні жорсткості масиву зростає за поліноміальною залежністю, локалізуючи зони впливу та зменшення деформацій до 30%;

– експоненціальну залежність необхідної міцності пастового закладання при ліквідації підземних пустот від параметрів їх приграничного стану $H/L_{кр}$, яка збільшується при зменшенні кута падіння покладу і є основою для проєктування складу суміші зі збереження суцільності штучного масиву;

– ефект іммобілізації забруднюючих речовин та токсичних елементів цементною матрицею закладного масиву, сформованого з відходів збагачення залізних руд, за умов найгіршого сценарію агресивного середовища;

– критичні умови формування однорідного пастоподібного стану закладних сумішей на основі хвостів збагачення, які, на відміну від традиційних рецептур, передбачають сумарний вміст твердої фази на рівні 75% (з яких 4,5% – в'язучий матеріал), що забезпечує оптимальний баланс між транспортабельністю суміші та міцністю штучного масиву;

– поліноміальні закономірності впливу частки та фракційного складу дроблених відвальних порід на міцність пастового закладання, що обґрунтовує оптимальний розмір фракції -15 мм та її вміст у суміші 10 – 15% і забезпечує приріст міцності штучного масиву на 26 – 33%;

– систему закономірностей комплексного впливу вмісту твердої фази та дозування в'язучого на реологічні та фізико-механічні властивості пастових сумішей, що дозволяє керувати параметрами транспортування та формування штучного монолітного масиву.

Дістало подальшого розвитку:

– методологія чисельного моделювання складних геомеханічних процесів залізорудних родовищ через врахування структурної неоднорідності геологічного середовища на основі інтеграції нелінійного критерію Хоека-Брауна та лінійного критерію Мора-Кулона, що забезпечує реалістичність їх фізичної сутності;

– напрям утилізації хвостів збагачення у складі пастових закладних сумішей як відходів з найвищим техногенним навантаженням на основі вдосконаленої системи інтегрального їх ранжування, розробленою класифікацією технологій закладання за видовим різноманіттям відходів і виявленою сукупністю раціональних індикаторів їх використання.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується коректністю постановки і вирішенням задач із використанням апробованих положень механіки гірських порід, будівельної механіки, механіки суцільного та сипучого середовища, методів математичної статистики; значним обсягом аналітичних, експериментальних та чисельних досліджень; достатнім ступенем відповідності результатів аналітичних досліджень та чисельного моделювання (збіжність результатів 73 – 89%). Достовірність екологічної складової досліджень забезпечується використанням сучасних та

апробованих у світі методів оцінки змін стану ґрунтово-рослинного покриву за даними дистанційного зондування та достатнім обсягом повторюваних експериментальних досліджень статичного вилуговування забруднюючих речовин.

Наукове значення роботи полягає у розробці основ і принципів керування геомеханічним станом природно-техногенного масиву гірських порід при ліквідації техногенних пустот шляхом формування пастових і комбінованих закладних масивів із відходів гірничо-металургійного комплексу, властивості яких обґрунтовано встановленими закономірностями взаємозв'язку між компонентним складом пастових сумішей, фізико-хімічними процесами їх структуроутворення, реологічною поведінкою та фізико-механічними властивостями, що дозволяє зменшити руйнівні деформації земної поверхні й покращити екологічний стан гірничодобувних регіонів.

Практичне значення отриманих результатів:

- вдосконалено методику досліджень комплексу фізичних, хімічних і механічних властивостей закладних матеріалів, пастових сумішей та закладних масивів;
- розроблено нову технологію комплексної ліквідації різнотипних техногенних пустот пастовими закладними сумішами, що поєднані в єдину закладну мережу з централізованим їх приготуванням та транспортуванням;
- обґрунтовано комбінований спосіб формування закладного масиву з чередуванням шарів пастового та породного закладання як захід рекультивації земної поверхні;
- розроблено комплексну методику розрахунку параметрів ліквідації різнотипних техногенних пустот із застосуванням монолітних пастових та комбінованих закладних масивів;
- розроблено методику визначення раціонального розміщення мобільного закладного комплексу між хвостосховищем та техногенними пустотами;
- складено нову методику комплексного визначення еколого-економічного ефекту концепції комплексної ліквідації техногенних пустот;
- створено нову інформаційно-аналітичну карту геопросторового розташування потенційних закладних матеріалів та утворених техногенних пустот на території України.

Реалізація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи були впроваджені у навчальний процес підготовки фахівців НТУ «Дніпровська політехніка» за спеціальностями G16 «Гірництво та нафтогазові технології» та G2 «Технології захисту навколишнього середовища». Науково-практичні результати у вигляді методик, рекомендацій передані та впроваджені у науково-дослідну і проєктну діяльність Науково-дослідного гірничорудного інституту (НДГРІ) Криворізького національного університету, Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України і ТОВ «Гема Трейдинг».

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової проблеми, мети, ідеї та завдань досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій щодо їх практичної реалізації, а також у виконанні системного аналізу та узагальнення наукових джерел з оцінки порушень земної поверхні гірничими роботами та ефективності існуючих способів їх мінімізації; встановленні закономірностей просторово-часового розвитку провальних зон залізородних

шахт та їх впливу на ґрунтово-рослинний покрив прилеглих зон; науковому обґрунтуванню доцільності утилізації хвостів збагачення у складі пастових закладних сумішей; виявленню закономірностей іммобілізації важких металів при трансформації хвостів у монолітний закладний масив; розробленню концепції комплексної ліквідації різнотипних техногенних пустот; вдосконаленню методології чисельного моделювання геомеханічних процесів; встановленню закономірностей формування реологічних і міцнісних властивостей пастових закладних сумішей, визначенню їх компонентного складу та впливу дроблених порід на підвищення міцності; встановленню залежностей формування та трансформації геомеханічного стану масиву навколо пустот під впливом штучного закладного масиву; розробленню технологічних рішень і методик розрахунку параметрів ліквідації техногенних пустот із застосуванням пастового та комбінованого закладання; виконанню еколого-економічної оцінки ефективності комплексного підходу до їх ліквідації; виконанню лабораторних досліджень, аналітичного та чисельного моделювання, участі в апробації та впровадженні результатів дослідження; текст дисертації підготовлено автором особисто.

Апробація результатів роботи. Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та отримали схвалення на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях: «Наукова весна» (Дніпро, 2015); «Молодь: наука та інновації» (Дніпро, 2015); «Innovative Development of Resource-Saving Technologies of Mineral Mining and Processing» (Петросані, Румунія, 2016, 2018); «Школа підземної розробки» (Бердянськ, 2014, 2016 – 2021); «Physical & Chemical Geotechnologies» (Дніпро, 2019); «Сучасний рух науки» (Дніпро, 2019); «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (Харків, 2019); «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки» (Рівне, 2019 – 2021); «Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природо-користування в контексті сталого розвитку» (Херсон, 2019, 2021 – 2024); «Геотехнічні проблеми розробки родовищ» (Дніпро, 2019, 2022, 2024, 2025); «Збалансоване природокористування: традиції, перспективи та інновації» (Київ, 2023); «Essays of Mining Science and Practice» (Дніпро, 2023, 2024); «Українська школа гірничої інженерії» (Східниця, 2024, 2025); «Scientific Development of New Eastern Europe» (Рига, Латвія, 2024); «Екологічні проблеми сучасності» (Дрогобич, 2026).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані в 72 наукових працях, з яких: 16 статей у періодичних виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або WoS (з них 8 – у квартилі Q1 – Q2); 1 стаття у закордонному виданні; 21 стаття у періодичних наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України; 4 статті у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються наукометричними базами Scopus та/або WoS; 4 розділи у колективних монографіях, виданих міжнародними та вітчизняними видавництвами та 1 монографія; 2 патенти на корисну модель; 23 статті та тези доповідей у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (318 найменувань на 34 сторінках) і 6 додатків (на 8 сторінках), 174 рисунки,

79 таблиць. Обсяг основного тексту дисертації становить 509 сторінок, з них 16 – повністю займають рисунки та таблиці площею на всю сторінку. Загальний обсяг роботи – 584 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми досліджень, розглянуто зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету, ідею та завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, викладено основні наукові положення, наукову новизну та значення отриманих результатів, наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію результатів і структуру роботи.

Перший розділ дисертації присвячено аналізу, систематизації та узагальненню впливу гірничодобувної галузі на стан земної поверхні й довкілля, набутого досвіду та наукового доробку вчених у напрямку раціонального природокористування і формування альтернативних напрямів покращення техногенно-екологічної ситуації навколо утворених техногенних пустот.

Проведено аналіз даних осідань земної поверхні у гірничодобувних регіонах України й визначено, що на відміну від вугледобувних регіонів, де переважають в основному деформації типу плавного осідання з меншими амплітудами, найбільші за масштабом і глибиною деформації формуються у районах розробки залізрудних родовищ, зокрема у Криворізькому басейні, де поряд із зонами плавного осідання розвиваються локальні руйнівні форми порушень земної поверхні у вигляді провалів і зон обвалення глибиною 50 – 200 м.

Багаторічна підземна розробка рудних родовищ переважно системами з обваленням порід без закладання виробленого простору призвела до формування значних підземних пустот, розвитку процесів зсування та появи поверхневих деформацій різного типу. В результаті природні ландшафти трансформовано у гірничо-техногенні системи з високим рівнем геомеханічної та екологічної нестабільності, що створює загрози інфраструктурним об'єктам, життю і здоров'ю населення. Особливу техногенно-екологічну небезпеку становить розвиток провальних зон шахт і наявні у надрах непогашені підземні пустоти від підземної розробки рудних покладів шахт закритих рудоуправлінь, що мають місце у приповерхневій товщі 50 – 200 м. Періодичні виходи воронок на земну поверхню й провали свідчать про знаходження пустот у граничному стані, небезпечному до обвалення, що формує постійні техногенні та екологічні ризики.

На основі комплексного аналізу морфології та просторової структури порушень земної поверхні ідентифіковано чотири основні типи техногенних об'єктів: провальні зони шахт, зони плавного осідання, кар'єрні пустоти та відвали і хвостосховища промислових відходів. Встановлено, що сумарна площа порушених земель сягає близько 50% від площі м. Кривий Ріг, причому понад 65% становлять об'єкти накопичення відходів. Аналізом визначено, що функціонування гірничо-металургійного комплексу та тривалий видобуток залізних руд у Криворізькому басейні призвів до накопичення значних обсягів промислових відходів. Значна концентрація відходів для агломерації спричиняє

суттєве техногенне навантаження, що призводить до забруднення компонентів навколишнього природного середовища, впливає на здоров'я населення.

Традиційні заходи рекультивації, а саме засипання техногенних пустот відвальними породами, не забезпечує достатньої ефективності щодо блокування розвитку небезпечних деформаційних процесів через недостатні фізико-механічні властивості й не дозволяє утилізувати більш ширший спектр проблемних відходів, зокрема хвостів збагачення. Визначено, що недостатнього розвитку набули альтернативні напрями ліквідації техногенних пустот, що передбачають перехід від локальних заходів їх усунення до системного управління техногенно-екологічною безпекою гірничих територій.

Вирішенню проблем геомеханічно- та екологічнобезпечного видобування залізних руд, впровадженню ресурсозберігаючих технологій видобутку та переробки залізорудної сировини, а також розробки системи заходів покращення стану природного навколишнього середовища під впливом гірничих робіт присвячено багато праць провідних українських вчених, серед яких відомими є Ступнік М.І., Вілкул Ю.Г., Кузьменко О.М., Цариковський В.В., Капленко Ю.М., Азарян В.А., Хоменко О.Є., Калініченко В.О., Кононенко М.М., Калініченко О.В., Круковський О.П., Шапарь А.Г., Павличенко А.В., Тверда О.Я., Ковров О.С., Іщенко К.С., Бабій К.В., Медведєва О.О., Письменний С.В., Тарасютін В.М., Зубко С.А., Усатий В.Ю., Перегудов В.В., Євстратенко Л.І., Коптева Т.С. та закордонних вчених – Kraus T., Ma K., Zhang Q., Chen Q., Sun W., Li X., Oggeri C., Karlsson M., Fourie A. та багато інших. Проте, їхні дослідження стосувались здебільшого питань управління геомеханічним станом при традиційних технологіях розробки рудних покладів та системи оцінок і рівня впливу об'єктів гірничорудної галузі на природне середовище.

Залишаються недостатньо дослідженими принципи та підходи до управління геомеханічним станом масиву гірських порід і земної поверхні при ліквідації масштабних різнотипних техногенних пустот із використанням технології пастового закладання, адаптованої до підземного та відкритого просторів, із екологічнобезпечною утилізацією у його складі відходів гірничо-металургійного комплексу. Зазначені наукові прогалини стримують розробку нових ефективних природоохоронних заходів та реалізацію принципів раціонального надрокористування, що потребує вирішення.

Другий розділ роботи присвячено дослідженням ступеня екологічної небезпеки техногенних пустот, утворених розробкою рудних родовищ, а також накопичених відходів гірничо-металургійного комплексу. На підставі досліджень сформовано основи нової концепції комплексної ліквідації техногенних пустот від впливу підземної та відкритої розробки з утилізацією виду відходів гірничо-металургійного комплексу, що формує найбільш виражене техногенне навантаження на навколишнє середовище у пастових закладних сумішах.

З метою системного узагальнення та наукового обґрунтування рівня техногенно-екологічної небезпеки об'єктів порушень земної поверхні та надр, що формуються в умовах тривалого інтенсивного видобутку залізних руд, виконано комплексну багатофакторну систематизацію їх основних характеристик і факторів небезпеки. Диференціацію здійснено на основі ідентифікаційних ознак

об'єктів та сукупності геомеханічних, екологічних і соціально-економічних критеріїв оцінки небезпеки, що дозволило не лише об'єктивно порівняти масштаб існуючих загроз, але й виявити взаємозв'язок цих порушень як елементів єдиної природно-техногенної системи гірничодобувного регіону (табл. 1).

Таблиця 1 – Систематизація техногенних об'єктів гірничодобувних регіонів за класифікаційними ознаками, групами та рівнями техногенно-екологічної небезпеки

Група критеріїв	Ознака/Показник	Види техногенних об'єктів			
		Провальні зони шахт	Підземні пустоти	Закриті кар'єри	Відходи ГМК
Класифікаційні ознаки об'єктів	Джерело виникнення	ПГР	ПГР	ВГР	ПГР/ВГР
	Просторове положення	Глибинні	Глибинні	Глибинні	Висотні
	Характер прояву	Явний	Прихований	Явний	Явний
	Ступінь керованості	Некеровані	Некеровані	Керовані	Керовані
	Характер утворення	Раптові	Поступові	Поступові	Поступові
Групи та рівні техногенно-екологічної небезпеки	Геомеханічні та технологічні	Раптове обвалення/зсув	Високий	Надвисокий	Низький
		Масштаб деформацій	Надвисокий	Високий	Низький
		Порушеність масиву	Надвисокий	Високий	Відсутній
		Гідрологічні зміни	Надвисокий	Високий	Середній
		Погіршення видобутку	Високий	Середній	Відсутній
	Екологічні	Деградація ґрунтово-рослинного покриву	Надвисокий	Високий	Середній
		Забруднення атмосфери	Середній	Відсутній	Низький
		Забруднення гідросфери	Середній	Низький	Низький
		Втрата біорізноманіття	Надвисокий	Низький	Середній
	Соціально-економічні	Загроза для населення	Надвисокий	Надвисокий	Низький
		Загроза інфраструктурі	Надвисокий	Надвисокий	Низький
		Економічні збитки	Високий	Високий	Низький
		Втрата економічного потенціалу територій	Середній	Середній	Надвисокий

Примітка: ПГР – підземні гірничі роботи; ВГР – відкриті гірничі роботи; ГМК – гірничо-металургійний комплекс

На підставі виконаної систематизації встановлено, що техногенні порушення, сформовані внаслідок підземної та відкритої розробки родовищ, а також накопичення відходів гірничо-металургійного комплексу, характеризуються різним, але взаємопов'язаним рівнем геомеханічної, екологічної та соціально-економічної небезпеки. Визначено, що пріоритетну небезпеку становлять техногенні пустоти, утворені підземною розробкою, які є основним чинником порушення напружено-деформованого стану масиву гірських порід, та ініціюють розвиток деформаційних процесів і супутніх змін природно-техногенної рівноваги. Закриті кар'єри при цьому виступають додатковими просторовими елементами техногенно порушеного середовища, що впливають на загальну стійкість територій, а відходи гірничо-металургійного

комплексу, формуючи основне джерело довготривалого техногенного забруднення, розглядаються як ресурсна основа для розроблення екологічно безпечних технологічних процесів, спрямованих на зниження рівня техногенного ризику, раціональне використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки гірничодобувних регіонів.

Встановлений взаємопов'язаний характер розвитку геомеханічних процесів та екологічних наслідків свідчить, що техногенні об'єкти гірничодобувних регіонів функціонують як єдина взаємозалежна система. За таких умов окремий розгляд техногенних об'єктів не дозволяє раціонально оцінити їх загальний вплив на масив гірських порід, земну поверхню та довкілля, що призводить до прийняття локальних, малоефективних рішень. Таким чином, доцільним є застосування саме комплексного підходу до управління геомеханічною та екологічною безпекою техногенних об'єктів гірничодобувних регіонів.

Для візуалізації масштабів і характеру техногенного впливу наведено виявлені найбільш репрезентативні просторово-часові фрагменти, які відображають основні етапи розвитку деформацій земної поверхні через зміни контуру та площі найбільшої на сьогодні у Криворізькому басейні провальної зони шахти «Козацька» від моменту її формування до сучасного стану (рис. 1). У результаті визначення за супутниковими даними динамічних змін площі провальної зони ш. «Козацька» протягом повного циклу її утворення виявлена залежність зміни у часі (рис. 2а).

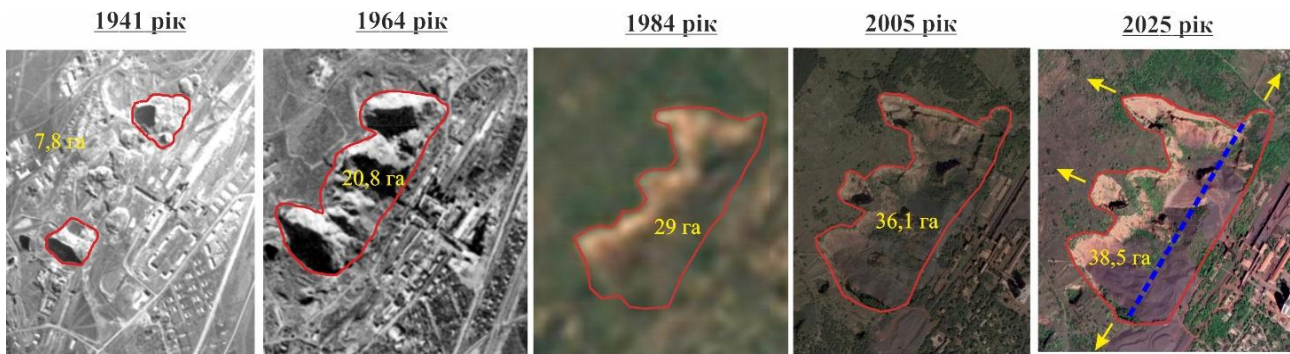


Рисунок 1 – Хронологічні фрагменти розвитку провальної зони ш. «Козацька»

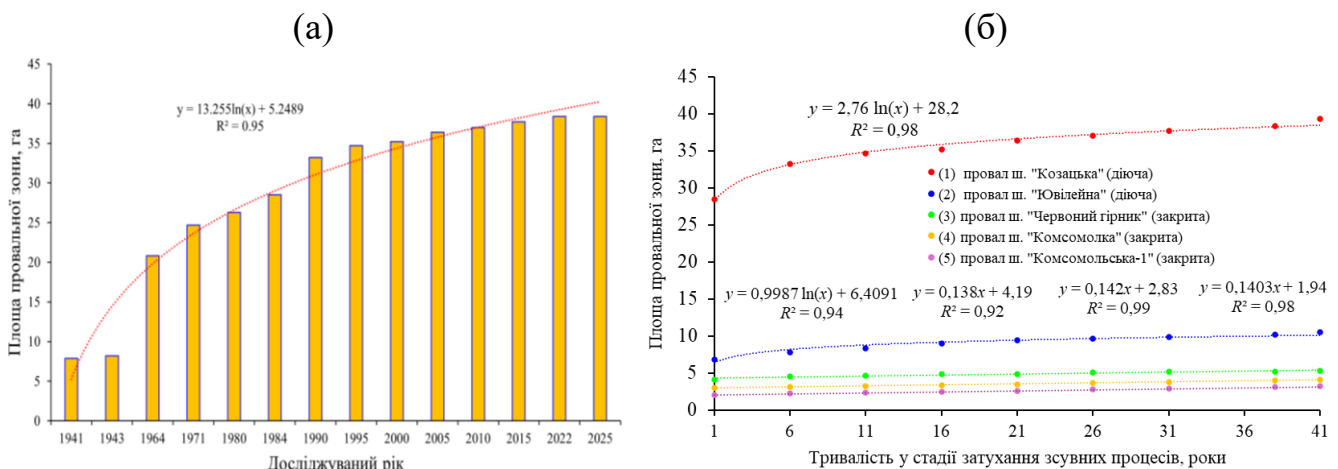


Рисунок 2 – Динамічні зміни площ провальних зон шахт: (а) повний цикл розвитку провальної зони ш. «Козацька»; (б) розвиток площ провальних зон діючих та закритих шахт у постобвальній фазі

Аналіз результатів показує виражену динаміку збільшення площі провальної зони шахти у часі, що відображає інтенсивність розвитку деформаційних процесів у масиві, а характер залежності найбільш точно, як з математичної, так і з геомеханічної точок зору, описується логарифмічною функцією. За характером залежності чітко простежуються активна обвальна (1941 – 1990 рр.) та умовно постобвальна фази (1990 – 2025 рр.). Представляє наукову цінність дослідження розвитку площ провальних зон як в умовах діючих шахт, так і вже закритих шахт. З цією метою у постобвальній фазі досліджено зміни площ у просторі та часі. Об'єктами досліджень були дві провальні зони, що перебувають під активним впливом підземних робіт діючих шахт «Козацька» та «Ювілейна» та три провальні зони закритих шахт, а результати зміни їх площ ілюструються на рис. 26.

Встановлено, що площа провальних зон закритих шахт без активного впливу підземних робіт протягом досліджуваного періоду змінюється помірно за лінійними залежностями, а провалів діючих шахт з активним впливом підземних робіт – за логарифмічними залежностями з поступово наростаючим характером. Визначено, що площі провалів діючих шахт у постобвальній фазі збільшились у 25 – 33%, що свідчить про їх подальший розвиток у часі й просторі та руйнівний вплив на прилеглі території. Виявлені результати доводять, що в умовах діючих шахт на розширення провалів переважно має місце вплив залишкових деформацій у масиві, тоді як закритих шахт – кліматичних факторів (водна та вітрова ерозії) і саме провальні зони діючих шахт становлять техногенно-екологічну небезпеку для прилеглих ландшафтів і промислової та цивільної інфраструктури.

Для оцінки впливу розширення провальної зони у постобвальній фазі на стан прилеглих ландшафтів досліджено просторово-часову зміну рослинного покриву за загальновизнаним у світовій практиці дистанційного зондування нормалізованим вегетаційним індексом NDVI. Об'єктом аналізу прийнято основну провальну зону ш. «Козацька» та прилеглі до її контуру буферні зони 0 – 50 і 50 – 100 м. Як природний еталонний фон використано контрольну ділянку лісостепоного ландшафту поза зоною впливу гірничих робіт на відстані 500 м у північно-східному напрямку. Сформовано масив даних індексу NDVI за 2016 – 2025 рр. на основі багатоспектральних знімків Sentinel-2. Для аналізу відбирали безхмарні знімки періоду максимальної вегетаційної активності (червень), здійснювали їх попередню обробку у SNAP та геопросторовий аналіз у ArcGIS. Для кожного року середнє значення NDVI визначали зонально-статистично за сукупністю растрових комірок у межах відповідного буферної зони, що забезпечило інтегральну оцінку стану рослинності навколо провальної зони.

За результатами досліджень встановлено, що математичної залежності зміни NDVI у 2016 – 2025 рр. зі стійким кореляційним зв'язком у часі не виявлено, оскільки регіональні гідрометеорологічні фактори, зокрема дефіцит або надлишкова волога, одночасно впливають як на досліджувані буферні зони, так і на еталонну контрольну ділянку. Тому техногенний вплив провальної зони оцінено за усередненими значеннями NDVI досліджуваного періоду відносно природного фону, що дозволило мінімізувати вплив зазначених факторів.

Встановлено, що усереднене значення NDVI знижується з 0,49 на контрольній ділянці до 0,36 у межах прилеглої до провалу території 0 – 100 м, або на 27%, при

цьому виявлено помітний просторовий градієнт пригнічення рослинності. Так, значення NDVI становить 0,38 у зоні 50 – 100 м і знижується до 0,34 у зоні 0 – 50 м, що свідчить про посилення техногенного впливу з наближенням до контуру провальної зони. Виявлене пригнічення вегетації рослинності кількісно підтверджує, що неконтрольоване розширення провалів через залишкові деформації та ерозійні процеси у постобвальній фазі призводить до виснаження прилеглого ґрунтово-рослинних покриву та зменшення його біомаси.

Відходи гірничо-металургійного комплексу, що масштабно накопичені у Кривбасі, відповідно до Національного переліку відходів України, відносяться до таких, що не є небезпечними. Проте, їх значні обсяги накопичення та тривале зберігання у хвостосховищах і відвалах формують істотне техногенно-екологічне навантаження на навколишнє середовище через процеси пиління, фільтрації та міграції забруднюючих речовин. З позиції екологічної безпеки вирішена задача виокремлення найбільш негативних для навколишнього середовища та населення накопичених відходів гірничо-металургійного комплексу та енергетичної галузі з метою виявлення пріоритетності їх утилізації. Для об'єктивного оцінювання розроблено систему інтегрального ранжування всіх місць видалення відходів, що базується на 6 екологічних критеріях. Розроблені диференційовані шкали дозволяють формалізувати рівень загрози від «низького» до «надзвичайно високого». Застосування бальної системи (від 1 до 4) дає змогу формалізувати якісні характеристики об'єктів та перевести їх у кількісну площину. Апробація методики на 45 офіційних об'єктах МВВ Криворізького басейну дозволила встановити пріоритетний порядок їх утилізації (табл. 2).

Таблиця 2 – Оцінка усередненої екологічної небезпеки
за категоріями місць видалення відходів Криворізького регіону

Категорія МВВ	Сума балів	К-ть, од.	Середній бал	Рівень екологічної небезпеки
Відвали кар'єрних і шахтних порід	604,0	33	18,52	високий
Хвостосховища	189	8	23,62	надзвичайно високий
Золошлаковідвал ДТЕК Криворізька ТЕС	17,0	1	17,0	високий
Відвали доменних відвальних шлаків	16,0	1	16,0	високий
Відвали доменних гранульованих шлаків	14,0	1	14,0	помірний
Відвали змішаних металургійних відходів	13,5	1	13,5	помірний

За результатами інтегрального ранжування відходів ГМК встановлено, що найбільший сумарний показник екологічної небезпеки характерний для відвалів кар'єрних і шахтних порід (604,0 бали) та хвостосховищ (189,0 балів), що зумовлено їх значним поширенням у регіоні. Проте, за середнім значенням інтегрального показника саме хвостосховища характеризуються найвищим рівнем екологічної небезпеки (23,6 балів), що свідчить про їх максимальну інтенсивність техногенного навантаження на довкілля серед досліджуваних об'єктів. Отримані результати дозволяють обґрунтовано визначити хвостосховища як пріоритетні об'єкти для першочергової реалізації природоохоронних заходів та впровадження екологічно безпечних технологій їх утилізації.

На основі дослідження видового різноманіття промислових відходів як потенційної сировинної бази закладних матеріалів Криворізького басейну уперше

розроблено класифікацію можливих способів закладання техногенних пустот, що включає варіації компонентних складів закладних сумішей і можливі комбінації в'язучих та інертних матеріалів. Встановлено, що для умов регіону можуть реалізовуватись основні способи закладання: сипуче, гідравлічне, ін'єкційне, твердіюче і пастове. Враховуючи визначену орієнтацію трансформації фізичного стану закладного масиву від сипкого до монолітного, необхідність утилізації хвостів збагачення як найбільш масового джерела техногенного навантаження, а також за сукупністю виявлених нами технологічних, екологічних, економічних і соціальних індикаторів доцільності, обґрунтовано пріоритетність їх застосування у технології пастового закладання для ліквідації різнотипних техногенних пустот.

Для обґрунтування екологічної безпеки трансформації дисперсних хвостів у монолітний пастовий масив для ліквідації техногенних пустот проведено експериментальні дослідження статичного вилуговування забруднюючих речовин із дисперсних хвостів та монолітного пастового масиву (рис. 3). Методика базується на світових стандартах і передбачає витримку зразків у деіонізованому водному середовищі при співвідношенні 10:1 з наступним аналізом контактної води фотометром Exact® Micro 20 (США) кожної доби.

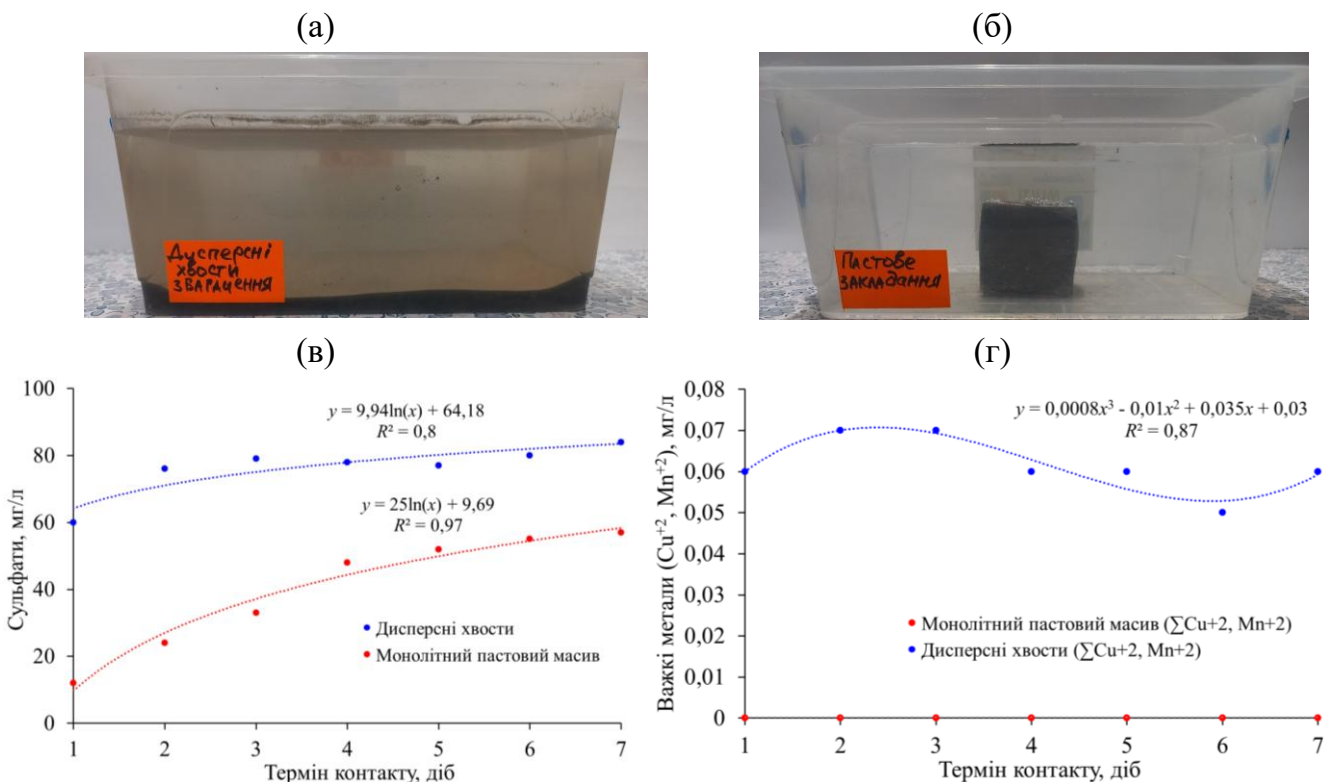


Рисунок 3 – Лабораторні дослідження екологічної безпечності перетворення хвостів збагачення у монолітний закладний масив: (а), (б) взаємодія дрібних та монолітизованих хвостів у закладний масив з екстрагентом; (в) залежності зміни вмісту сульфатів; (г) залежності зміни вмісту важких металів ($\Sigma Cu^{+2} + Mn^{+2}$)

Тривалість експериментів склала 7 діб у зв'язку з тим, що період охопив найбільш інтенсивну початкову стадію вилуговування та дозволив зафіксувати подальше уповільнення міграції. Аналізу підлягала зміна низки показників, забруднюючих речовин та важких металів: рН, жорсткість загальна високого рівня, залізо загальне, сульфати, нітрити, нітрати, амоній, фосфати, хлориди,

загальний вміст важких металів (Me^{+2}), мідь (Cu^{+2}), марганець (Mn^{+2}). На рис. 3 ілюструється частина отриманих результатів, зокрема динаміка вмісту сульфатів та сумарного вмісту токсичних металів Cu^{+2} і Mn^{+2} , обраних як найбільш важливі показники для оцінки міграційної активності хвостів та ефективності іммобілізації забруднюючих компонентів у монолітному закладному масиві.

Встановлено, що при контакті дисперсних хвостів з водним середовищем вміст сульфатів зростає за логарифмічною залежністю у 1,3 – 1,4 рази протягом 7 діб, тоді як у монолітному пастовому масиві їх зростання також описується логарифмічною залежністю, але концентрація на 25 – 30% є нижчою. У дисперсному стані хвостів емісія важких металів описується поліноміальною залежністю, тоді як у монолітному пастовому масиві емісія не зафіксована, що відповідає повному ефекту іммобілізації важких металів цементною матрицею масиву навіть за умов найгіршого сценарію контакту з водою максимальної розчинної здатності. Зафіксовано зменшення вилуговування заліза з монолітного масиву у 2 – 6 разів та інших речовин порівняно з дисперсними хвостами. Отримані наукові результати відкривають можливість екологічнобезпечного перетворення накопичених відходів збагачення у пастові закладні суміші для подальшого їх перетворення в монолітний закладний масив, що здатен вплинути на геомеханічну стабілізацію масиву та охорону надр при ліквідації пустот.

Враховуючи компактне геопросторове розташування утворених різнотипних техногенних пустот з об'єктами мінерально-сировинної бази закладних матеріалів, що є відходами гірничо-металургійного комплексу, та пов'язаної з ними складної техногенно-екологічної ситуації, розроблена нова екологоорієнтована концепція комплексної ліквідації техногенних пустот (рис. 4). Сутність концепції полягає у перетворенні накопичених хвостів збагачення, як джерела забруднення навколишнього середовища, в екологічнобезпечну пастову закладну суміш та подальше заповнення нею підземного простору. Реалізація здійснюється шляхом вилучення з намитих карт хвостосховища дрібних, де вже відбулося водовідведення, хвостів збагачення, що чинять забруднення на довкілля, та їх змішування з в'язкими матеріалами (цемент, металургійні шлаки, зола-винесення) і водою для утворення закладної суміші пастоподібного стану.

Виготовлена пастова суміш, що містить у своєму складі відходи гірничо-металургійного комплексу, спрямовується на заповнення різнотипних техногенних пустот: провальних зон шахт, непогашених підземних пустот і вироблених просторів закритих кар'єрів. У теплий період року пастове закладання застосовується як для відкритих, так і для підземних пустот; у холодний період – відкриті техногенні пустоти ліквідуються формуванням закладного масиву з відвальних порід поверх пастового шару, тоді як у підземних пустотах продовжується пастове закладання, оскільки температурні умови залишаються сприятливими для твердіння і набору необхідних механічних властивостей.

Визначено, що областю раціонального застосування розробленої концепції є центральна частина Криворізького басейну (рис. 5), де, на відміну від південної та північної зон, створені оптимальні умови, що обґрунтовано максимальною просторовою концентрацією комплексу техногенних пустот та їх близькістю (3 – 7 км) до ПрАТ «Центральний ГЗК» як основного джерела для пастової закладної суміші, що у підсумку забезпечує мінімальні логістичні витрати та високу готовність пустот до ліквідації.

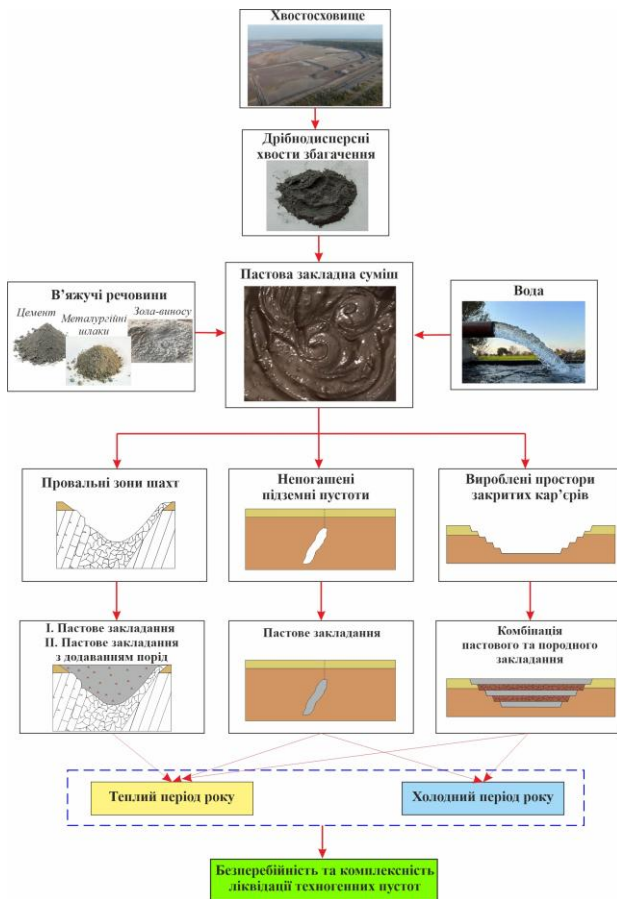


Рисунок 4 – Нова екологоорієнтована концепція комплексної ліквідації техногенних пустот з утилізацією відходів гірничо-металургійного комплексу

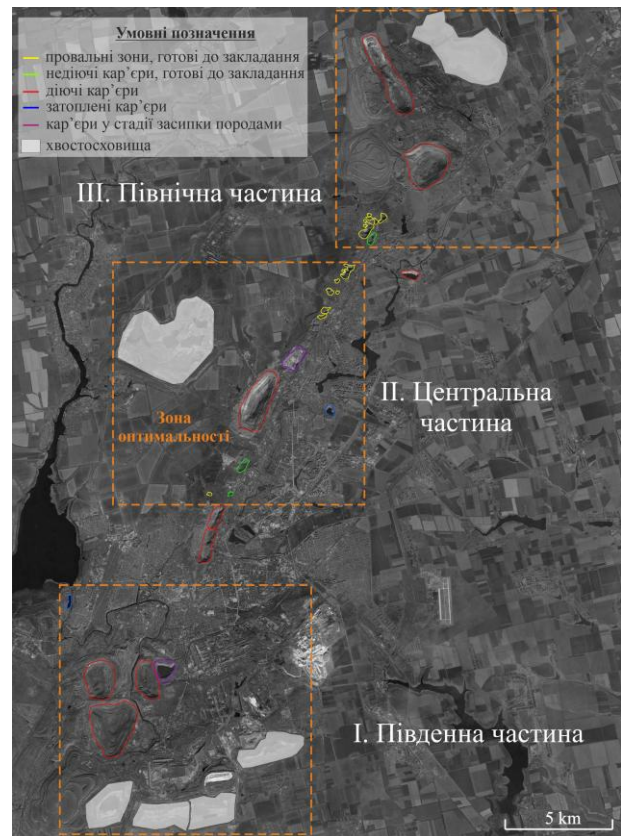


Рисунок 5 – Зонування території Криворізького басейну за перспективами застосування пастового закладання для ліквідації пустот

У **третьому розділі** розроблено методологію аналітичних, лабораторних і чисельних досліджень визначення оптимальних властивостей пастових закладних сумішей та масиву з використанням відходів гірничо-металургійного комплексу й оцінки їх впливу на трансформацію геомеханічної ситуації масиву гірських порід, охорону надр і земної поверхні навколо техногенних пустот, що ґрунтується на використанні нових підходів та принципів.

Для виконання лабораторних досліджень здійснено відбір зразків осушених залізорудних хвостів збагачення залізних руд з хвостосховищ для подальшого використання у складі закладних сумішей. Як в'язучі речовини та наповнювачі використовувались портландцемент, доменний граншлак, зола-виносу, природний вапняк і відвальні породи. Для визначення хімічного та мінералогічного складу закладних матеріалів використано рентгенофлюоресцентний, рентгенодифракційний та мікроскопічний методи, що дозволило оцінити їх придатність для формування пастової закладної суміші.

Комплексне оцінювання властивостей пастового закладання здійснювалось на основі багатофункціонального лабораторного блоку досліджень, що дозволило дослідити властивості на всіх етапах трансформації від рідкої суміші до монолітного масиву. Методика поділена на чотири основні групи властивостей: фізичні – гранулометрія та насипна щільність; фізико-хімічні – електропровідність і терміни схоплювання сумішей; реологічні – рухливість, динамічна в'язкість,

напруження й швидкість зсуву; фізико-механічні – міцність на одноосьовий стиск і модуль деформації. Для виконання комплексу експериментальних досліджень використовувалось сучасне лабораторне обладнання.

Розроблено експериментальну програму рецептур закладних сумішей з варіацією дозування в'язучого матеріалу 3 – 9%, загальної твердої частини у межах 70 – 80% і, відповідно, водотвердого співвідношення для виявлення критичних меж досягнення пастоподібного стану. Еталонні рецептури закладних сумішей базувались як із використанням класичних компонентів цементу, хвостів та води, так і з альтернативними в'язучими матеріалами й додаванням крупного наповнювача з дроблених порід для встановлення можливості підвищення міцності закладного масиву. Здійснювалось поетапне зважування компонентів, затворення водою, їх змішування у лабораторному міксері та формування серій кубічних зразків. Кубічні зразки масиву піддавались витримці в умовах, що імітують як відкрите кліматичне, так і шахтне середовища.

Методика аналітичних і чисельних досліджень розроблена для окремих видів техногенних пустот: провальні зони діючих шахт, підземні непогашені пустоти старих шахт та вироблені простори закритих кар'єрів.

Аналітичні дослідження проводились за новими розрахунковими схемами для різних типів техногенних пустот з урахуванням їх геометрії та умов взаємодії із навколишнім масивом гірських порід. Для провальних зон діючих шахт розроблено схему геомеханічної системи «масив – обвалені породи – провальна зона», що описує взаємодію активного клину висячого боку та пасивного блоку обваленого конгломерату, при цьому геометрію системи параметризовано тригонометричними залежностями та методом Гауса, а опір обвалених порід визначено з урахуванням ефекту Янсена. На основі балансу рушійних і утримуючих сил встановлюється навантаження на відкос провалу та міцність закладного масиву. Для цього типу пустот застосовано метод граничної рівноваги шляхом трансформації нелінійного критерію Хоека-Брауна в еквівалентні параметри Мора-Кулона.

Для умов непогашених підземних пустот старих шахт розрахункову схему подано у вигляді похилого паралелограма в площині вхрест простягання покладу, на який діє зсувний клин порід, обмежений кутами падіння рудного тіла та зрушення порід, а мінімально необхідна міцність закладання визначається через перетворене рівняння Мора-Кулона, що пов'язує її з головними напруженнями σ_1 і σ_3 . Для вироблених просторів закритих кар'єрів стійкість багат шарового закладного масиву оцінюється шляхом сумування деформацій стиску окремих шарів за законом Гука з урахуванням ефектів аркоутворення та перерозподілу напружень на борти кар'єру, що дозволяє отримати аналітичний вираз профілю осідання поверхні закладного масиву за шириною кар'єру під дією власної ваги та навантажень.

Чисельне моделювання геомеханічного стану масиву навколо техногенних пустот залізрудних родовищ та під впливом сформованого закладного масиву здійснювалось у ліцензійному програмному комплексі *Phase 2*, що функціонує на основі методу скінченних елементів. Вперше для умов моделювання геомеханічного стану масиву в умовах Криворізького залізрудного басейну застосовано нелінійний критерій міцності Хоека-Брауна, що достовірно описує напружено-деформований стан тріщинуватого скельного масиву. Для таких

елементів геомеханічних моделей як сипучий породний масив, пастовий закладний масив і наносні породи використано критерій міцності Мора-Кулона.

Чисельним моделюванням досліджувалась трансформація геомеханічного стану масиву гірських порід навколо провальних зон шахт і непогашених підземних пустот як за відсутності закладного масиву, так і при його формуванні у їх просторах та стійкість поверхні закладного масиву в кар'єрних виїмках. У методиці моделювання враховано детальну та достовірну стратиграфічну будову масиву центрального Кривбасу, де сконцентрована найбільша кількість старих і діючих сьогодні шахт, та визначено літолого-механічні властивості масиву з III по VII залізисті та сланцеві горизонти, у межах яких залягають рудні поклади.

Для відтворення в геомеханічній моделі геометрії провальних зон на земній поверхні за умов обмеженості достовірних історичних даних параметрів розробки покладів і неможливості дискретного моделювання розроблено новий підхід, що дозволяє реконструювати геометричні параметри провалу без історичного поетапного моделювання процесів зрушення. Підхід ґрунтується на розрахунковій схемі, що враховує фактичну глибину розробки, кут падіння покладу, кут розривів, кут воронкоутворення, потужність наносів і коефіцієнт розпушення обвалених порід, та дає змогу визначати ефективну площу вилучених запасів і за допомогою геометричних функцій відтворити параметри провалів (рис. 6).

Перевірка підходу з відтворення геометрії та форми провальної зони на прикладі провалу ш. «Козацька» показала узгодженість з фактичними даними з розбіжністю 10–15%, що підтверджує придатність підходу. На підставі розрахункових схем порушеного історичним видобутком масиву за вдосконаленим підходом при побудові безпосередньо геомеханічної моделі у програмі *Phase 2* зімітовано поточну геомеханічну ситуацію на глибині 1300 м з утвореною провальною зоною та диференціацією 4-х зон деструкції: від хаотичного обвалення до плавного прогину (рис. 7), яким задано відповідний ступінь порушеності через індекс геологічної міцності GSI.

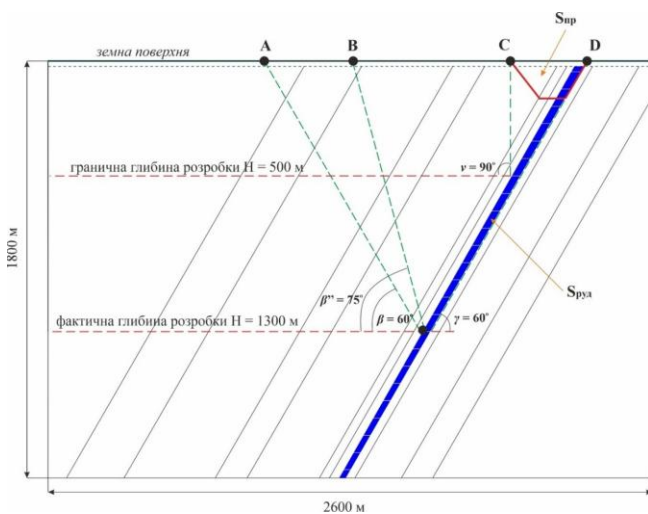


Рисунок 6 – Розрахункова схема параметрів зсувних процесів при розробці крутоспадного рудного покладу ($\alpha = 60^\circ$) для відтворення геометричних параметрів провальної зони

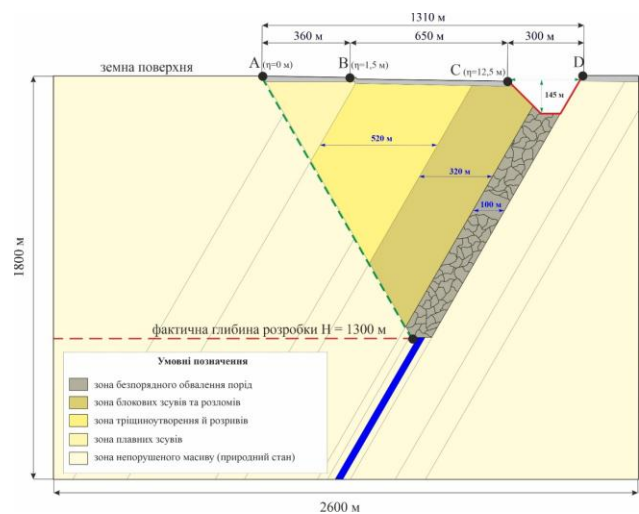


Рисунок 7 – Розрахункова схема формування провальної зони та зон порушень масиву зсувними процесами при фактичній сьогоднішній глибині відпрацювання покладу ($\alpha = 60^\circ$)

Таке рішення дозволило достовірно врахувати накопичені напруження і деформації та прогнозувати трансформацію геомеханічної ситуації при поетапному вилученні запасів до горизонту 1800 м із закладанням провальних зон.

Розроблено геомеханічну модель гірського масиву з утвореною провальною зоною внаслідок підземної розробки рудного покладу та запланованим подальшим його відпрацюванням від глибини 1300 до 1800 м. Визначено фізико-механічні властивості непорушених гірських порід з урахуванням стратиграфічної будови (GSI, модулі пружності, коефіцієнти Пуассона, кути внутрішнього тертя тощо). Геометричні розміри геомеханічної моделі приймаються наступними: довжина моделі – 2600 м, висота – 1800 м. Прийнята усереднена для рудних покладів горизонтальна потужність 25 м, а кут падіння варіюється 50, 60 і 70°, оскільки саме цей елемент залягання покладу найбільше впливає на форму деформацій земної поверхні внаслідок розробки запасів та розвитку зсувних процесів у породах висячого боку. Моделюються сценарії без закладання провалу, закладання відвальними породами та пастове закладання й досліджується ступінь розвитку та блокування деформацій земної поверхні.

Розроблено чисельну модель шаруватого масиву, що містить непогашену підземну пустоту від підземної розробки покладів старими шахтами, для моделювання ймовірності обвалення земної поверхні та виявлення приграничного стану, за якого обвалення можна попередити, сформувавши у пустотах пастовий монолітний масив. Розглядаються 5 глибин розташування покрівлі пустоти від земної поверхні (50, 100, 150, 200 і 250 м), 3 варіанти кутів падіння покладу (50, 60 і 70°), а також потужність покладу 25 м і змінні варіанти довжини покладу за падінням, яка приймається 50 м та поступово збільшується на крок 10 – 15 м до розміру, за якого відбувається втрата цілісності масиву. Наявність приграничного стану за багатоваріантним моделюванням встановлюється за сформованим деформаційним зв'язком між контуром пустоти та земною поверхнею без фази прогресуючого обвалення, що контролюється критеріями $U_{нов} = 0,2$ м та $U_{конт} = 0,15 m_{гор}$. З метою оцінки геологічного індексу GSI масиву навколо пустот, що залягають відносно неглибоко, за даними інформаційних джерел здійснено аналіз існуючих фотографій структури та тріщинуватості відслонень масиву гірських порід у зонах активних провалів.

Розроблено схеми чисельного моделювання, які дозволяють оцінити стійкість поверхні закладного масиву при ліквідації кар'єрних виїмок. Розглядається традиційний сипучий породний масив та інноваційний комбінований пасто-породний масив. Для кожного типу закладного масиву змодельовано різні умови експлуатації: вплив власної ваги (гравітації), складні сценарії, що враховують поєднання гравітаційних сил із зовнішнім зосередженням навантаженням, а також інтеграцію в структуру масиву підземних сховищ.

У **четвертому розділі** викладено результати аналітичних досліджень визначення необхідної міцності закладного масиву при ліквідації техногенних пустот від впливу підземної розробки рудних покладів та стійкості поверхні закладного масиву вироблених просторів кар'єру внаслідок відкритої розробки.

Для виконання аналітичних досліджень для кожного виду техногенної пустоти розроблено розрахункові аналітичні схеми, що ілюструються на рис. 8.

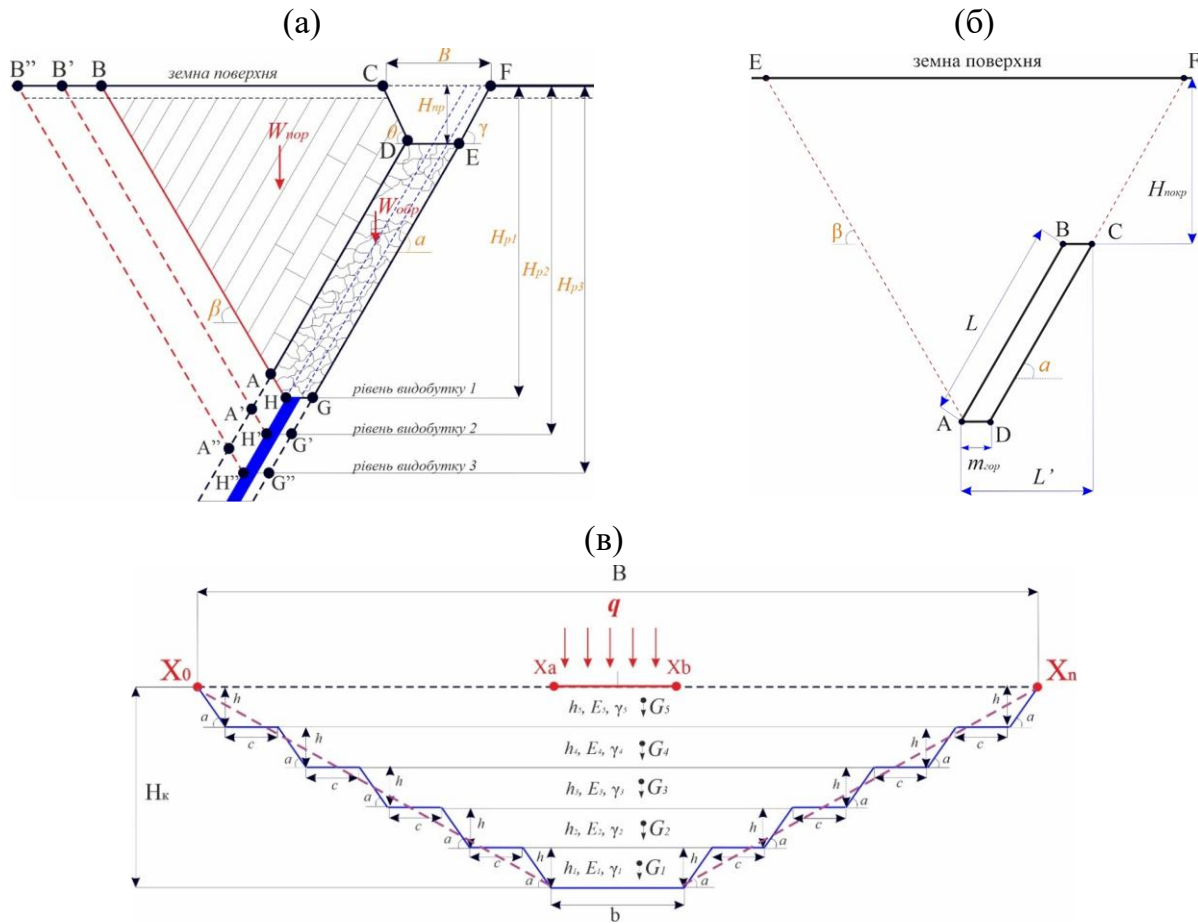


Рисунок 8 – Розрахункові схеми аналітичних досліджень:

- (а) визначення величини некомпенсованого тиску на відкис провальної зони;
 (б) визначення величини максимального стискаючого напруження σ_1 на контурі підземної пустоти, що діятиме на закладний масив; (в) визначення величини осідання поверхні закладного масиву за шириною кар'єру під дією гравітаційних сил та зовнішньому навантаженні

Аналітичні розрахунки виконуються в умовах плоскої деформації з прийнятим розміром масиву за простяганням 1 м. Згідно схеми (рис. 8а), величина некомпенсованого тиску від дії геомеханічних процесів масиву на стінку відкосу провалу CD провальної зони $CDEF$ може бути визначена як різниця результуючої рушійної сили $F_{рез}$ та реактивної утримуючої сили F_{AD} , віднесеної до довжини відкосу провалу L_{CD} :

$$P_{CD} = \frac{F_{рез} - F_{AD}}{L_{CD}}, \text{ МПа.}$$

Довжина відкосу провальної зони L_{CD} зі сторони висячого боку, на яку діє вплив некомпенсованої результуючої сили, визначається через глибину провалу H_{np} та кута відкосу провалу висячого боку θ . Результуюча рушійна сила $F_{рез}$ може бути визначена як різниця між зсувною (тангенційною) силою $F_{зсув}$, що прагне змістити породний клин униз за площиною, та максимальною утримуючою силою $F_{утр}$, яка буде протидіяти цьому зміщенню:

$$F_{рез} = F_{зсув} - F_{утр}, \text{ МН.}$$

Зсувна сила $F_{зсув}$ є складовою сили ваги $W_{нор}$ активного породного клину $ABCD$, що спрямована вздовж площини зсуву AB , залежить від геометрії клину та кута нахилу цієї площини до горизонту β (кута обвалення), а також основним дестабілізуючим фактором, що викликає тенденцію до зсуву активного блоку вниз. Максимальна утримуюча сила F_{ymp} є граничним опором зсуву, який може чинити сам масив порід висячого боку площиною AB , і визначається:

$$F_{ymp} = c_{нор} \cdot L_{AB} + N_{AB} \cdot \tan(\varphi_{нор}), \text{ МН},$$

де $c_{нор}$ – сила зчеплення порід висячого боку, МПа; L_{AB} – довжина площини обвалення AB , м; $\varphi_{нор}$ – кут внутрішнього тертя порід висячого боку, град; N_{AB} – нормальна сила, що притискає клин до площини AB , МН.

Повний аналітичний вираз максимальної утримуючої сили F_{ymp} з врахуванням отриманих виразів довжини площини обвалення AB та нормальної сили, що притискає клин до площини N_{AB} , матиме вигляд:

$$F_{ymp} = c_{нор} \cdot \left(\frac{H_p - \left(\frac{2m \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right)}{\sin(\beta)} \right) + W_{нор} \cdot (\cos \beta + \lambda \cdot \sin \beta) \cdot \tan(\varphi_{нор}), \text{ МН}.$$

Оригінальність визначення максимальної утримуючої сили F_{ymp} полягає у використанні несталіх параметрів зчеплення $c_{нор}$ та кута внутрішнього тертя $\varphi_{нор}$, а їх еквівалентних значень, отриманих шляхом трансформації нелінійного критерію Хоека-Брауна у параметри Мора-Кулона для конкретного рівня напружень, що дозволяє врахувати залежність міцнісних характеристик тріщинуватого масиву від глибинних стискаючих напружень.

Сила F_{AD} являє собою граничний пасивний опір зсуву масивом обвалених порід фігури $ADEGH$, величина якого обмежується характеристиками міцності конгломерату такими як зчеплення $c_{обв}$ та кутом внутрішнього тертя $\varphi_{обв}$ відповідно до критерію Мора-Кулона. При формуванні сил опору тертя основне значення відіграють обтискаючі нормальні напруження від власної ваги масиву обвалених порід $W_{обв}$, розподіл яких за глибиною носить нелінійний характер через прояв ефекту склепіння, а саме ефекту Янсена. Сила F_{AD} визначається:

$$F_{AD} = (\sigma_v(z) \cdot K) \cdot L_{AD} \cdot \tan(\varphi_{обв}) + c_{обв} \cdot L_{AD}, \text{ МН},$$

де $\sigma_v(z)$ – усереднене за висотою стовпа вертикальне напруження; для розрахунку сили тертя від напруження на глибині z з урахуванням ефекту Янсена, МПа; $z = H_p - H_{нр}$, м; K – коефіцієнт бічного розпору у стані спокою, ще переорієнтовує вертикальний тиск у нормальний бічний тиск на площину контакту AD і визначається як $K = 1 - \sin(\varphi)$; L_{AD} – довжина похилої лінії контакту між активним клином порід висячого боку та пасивним клином масиву обвалених порід, м; $c_{обв}$ – сила зчеплення масиву обвалених порід, МПа; $\varphi_{обв}$ – кут внутрішнього тертя обвалених порід, град.

Для визначення вертикальних напружень у масиві обвалених порід на розрахунковій глибині відомий вираз ефекту Янсена модифіковано шляхом введення параметрів, що враховують геометрію провальної зони та змінну висоту

стовпа обвалених порід, зокрема глибину провалу H_{np} і поточний рівень гірничих робіт H_p , а також фізико-механічні характеристики обвалених порід та гідравлічний радіус їх поперечного перерізу.

Розроблена аналітична модель дозволяє визначати ймовірність існування некомпенсованого тиску по лінії відкосу провальної зони зі сторони масиву порід всього боку покладу та визначати функцію монолітного закладного масиву: рекультивация з гідроізоляцією або блокування деформаційних процесів земної поверхні. Науковою цінністю є встановлення залежностей некомпенсованого тиску по лінії відкосу провалу як інтегральної характеристики силового дисбалансу в геомеханічній системі залежно від глибини ведення очисних робіт, геометричних параметрів провалу та кута падіння рудного покладу. Практична цінність аналітичного апарату полягає в обґрунтуванні вимог до міцнісних і деформаційних характеристик пастового закладного масиву залежно від його функції.

Для непогашених підземних пустот аналітичне визначення необхідної міцності пастового закладного масиву ґрунтується на класичному критерії міцності Мора-Кулона та його аналітичному перетворенні через співвідношення між головними напруженнями σ_1 і σ_3 та переході закладного масиву в режим роботи на одновісний стиск. Отриманий за теорією Мора-Кулона аналітичний вираз, що пов'язує зовнішнє навантаження та внутрішню міцність закладного масиву з урахуванням коефіцієнту міцності N , має вигляд:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot N + UCS, \text{ МПа.}$$

Для отримання підсумкового аналітичного виразу визначення необхідної міцності пастового закладного масиву UCS перетворимо вираз σ_1 :

$$UCS = \sigma_1 - \sigma_3 \cdot N, \text{ МПа.}$$

Найбільш небезпечний напружений стан формується на контурі відслонення, а саме у центральній частині пустоти, де ефект бічного підпору σ_3 відсутній або наближений до $\sigma_3 = 0$, і закладний масив переходить у режим роботи на одновісний стиск. Саме в цих умовах при перевищенні величини діючого напруження σ_1 над власною міцністю масиву відбудеться його пластичне руйнування. Тому, виходячи з принципу забезпечення надійності, визначення необхідної міцності виконується для найгіршого сценарію навантаження, а саме для умов одновісного стиску без урахування бічного обтиснення. Тоді:

$$UCS = \sigma_1 - 0 \cdot N; UCS = \sigma_1.$$

Згідно схеми рис. 8б, навантаження на закладний масив формується як різниця між рушійною зсувною силою активного клину порід $F_{зсув}$ та сумарними утримуючими силами вздовж площин ковзання F_{ymp} , а максимальне стискаюче напруження σ_1 визначається як відношення цієї результуючої сили до фактичної довжини контакту закладання з масивом гірських порід L_{AB} :

$$\sigma_1 = \frac{F_{зсув} - F_{ymp}}{L_{AB}}, \text{ МПа.}$$

Після аналітичного визначення геометричних параметрів пустот, довжин площин ковзання і фактичної довжини контакту закладного масиву з породами, а також вираження зсувної та утримуючої складових навантаження через параметри гірничо-геологічних умов, отримано новий узагальнений аналітичний вираз для максимального стискаючого напруження σ_1 :

$$\sigma_1 = \frac{\left(\left[\left(\frac{L \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right) \cdot \left(\frac{L \sin \alpha}{2} + H \right) + mH + \frac{H^2}{2} \cdot (\cot \beta + \cot \alpha) \cdot \gamma \sin \alpha \right] - \right.}{L - \frac{m \cdot \sin \theta}{\sin(\alpha - \theta)}} \cdot \cos \alpha$$

$$- \left[C \cdot \left(\frac{H + L \sin \alpha}{\sin \beta} + \frac{H}{\sin \alpha} \right) + \frac{\gamma}{2} \cdot \left((H + L \sin \alpha)^2 \cdot \cot \beta \cos \beta + H^2 \cot \alpha \cos \alpha \right) \cdot \tan \phi \right] \cdot \cos \alpha$$

$$\frac{\quad}{L - \frac{m \cdot \sin \theta}{\sin(\alpha - \theta)}}, \text{ МПа.}$$

Враховуючи, що найбільш небезпечний стан виникає на контурі відслонення, де бічний відпір відсутній ($\sigma_3 = 0$), необхідна міцність закладного масиву на одновісний стиск UCS повинна дорівнювати або перевищувати діюче напруження:

$$UCS_{необх} \geq \sigma_1.$$

Наукова цінність розробленої аналітичної моделі полягає у встановленні залежностей формування максимальних головних напружень σ_1 на контурі непогашеної підземної пустоти залежно від її геометричних параметрів, гірничо-геологічних умов та механічних властивостей породного масиву, що дозволяє визначити умови переходу закладного масиву в режим роботи на одновісний стиск. Практична цінність моделі полягає у можливості за різних умов розташування пустоти визначати необхідну міцність пастового закладного масиву та як похідну раціональну рецептуру закладної суміші.

На основі розрахункової схеми закладного масиву в межах виробленого простору кар'єру (рис. 8в), що є невід'ємною частиною концепції комплексної ліквідації пустот, закладний масив розглядається як багатошарове пружне середовище, що деформується під дією власної ваги та можливих зовнішніх навантажень. Аналітичний опис осідання базується на законі Гука для стиску окремих шарів із урахуванням розподілу вертикальних напружень з глибиною, перерозподілу навантаження в поперечному перерізі кар'єру на борти та впливу коефіцієнта бокового тиску. Послідовне визначення локальних і середніх вертикальних напружень та сумування деформацій стиску шарів дозволило отримати узагальнений аналітичний вираз для визначення профілю осідання поверхні закладного масиву кар'єрної пустоти, проте тільки з урахуванням дії його власної ваги. З позиції ефективного відновлення земної поверхні над закритими кар'єрами шляхом ліквідації їх пустот закладним масивом в умовах промислових регіонів доцільно досліджувати не лише розподіл осідань поверхні закладного масиву, спричинених його гравітаційним навантаженням, а й поведінку масиву під дією додаткових зовнішніх навантажень, зумовлених розміщенням потенційних інфраструктурних об'єктів. Повний аналітичний вираз величини осідання поверхні закладного масиву S за шириною кар'єру в будь-якій його точці X як під дією гравітаційних сил, так і при зовнішньому зосередженому навантаженні при будівництві інфраструктурного об'єкту матиме вигляд:

$$S(X) = \sum_{i=1}^{n(X)} \left[\frac{\left(\left(\sum_{j=i+1}^{n(X)} (k_j \gamma_j g h_j) + \frac{k_i \cdot \gamma_i g h_i}{2} \right) + \beta \left(\sum_{j=1}^n (k_j \gamma_j g h_j) - \sum_{j=1}^{n(X)} (k_j \gamma_j g h_j) \right) + \left(q \frac{(x_b - x_a)}{(x_b - x_a) + 2z_i \cdot \tan(\alpha)} \right) \right) \cdot h_i}{E_i} \right], \text{ М,}$$

де i – номер шару, у якому розраховується вертикальне середнє напруження σ_i , $i = 1$ – найнижчий шар (днище кар'єру), $i = n$ – верхній шар (біля поверхні); j – індекс шару, який знаходяться вище шару i та чинить на нього тиск; $n(X)$ – кількість шарів закладного масиву у вертикальному стовпі під точкою X , що визначається локальною глибиною закладного масиву; h_i – висота i -го закладного шару, м; γ_i – щільність матеріалу j -го шару закладного масиву, т/м³; α – кут розсіювання зовнішнього навантаження, град; k_i – коефіцієнт бокового тиску; β – коефіцієнт перерозподілу вертикального тиску на борти кар'єру; x_a , x_b – координати початку та кінця ділянки прикладання зовнішнього навантаження на поверхні закладного масиву; z_i – глибина від поверхні закладного масиву до середини i -го шару, м; q – величина зовнішнього навантаження від інфраструктурного об'єкта, МПа; E – модуль деформації закладного масиву, МПа.

Отриманий аналітичний вираз описує величину осідання поверхні закладного масиву як суму деформацій стиску окремих шарів багатошарової пружної системи з урахуванням їх механічних властивостей і геометричних параметрів. Модель враховує розподіл вертикальних напружень за глибиною закладного масиву, перерозподіл навантажень у поперечному перерізі кар'єру з передачею частини вертикального тиску на борти кар'єру, вплив коефіцієнта бокового тиску та коефіцієнта перерозподілу вертикальних напружень, змінну глибину закладного масиву по ширині кар'єру, а також додаткові вертикальні напруження від зовнішнього зосередженого навантаження, що передається у масив із поступовим розширенням площі його розсіювання з глибиною.

Наукова цінність аналітичного виразу полягає у розробці прогностичного інструментарію визначення величини осідань поверхні закладного масиву в будь-якій точці за шириною кар'єру при різній його структурі (однорідна, комбінована), що враховує механічні властивості закладного масиву, фундаментальні закономірності деформування сипучих і суцільних середовищ, геометрію вироблених просторів кар'єру та вплив додаткових зовнішніх навантажень з урахуванням їх просторового перерозподілу у товщі закладного масиву.

У **п'ятому розділі** викладено результати комплексних експериментальних досліджень фізико-хімічних, реологічних, і міцнісних властивостей закладних матеріалів, сумішей та масивів для ліквідації техногенних пустот, сформованих на основі відходів гірничо-металургійного комплексу.

Гранулометричним аналізом відібраних лежалих хвостів збагачення з осушених карт наміву встановлено, що вони відзначаються широким полідисперсним розподілом фракцій із медіанним розміром частинок $D_{50} = 55 - 60$ мкм, при цьому $-0,071$ мм – 72,8%. Гранулометричний склад є технологічно сприятливим для досягнення пастоподібного стану сумішей, оскільки вміст 18% класу -25 мкм ініціює первинне структуроутворення, забезпечуючи необхідну в'язкість та межу текучості й мінімізацію швидкої сегрегації та водовідділення, а співвідношення більш крупніших фракцій сприяє формуванню щільній упаковці зернового скелету суміші при мінімальній водопотребі та витраті в'язучого матеріалу. Оригінальність використання саме лежалих хвостів для формування пастових сумішей полягає у використанні не традиційних згущених хвостів згідно світової практики, а саме осушених хвостів з намитих карт хвостосховищ, які за тривалий

час набули зміненого фракційного стану. Мінералогічний аналіз показав, що до складу дрібнодисперсних хвостів збагачення входять кварц, гематит, магнетит, карбонатні породи та інші фази. Високий вміст кремнезему та його шорстка форма позитивно впливатимуть на фізико-механічні властивості пастового закладання. Проаналізовано хімічний та мінералогічний склади потенційних в'язучих матеріалів. Встановлено, що поряд із портландцементом, який формує міцну матрицю, економічно доцільним частковим замінником є доменний гранульований шлак, що містить близько 40% аморфної фази та має модуль основності 1,1, при цьому зола-виносу, що відноситься до класу F, і природний вапняк є додатковими мінеральними добавками.

За результатами візуальної оцінки фізичного стану консистенції виготовлених закладних сумішей встановлено, що незалежно від дозування в'язучого матеріалу, суміші з масовою концентрацією твердого 70% характеризуються надлишковою текучістю і розшаруванням, а при 80% переходять у жорсткий, малорухомий стан. Оптимальною, з точки зору реології, є концентрація 75%, яка забезпечує формування однорідної пастоподібної структури (рис. 9).

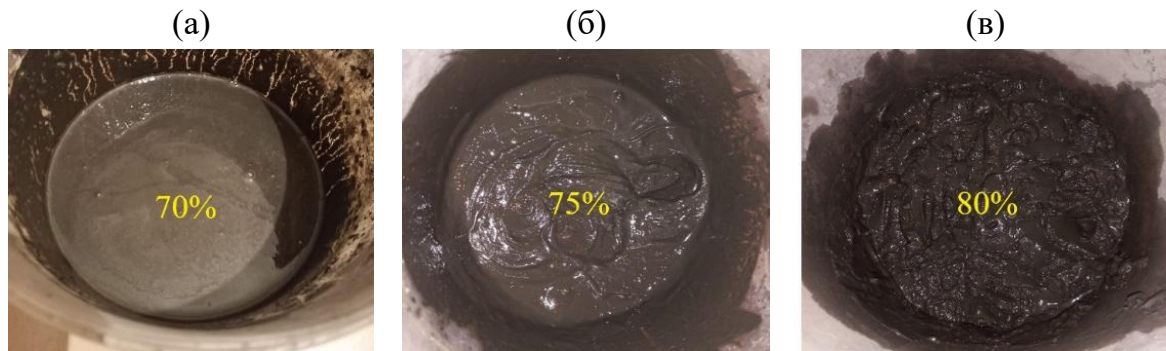


Рисунок 9 – Консистенція закладних сумішей при різному вмісті загальної твердої частини (інертний заповнювач + в'язучий матеріал): (а) 70%; (б) 75%; (в) 80%

Результати натурних спостережень за фізичним станом консистенцій закладних сумішей корелюють зі зміною величини їх осадки від дозування цементу та вмісту твердої частини, які представлено у вигляді низки встановлених залежностей (рис. 10). Встановлено, що вплив дозування в'язучого на величину осідання конуса критично залежить від загальної масової концентрації твердої фази (рис. 10а). При вмісті твердого у суміші 70% збільшення частки цементу до 9% інтенсивно знижує її рухливість за експоненційним законом, що пояснюється активним зв'язуванням надлишкової води та ростом структурних утворень.

При підвищенні твердого до 75 і 80% вплив в'язучого нівелюється, а залежність набуває пологого лінійного характеру і в умовах дефіциту води дозування цементу виступає другорядним фактором впливу. Встановлено, що домінуючим фактором управління рухливістю пастової суміші є вміст твердої фази (рис. 10б), вплив якої на осадку конуса апроксимується поліномами 2-го порядку. Визначено, що для оптимальних транспортабельних властивостей сумішей критичним параметром у забезпеченні стабільного пастоподібного стану для всього досліджуваного діапазону в'язучого 3 – 9% є вміст твердої фази 75%.

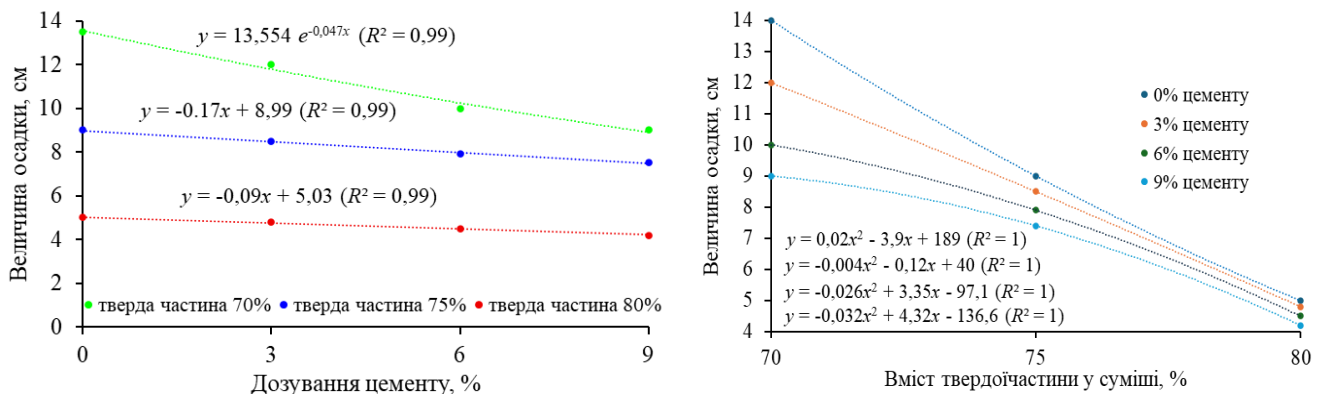


Рисунок 10 – Залежності величини осадки закладної суміші від дозування цементу при різному вмісті загальної твердої частини (а) та вмісту загальної твердої частини при різному дозуванні цементу (б)

Методами електропровідності та приладом Віка досліджено кінетику гідратації пастових сумішей при 75% твердого і дозуванні цементу 3 – 9%. Встановлено хвилоподібний характер іонних процесів із піком електропровідності 3,25 – 4,65 мСм/см, що корелює з початком схоплювання, а також поліноміальну залежність 3-го порядку між піком і вмістом цементу, що дозволяє використовувати електропровідність як індикатор міцності закладного масиву.

Здійснено випробування кубічних зразків на одноосовий стиск при термінах 3, 7, 14, 28 і 56 днів. Виявлені залежності представлено на рис. 11, 12.

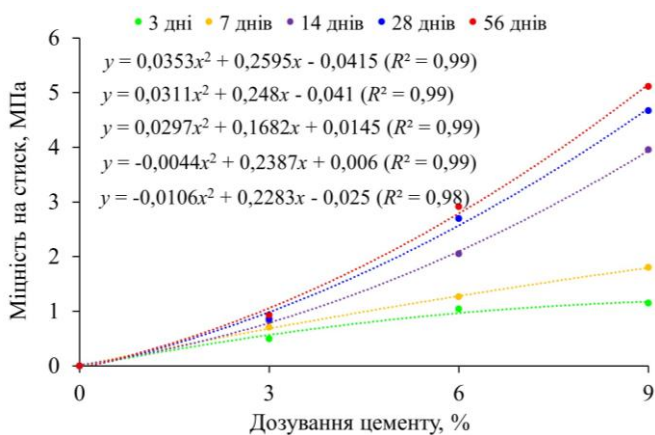


Рисунок 11 – Залежності зміни міцності закладання на стиск від дозування цементу при різному терміні твердіння й вмісті твердого 75%

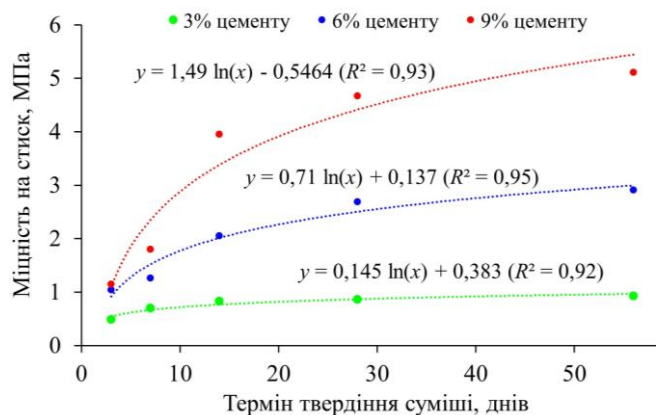


Рисунок 12 – Залежності зміни міцності закладання на стиск від терміну твердіння при різному дозуванні цементу й вмісті твердого 75%

Встановлено, що збільшення дозування цементу з 3 до 9% призводить до поліноміального зростання міцності закладного масиву та є визначальним фактором. Різниця у міцності між складами з 3 і 9% цементу зростає від 2,3 рази на ранніх термінах до понад 5 разів на 56-у добу, що супроводжується істотним збільшенням абсолютної різниці міцності. Виявлено, що кінетика набору міцності у часі для кожного складу описується логарифмічною залежністю, характерною для всіх твердіючих систем, коли найбільш інтенсивний приріст міцності відбувається у початковий період твердіння (до 14 діб) з подальшим поступовим зменшенням

швидкості її росту. Інтенсивність набору міцності для сумішей із вмістом 9% цементу більш, ніж у 10 разів перевищує показник для складів із 3% цементу, що підтверджує визначальну роль дозування в'язучого у формуванні міцності.

На основі визначення інтегрального показника, що показує економічний приріст міцності на 1 грн витрат (МПа/грн), доведено, що оптимальне дозування в'язучого становить 6%. Виявлено лінійний зв'язок між міцністю пастового закладання на стиск, що твердіє у відкритому та шахтному середовищах. Встановлено, що коефіцієнт збільшення міцності, що твердіє у шахтних умовах, знаходиться у діапазоні 1,0 – 1,25. Проведені інструментальні виміри зменшення лінійних розмірів зразків масиву у процесі їх випробування на стиск. Встановлено, що між міцністю пастового закладання на стиск і модулем пружності існує стійка лінійна залежність та у діапазоні міцності закладного масиву 0 – 5 МПа модуль пружності складає 0 – 1250 МПа.

Виконано дослідження можливості заміни традиційного портландцементу альтернативними видами в'язучого. У пастовій суміші з дозуванням в'язучого 6% та вмістом твердого 75% цемент поступово замінювали на 30, 50, 70 і 100% меленим граншлаком, що є металургійним відходом. Встановлено залежності зміни міцності від частки заміни цементу шлаком при найбільш важливих термінах твердіння 7, 28 і 56 днів (рис. 13). Зі збільшенням частки заміни цементу шлаком міцність закладного масиву поступово зменшується у всі терміни твердіння, а отримані залежності достовірно описуються поліноміальною залежністю 2-го порядку.

Найбільш виражене зниження спостерігається на ранніх стадіях твердіння: при заміщенні 50% міцність зменшується приблизно на 35 – 40%, а повна заміна призводить до втрати до 60 – 70% міцності. На пізніх термінах твердіння 56 діб заміщення 50% знижує міцність на 20%, а повна заміна – на 75%, що свідчить про недостатню гідравлічну активність шлаку. Оскільки для ліквідації різних типів пустот закладний масив не завжди може потребувати підвищеної міцності, тому заміна цементу шлаком є економічно виправданою.

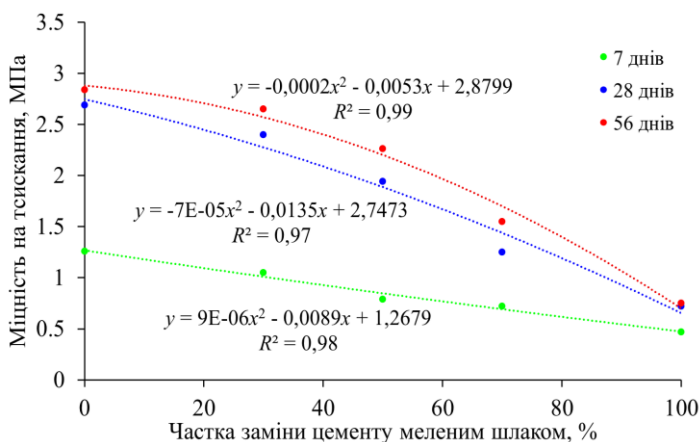


Рисунок 13 – Закономірності зміни міцності масиву від заміни цементу меленим граншлаком у складі комбінованого в'язучого матеріалу (6%) та загального твердого (75%)

Раціональна частка заміни цементу меленим граншлаком складає до 60%. Визначено недостатній ефект для приросту міцності від введення вапняку та сухої золи-виносу як третього компонента у комбіноване в'язуче, що призвело до відсутності чутливої динаміки її набору на пізніх термінах з аналогічним двокомпонентною цементно-шлаковою рецептурою.

Для прогнозування транспортабельних властивостей пастової закладної суміші важливим є визначення реологічної моделі, в результаті зсуву у трубопроводі. За допомогою цифрового віскозиметру досліджено криву «напруження зсуву – швидкості зсуву» суміші, аналіз якої дозволив встановити, що пастова суміші є неньютонівською псевдопластичною рідиною, а її реологічна поведінка найточніше описується нелінійною моделлю Гершеля-Баклі:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n, \text{ Па,}$$

де τ_0 – межа текучості, Па; K – консистентний індекс, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$; γ – швидкість зсуву, с^{-1} ; n – індекс течії, безрозмірна величина, що показує ступінь псевдопластичності.

Апроксимація експериментальних даних за моделлю Гершеля-Баклі показала високу точність ($R^2 = 0,99$), а реологічне рівняння моделі для визначеної оптимальної пастової суміші П-(ЦХ)-6-75 з 6% цементу і 75% твердого має вигляд:

$$\tau = 19,3 + 6,45 \cdot \gamma^{0,82}, \text{ Па.}$$

З метою покращення реологічних характеристик пастової суміші для можливості збільшення довжини транспортування досліджено використання дрібнодисперсної добавки, а саме природного суглинка. Експериментально встановлено, що вплив заміни хвостів збагачення суглинком на кінцеву міцність пастового закладання має нелінійний характер і з високою достовірністю $R^2 = 0,96$ описується поліноміальною залежністю, а раціональним діапазоном є заміна хвостів до 1,5% суглинка. Криві «напруження зсуву – швидкості зсуву» пастової суміші з додаванням прийнятого 1% суглинка ілюструються на рис. 14. У ході досліджень частки заміни цементу шлаком визначено, що з її зростанням осадка конуса збільшується за експоненційним законом, що є показником погіршення реологічних характеристик суміші. Покращення реологічних характеристик цементно-шлакових сумішей, аналогічно цементним також досягається шляхом заміни 1,5% хвостів збагачення природним суглинком.

Важливим аспектом є оперативний прогноз міцності пастового закладного масиву. Узагальнення експериментальних вимірів електропровідності всіх сумішей при вмісті твердого 75% з різними видами комбінованого в'язучого на стадії їх приготування та їх порівняння з визначеними показниками міцності монолітного масиву дозволило виявити стійкий кореляційний зв'язок (рис. 15, 16).

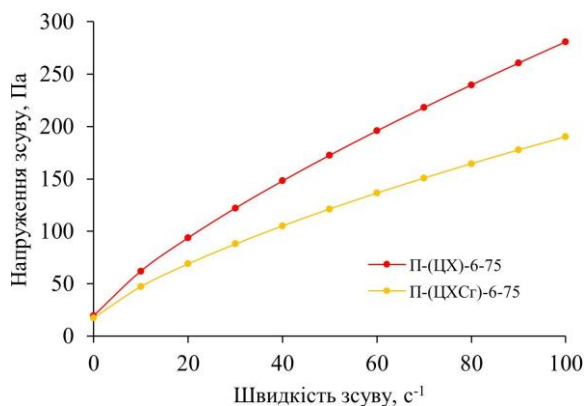


Рисунок 14 – Графік напруження зсуву від швидкості зсуву суміші при твердому 75% без та з додаванням 1% суглинка

Для умов пастової закладної суміші П-(ЦХСг)-6-75, що містить суглинок, модель Гершеля-Баклі матиме вигляд:

$$\tau = 17,5 + 5,06 \cdot \gamma^{0,77}, \text{ Па.}$$

Аналіз рис. 14 показує, що введення 1% суглинка чинить істотну пластифікуючу дію на пастову закладну суміш, що виражається у значному зниженні напруження зсуву порівняно із базовим складом, набираючи інтенсивності при швидкості зсуву суміші до 100 с^{-1} .

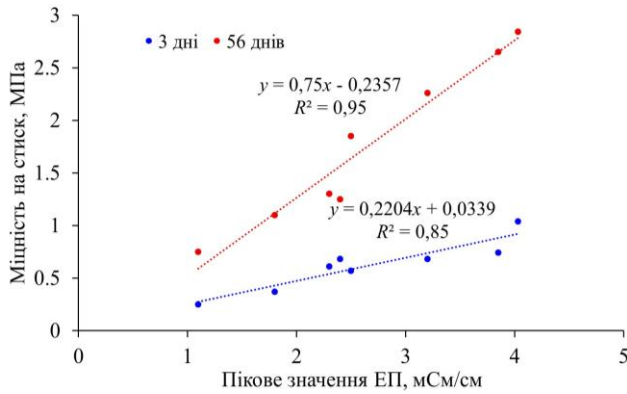


Рисунок 15 – Залежність зміни міцності пастового закладання від величини електропровідності суміші

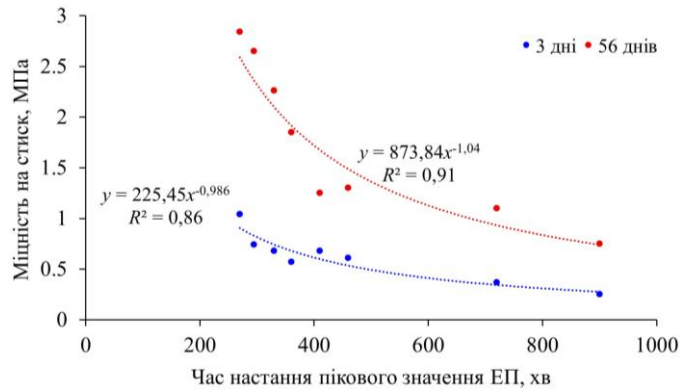


Рисунок 16 – Залежність зміни міцності пастового закладання від часу досягнення піку електропровідності суміші

Встановлено, що властивість електропровідності пастової закладної суміші є кількісним індикатором формування величини міцності закладного масиву, яка змінюється за лінійною залежністю від пікового значення електропровідності суміші та обернено пропорційною степеневою залежністю від часу, необхідного для досягнення цього пікового значення. Виявлені закономірності формують наукову основу для розробки експрес-методу неруйнівного контролю міцності.

Для підвищених міцнісних властивостей досліджено вплив додавання дроблених відвальних порід з визначенням оптимального розміру фракції та частки заміни хвостів. При заміні частки хвостів дробленими породами у пастовій суміші спостерігається підвищення текучості внаслідок зменшення питомої поверхні та водоутримуючої здатності й для компенсації цього ефекту підвищувалась тверда фаза. Встановлено, що зміна величин осадки конусу від вмісту твердого у суміші в межах 75 – 79% при різній кількості додавання дроблених порід та їх крупності змінюється за лінійними залежностями, а транспортабельні властивості нормалізуються при досягненні твердого 79%.

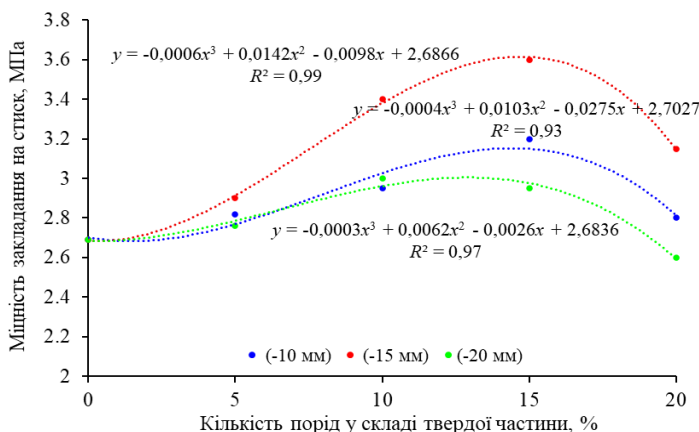


Рисунок 17 – Залежності міцності від кількості додавання дроблених порід різної крупності у загальному вмісті твердого в суміші 79%

За результатами випробувань на міцність (рис. 17) виявлено, що для фракцій -10, -15 і -20 мм міцність закладного масиву за поліноміальними залежностями 3-го порядку змінюється від кількості заміненої частки хвостів породами. Найбільший приріст міцності демонструє фракція 15 мм і при заміні нею 10 – 15% хвостів досягається максимальна міцність закладного масиву у віці твердіння 28 днів до 3,4 – 3,6 МПа, що на 26 – 33% вище за класичну суміш.

У шостому розділі наведено результати чисельних досліджень трансформації геомеханічної ситуації масиву навколо утворених різнотипних техногенних пустот та виявлення впливу закладного масиву, сформованого у їх просторах, на ступінь блокування деформацій земної поверхні й охорону надр.

Виконано чисельні розрахунки розвитку деформаційних процесів земної поверхні зі сторони висячого боку зі встановленням моніторингових точок у межах мульди зсуву при кутах падіння покладу $\alpha = 50, 60$ і 70° , яким відповідають різні морфологічні форми провальних зон, що визначені новим підходом у методології досліджень. Результатами чисельного моделювання подальшого відпрацювання рудних покладів у традиційних умовах розробки без застосування ліквідації провалу закладним масивом шляхом поетапного вилучення рудних поверхів, від сьогоденної глибини 1300 м до умовно кінцевої 1800 м, встановлено, що, незважаючи на існуючу фазу затухання й стабілізації масиву, процеси осідання земної поверхні тривають до глибини 1800 м, але з меншою інтенсивністю, а саме 30 – 40% від інтенсивності першої фази при розробці до глибини 1300 м, що неминуче призведе до охоплення мульдою зсуву нових територій і, відповідно, подальшої деградації рослинно-грунтового покриву.

Досліджено геомеханічну ефективність засипання провальних зон різної морфології пустими відвальними породами, що є характерним й традиційним рекультиваційний заходом для гірничодобувних регіонів. Встановлено, що у приконтурній зоні провалу засипання призводить до додаткового гравітаційного привантаження висячого боку, внаслідок чого максимальні осідання зростають на 0,5 – 7,1% залежно від морфології провальної зони, при цьому часткове зниження амплітуди осідань до 20% спостерігається лише у середній частині мульди зсуву, тоді як на віддалених ділянках $> 1400 - 1500$ м фіксується повторна активізація деформацій і збільшення осідань до 12 – 50%. Зазначене свідчить про те, що сипучий масив через високу піддатливість не забезпечує жорсткого блокування процесів залишкових зрушень, а лише спричиняє перерозподіл навантаження у масиві, що дозволяє розглядати цей захід як складування порід без істотної стабілізації земної поверхні.

Виконаний аналіз напрямків векторів повних переміщень вздовж лінії відкосу провалу з висячого боку дозволив встановити, що механізм роботи закладного масиву визначається морфологією провалу, зокрема, кутом відкосу θ . За пологого відкосу $\theta \leq 50^\circ$ переміщення порід орієнтовані переважно вздовж лінії відкосу, що формуватиме дотичний характер його взаємодії із закладним масивом та знижуватиме пасивний опір. Зі збільшенням кута відкосу $\theta \geq 50^\circ$ зростає нормальна складова переміщень, що сприятиме ефекту розпірного заклинювання закладного масиву при його формуванні у просторі провалу, що впливатиме на підвищення ефективності блокування розвитку мульди осідання.

У подальших розрахунках до геомеханічної моделі у простір провальної зони введено упорну призму з монолітного пастового закладного масиву у комбінації з породним сипучим масивом у верхній недозакладеній частині, що розглядається як новий несучий елемент системи стабілізації провальної зони. Виконано відповідне чисельне моделювання подальшого поступового відпрацювання рудного покладу від поточної глибини 1300 м до кінцевої 1800 м

при різних морфології провальних зон ($\theta = 25 - 72^\circ$) із додаванням закладного масиву в їх просторі з варіацією його жорсткості, тобто модуля деформації ($E = 400 - 1400$ МПа). Результати моделювання з розвитку деформацій земної поверхні на прикладі провальної зони при $\alpha = 60^\circ$, $\theta = 50^\circ$ подано на рис. 18.

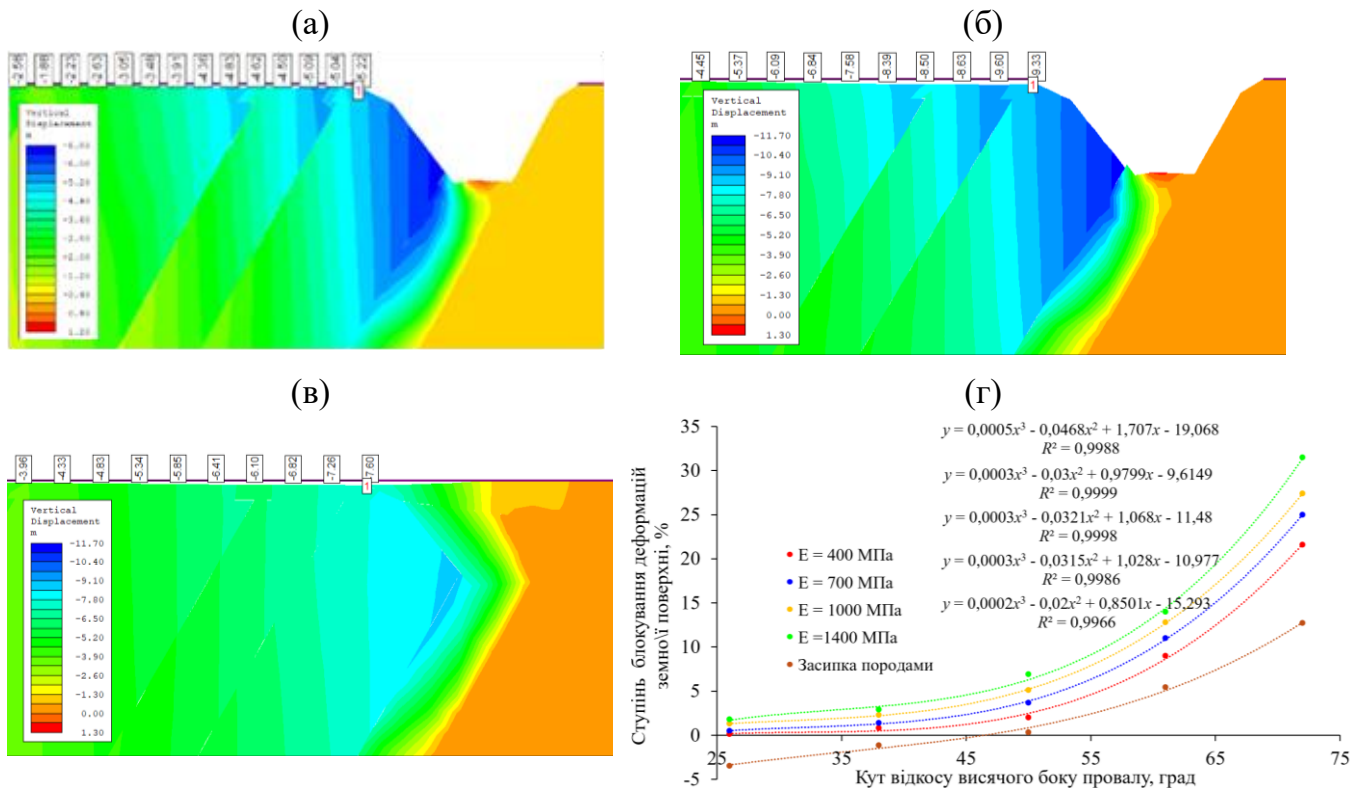


Рисунок 18 – Результати чисельного моделювання розвитку деформацій земної поверхні зі сторони висячого боку при підземній розробці рудного покладу: (а) епюра вертикальних осідань при поточній глибині розробки 1300 м без закладного масиву; (б) епюра вертикальних осідань при кінцевій глибині розробки 1800 м без закладного масиву; (в) епюра вертикальних осідань при кінцевій глибині розробки 1800 м із пастовим закладним масивом; (г) залежності ступеня блокування деформацій від кута відкосу провалу висячого боку та жорсткості закладного масиву

Для кількісної оцінки ефективності впливу закладного масиву на розвиток деформацій земної поверхні запропоновано коефіцієнт блокування деформацій:

$$k_{\bar{b}l} = 1 - S_{\bar{b}} / S_z,$$

де $S_{\bar{b}}$ – інтегральна площа вертикальних осідань поперечного перерізу мульди зсуву для варіанта без закладання, m^2 ; S_z – інтегральна площа вертикальних осідань поперечного перерізу мульди із застосуванням закладання, m^2 .

Інтегральні площі мульди зсуву $S_{\bar{b}(z)}$ визначались шляхом чисельного інтегрування профілю вертикальних осідань земної поверхні методом трапецій за дискретними значеннями переміщень від кромки провалу у бік висячого боку. Виявлено поліноміальні залежності 3-го порядку зміни ступеня блокування деформацій земної поверхні від кута відкосу провалу при різних жорсткості закладного масиву з коефіцієнтом достовірності $R^2 = 0,98 - 0,99$. Ступінь блокування деформацій земної поверхні визначається поєднаним впливом

геометрії провальної зони та жорсткості закладного масиву, причому кут відкосу висячого боку відіграє домінуючу роль, а модуль деформації закладання виконує підсилюючу функцію. У діапазоні кутів відкосу провалу $\theta = 25 - 35^\circ$ спостерігається мінімальний ступінь блокування деформацій на рівні 0 – 2% при будь-якому значенні жорсткості закладного масиву $E = 400 - 1400$ МПа, що свідчить про відсутність розпирного ефекту його роботи.

Зі збільшенням кута до $\theta = 40 - 60^\circ$ спостерігається плавне нелінійне зростання ступеня блокування деформацій та поступове розходження кривих для різних E , що відображає початок розпирного ефекту на бокові породи відкосів провалу від впливу закладного масиву та який вище при $E = 1000 - 1400$ МПа. Найбільш інтенсивне зростання ефекту блокування досягається при крутих кутах $\theta = 60 - 72^\circ$, а різниця між кривими для різних модулів деформації E стає найбільш виразною, що є прямим наслідком переходу до повноцінного клинового механізму роботи закладного масиву, а збільшення E з 400 до 1400 МПа приводить до максимального підвищення частки погашених осідань до 32%. Зафіксовано меншу інтенсивність прояву та поширення тріщин розриву на земній поверхні від кромки провальної зони при формування упорної призми порівняно з базовим варіантом відпрацювання. Виявлені залежності дозволяють враховуючи геометрію провальних зон та деформаційні властивості закладного масиву визначати напрям їх ліквідації: від пасивної рекультивації та гідроізоляції при пологих провалах до ефективного блокування деформацій при більш крутих провалах.

Виконано чисельне моделювання геомеханічного стану масиву навколо непогашених підземних пустот, що виникли у надрах внаслідок підземної розробки покладів старими шахтами та які являють високий техногенний ризик через раптовість процесів обвалення земної поверхні. Визначення умов перебування пустот приграничному стані дозволить своєчасно застосовувати превентивні заходи, такі як ліквідація пастовими закладними сумішами через пробурену закладну свердловину з поверхні, й запобігти розвитку прогресуючих деформацій земної поверхні та охороні надр.

У результаті виконання чисельного моделювання отримано епюри повних переміщень та коефіцієнта запасу міцності масиву для широкого діапазону варіації параметрів розташування пустот у надрах, а саме глибини залягання, розміру за падінням, кута падіння відпрацьованого покладу. На рис. 19 а ілюстровано фрагмент результатів моделювання при $H = 50$ м, $\alpha = 60^\circ$, $m = 25$ м, який показує зміну геомеханічного стану масиву при послідовному збільшенні довжини пустоти за падінням, при якому зафіксовано верхній та нижній діапазони критичного значення довжини пустоти за падінням $L_{кр}$. Узагальнення та статистична обробка повного масиву чисельних даних дозволили вперше встановити залежності нижньої та верхньої межі критичного співвідношення $H/L_{кр}$ від глибини розташування пустоти H для різних кутів падіння рудного покладу ($\alpha = 50, 60$ і 70°), що подано у графічних залежностях (рис. 19б – 19г).

На основі виконаного покрокового аналізу результатів моделювання визначено момент переходу системи від стійкого стану до інтенсивної фази розвитку деформацій з фіксацією меж приграничного стану.

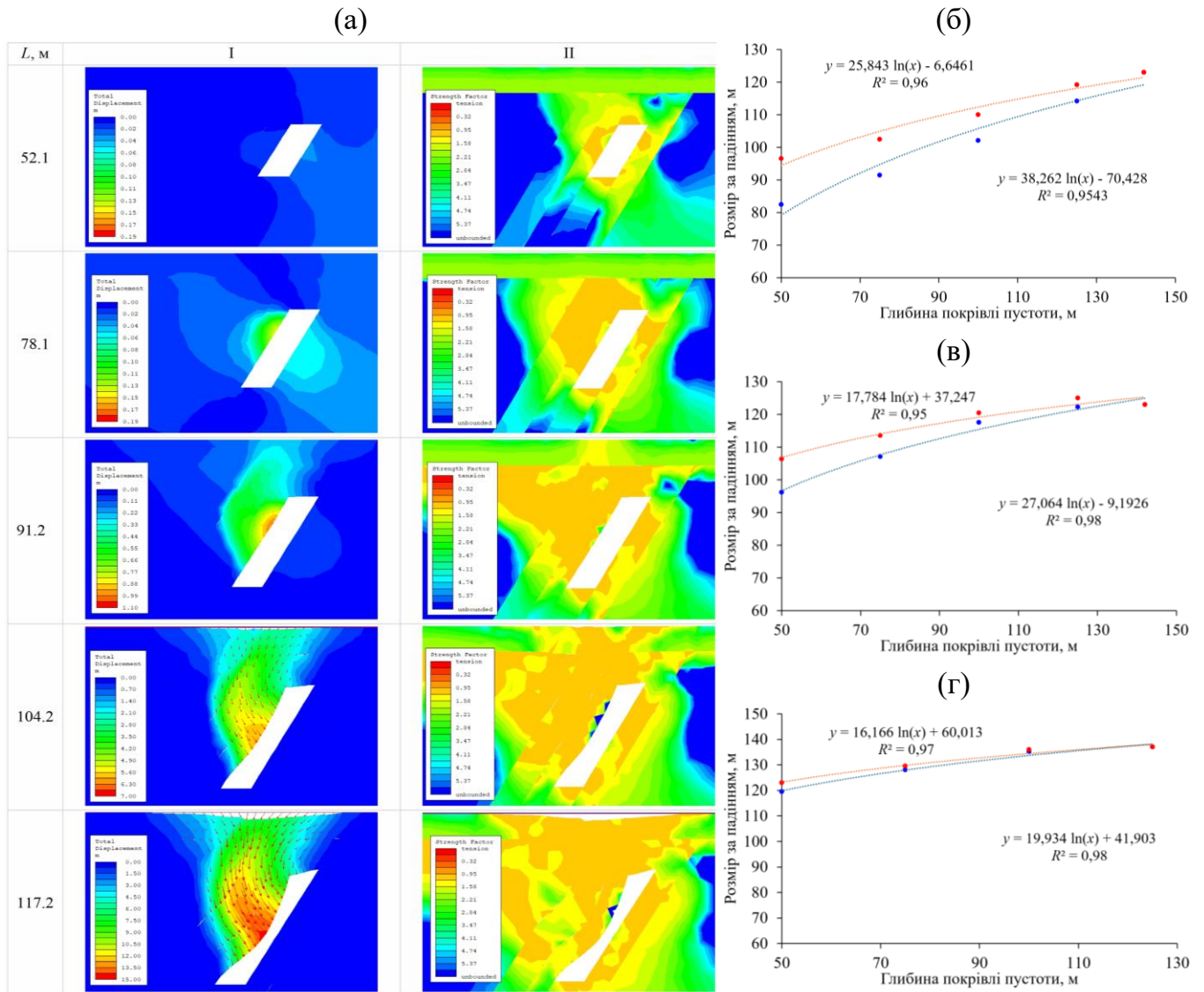


Рисунок 19 – Результати чисельного моделювання: (а) епюри повних переміщень (I) та коефіцієнти запасу міцності (II) при розташуванні пустоти з параметрами $H = 50$ м, $\alpha = 60^\circ$, $m = 25$ м; (б) – (г) залежності нижньої та верхньої меж критичного співвідношення $H/L_{кр}$ від глибини розташування пустоти H при кутах падіння $\alpha = 50; 60; 70^\circ$

Виявлено, що окрім стійкого та нестійкого геомеханічного стану масиву, існує приграничний стан, який перебуває на межі втрати цілісності та має сформований деформаційний зв'язок із землею поверхнею. Приграничний стан масиву формується у діапазоні критичного показника $H/L_{кр} = 0,4 - 1,2$ і характеризується нижньою та верхньою межами, які за логарифмічно зростають зі збільшенням глибини залягання пустоти, тоді як відстань між цими межами зменшується зі збільшенням кута падіння рудного тіла. Приграничний стан підземних пустот може проявляється у діапазоні глибин 50 – 150 м і залежить від розміру підземної пустоти за падінням.

Для врахування просторової конфігурації пустот використовується параметр еквівалентного прольоту пустоти $L_{екв}$, що комплексно враховує їх розміри за падінням і простяганням. Приграничний стан визначається потраплянням $L_{екв}$ у встановлений критичний інтервал $k \cdot L_{над. \min} < L_{екв} < L_{над. \max}$. Нижню критичну межу

прийнято з коефіцієнтом запасу $k = 0,8$ для врахування можливих локальних послаблень масиву та своєчасного застосування закладання.

Встановлено, що при ліквідації підземних пустот, що перебувають у приграничному стані, необхідна міцність пастового закладного масиву без втрати його суцільності експоненційно залежить від співвідношення $H/L_{кр}$, зростаючи при зменшенні кута падіння. Отримані залежності дозволяють прогнозувати необхідну міцність пастового закладання та своєчасно запобігти розвитку прогресуючих деформацій земної поверхні. Здійснено прогноз площі земної поверхні, що буде уражена без заходів ліквідації підземних пустот, при подальшому переході від приграничного стану масиву до стадії прогресуючого обвалення у зв'язку з послабленням механічних властивостей масиву. Розмір мульди зсуву земної поверхні варіюється у межах 150 – 250 м вхрест простягання рудного покладу й демонструє стійкий експоненціальний характер зростання залежно від збільшення геомеханічного показника $H/L_{кр}$. Інтенсивність розширення мульди зростає пропорційно зменшенню кута падіння рудного покладу. За результатами моделювання також встановлено закономірність зміни кута межі зони небезпечних зсувних деформацій Ψ від показника $H/L_{кр}$, що описується поліноміальною функцією 2-го ступеня й дозволяє обґрунтувати проєктування профіля закладної свердловини.

Чисельним моделюванням досліджено стійкість поверхні закладного масиву, сформованого як захід ліквідації у вироблених просторах закритих кар'єрів, що є невід'ємним елементом комплексної ліквідації техногенних пустот. Встановлено, що традиційний спосіб формування закладного масиву виключно з сипучих відвальних порід характеризується низькою деформаційною стійкістю. Під дією лише гравітації осідання поверхні досягають 0,56 м, а при додатковому навантаженні зростають до 1,35 м, що є критичним для забудови. Перехід до комбінованої структури закладного масиву (ущільнена порода + пастовий масив) забезпечує кардинальне зменшення деформацій, а саме, у гравітаційному режимі осідання зменшуються до 0,12 м (у 4,6 рази), а під навантаженням – до 0,21 м (у 6,42 рази), що підтверджує функцію пастових шарів як армуючих елементів, які локалізують деформації та підвищують загальну жорсткість системи.

Проведено оцінку збіжності результатів аналітичного та чисельного моделювання для досліджуваних типів пустот. Визначено, що загальне середнє значення похибки для оцінки навантаженості відкосів висячого боку провальних зон становить 17%, для необхідної міцності закладання підземних пустот – 27,4%, а для осідань поверхні закладного масиву кар'єрних пустот розбіжність не перевищує 11,4%, що свідчить про достатній рівень достовірності.

Сьомий розділ роботи присвячено обґрунтуванню технології та методик розрахунку параметрів ліквідації техногенних пустот та формуванню комплексної еколого-економічної оцінки ефективності прийнятих технологічних рішень. Розроблено дві концептуальні технологічні схеми ліквідації техногенних пустот, які адаптовані до різних можливих умов функціонування хвостового господарства гірничо-збагачувальних комбінатів: при наявності комплексу згущення та без нього. Визначено, що сьогодні ліквідація пустот із використанням відходів збагачення як основного компоненту пастових сумішей та джерелом яких є

хвостосховище ПрАТ «ЦГЗК» можлива лише за схемою із використанням осушених хвостів карт хвостосховища у зв'язку з відсутністю комплексу згущення.

Технологія ліквідації глибокої провальної зони передбачає формування у її просторі комбінованого закладного масиву (рис. 20а, б): основний об'єм заповнюється пастовою сумішшю пошаровим наливом через систему випускних патрубків, розташованих уздовж висячого боку з раціональним кроком, що забезпечує змикання конусів розтікання та рівномірне підняття рівня заливки. Подача здійснюється циклічно з послідовним перемиканням патрубків, що запобігає формуванню локальних ухилів і забезпечує стабільність масиву за простяганням. Унаслідок природного кута розтікання пасти ($2 - 5^\circ$) біля лежачого боку формується клиноподібна зона недозакладання, параметри якої залежать від ширини провалу та реології суміші.

Технологію пастового закладання непогашених підземних пустот, що виявлені у приграничному стані, пропонується здійснювати за схемою, наведеною на рис. 20в, г, яка передбачає буріння закладної свердловини до покрівлі підземної пустоти, монтаж трубопровідного ставу та його з'єднання з горизонтальним магістральним трубопроводом, прокладеним на поверхні від мобільного закладного комплексу до пустот, що підлягають закладанню.

Ліквідація виробленого простору закритого кар'єру здійснюється пастовою закладною сумішшю (березень – жовтень), для чого, починаючи з нижнього горизонту, його поділяють на закладні карти – обмежені штучні ємності, розраховані на розміщення річного об'єму суміші відповідно до продуктивності комплексу (рис. 20г – 20є). У днищі кар'єру влаштовують герметизуючий шар ущільнених порід із суглинками (1,0 – 1,5), висоту карти приймають рівною висоті уступу, а її контур формують насипними дамбами з розкривних порід.

Заповнення здійснюється через один або декілька патрубків із розтіканням суміші під природним кутом до упору в дамбу, що забезпечує повне наповнення карти та формування затверділого монолітного масиву з покращеними фізико-механічними властивостями і низьким коефіцієнтом фільтрації; зі збільшенням об'єму уступів кількість карт відповідно зростає.

Розроблено методики визначення технологічних параметрів ліквідації різнотипних техногенних пустот, що включають обґрунтування необхідних міцнісних і деформаційних характеристик закладних масивів, параметрів їх формування та режимів подачі пастових сумішей, а також визначення рецептурних і технологічних параметрів закладних сумішей залежно від геометрії пустот, гірничо-геологічних умов і заданих функцій закладного масиву.

Розроблено аналітичну модель оптимізації розташування мобільного закладного комплексу, що базується на методі мінімізації сумарних витрат на конвеєрний транспорт хвостів і трубопровідний транспорт пастової суміші.

Встановлено, що раціональний діапазон розташування комплексу знаходиться на відстані 3300 – 4700 м від хвостосховища, що дозволило обґрунтувати схему з переміщенням комплексу між двома позиціями (рис. 21) для реалізації концепції комплексної ліквідації пустот, що виключає необхідність встановлення проміжних перекачувальних станцій та забезпечує покриття всіх груп пустот (1 – 3).

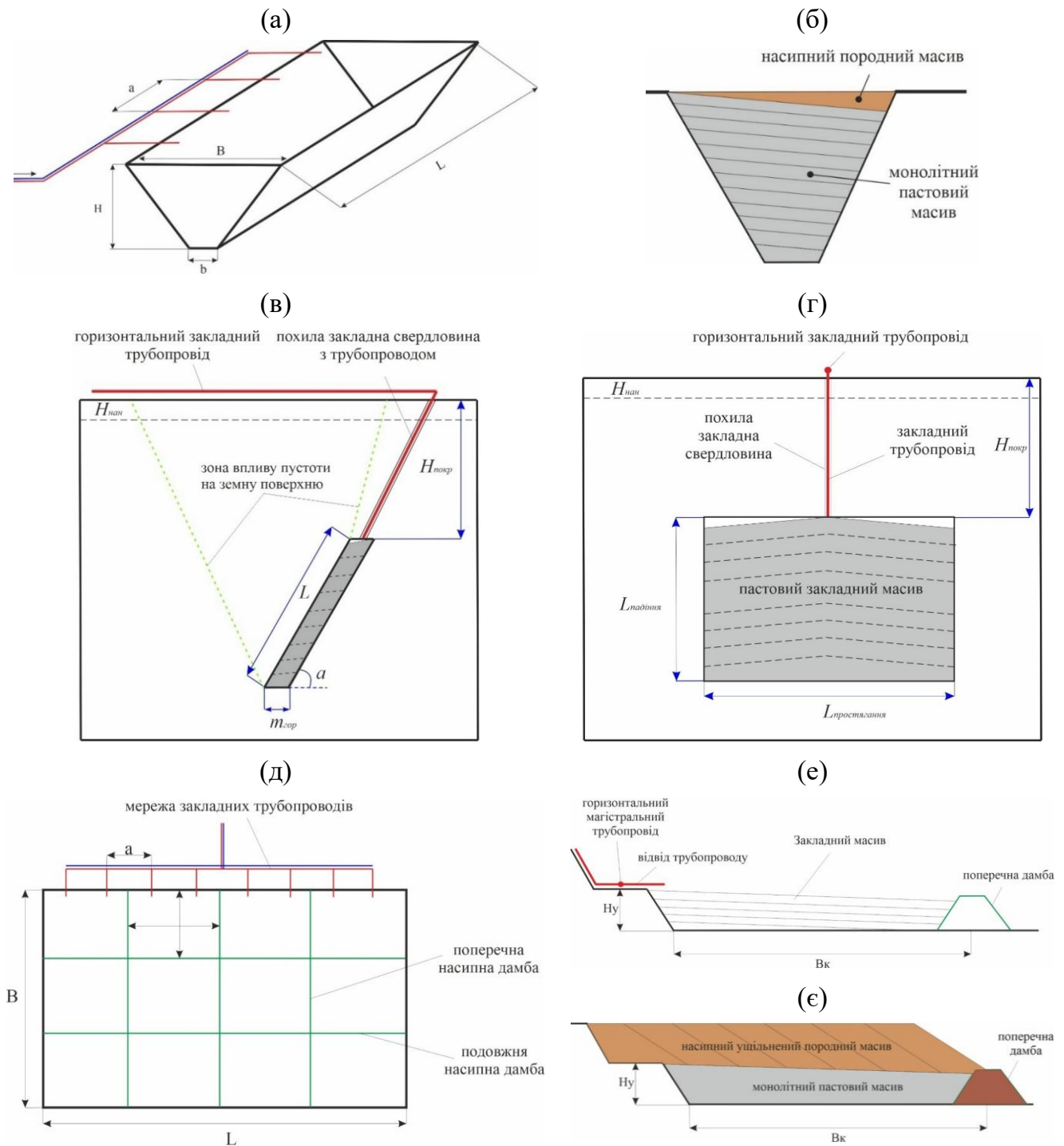


Рисунок 20 – Комплекс технологічних рішень з ліквідації техногенних пустот з утилізацією відходів гірничо-металургійного комплексу в пастовому та комбінованому закладному масивах: (а), (б) провальні зони шахт; (в), (г) непогашені підземні пустоти у приграничному стані; (д), (е), (є) вироблені простори сухих кар'єрів

Для визначення доцільності реалізації концепції ліквідації геомеханічної та техногенної небезпеки досліджуваних типів техногенних пустот груп 1, 2 і 3 (рис. 21) запропоновано використання інтегрального показника еколого-економічного ефекту.

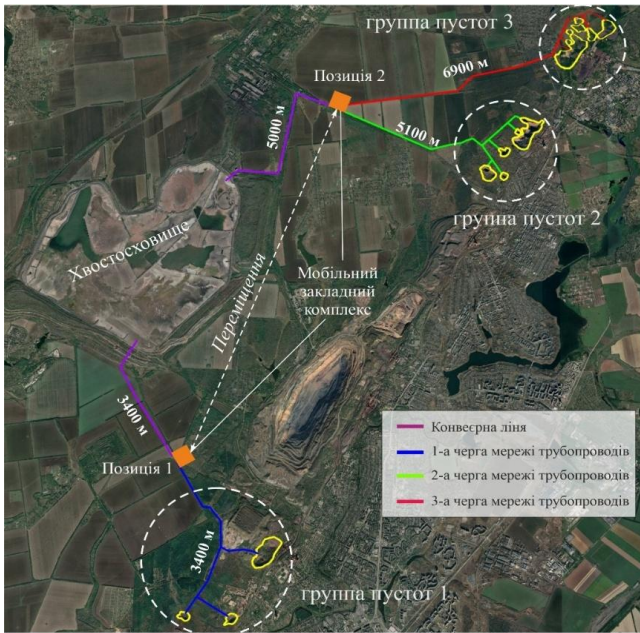


Рисунок 21 – Оптимальне розташування закладного комплексу та система транспортування пастової закладної суміші

Обґрунтовано структуру та компонування мобільного модульного закладного комплексу продуктивністю 250 м³/год, який є основним елементом технологічної системи закладних операцій. Доведено економічну доцільність інтеграції у склад комплексу вузла помелу доменного гранульованого шлаку, що дозволяє знизити собівартість виробництва в'язучого у 8 – 10 разів порівняно із закупівлею готового продукту. Визначено необхідне технологічне обладнання, зокрема змішувачі спіральньо-лопатевого типу та високонапірні поршневі насоси, що забезпечують подачу суміші під тиском до 15 МПа на відстань до 7000 м.

Пропонований показник враховує потенційні економічні втрати, яких вдається уникнути при використанні технології пастового закладання завдяки запобіганню подальшим деформаціям та обвалам земної поверхні й деградації територій, у тому числі втрати житлової та промислової інфраструктури, витрат на переселення населення, збитків ґрунтам та лісовому фонду, а також економічної вигоди від повного або часткового відновлення земельної площі для подальшого її економічного використання, зокрема кар'єрних пустот. Інтегральний безрозмірний показник, що характеризує комплексну еколого-економічну оцінку, має вигляд:

$$E = \frac{\sum U_i}{\sum C_i},$$

де $\sum U_i$ – сукупний обсяг відвернених збитків та економічних вигод, що досягаються внаслідок комплексної ліквідації пустот, грн; $\sum C_i$ – комплекс інвестиційних та експлуатаційних витрат на ліквідацію техногенних пустот, грн.

Сукупний обсяг відвернених збитків та економічних вигод $\sum U_i$, що досягаються внаслідок ліквідації техногенних пустот, визначається окремо по кожному виду утворених пустот. Економічні витрати на ліквідацію трьох видів техногенних пустот $\sum C_i$ складаються із загальних інвестиційних витрат, необхідних для реалізації технології пастового (провали, підземні та кар'єрні пустоти) і породного закладання (кар'єрні пустоти) та експлуатаційних витрат на кожен вид цих пустот. Загальні витрати на ліквідацію пустот мають вигляд:

$$\sum C_i = C_{заг}^{инв} + C_{заг}^{екс}, \text{ грн.}$$

Основними інвестиційними витратами C_{zag}^{inv} технології комплексної ліквідації пустот прийняті наступні: спорудження та обладнання мобільного закладного комплексу для приготування пастових закладних сумішей; прокладання мережі закладних трубопроводів до визначених пустот та допоміжних робіт з організації закладного господарства; технологічне обладнання для розробки сухих / зволжених карт хвостосховищ для відбору основного інертного заповнювача для пастової суміші; обладнання для виконання робіт з формування породного закладання у вироблених просторах кар'єрів (холодний період). До експлуатаційних витрат $C_{zag}^{екс}$ на ліквідацію груп пустот відносяться: витрати на придбання та виготовлення в'язучих матеріалів для пастової суміші (портландцемент, доменний граншлак); витрати на електроенергію (обладнання комплексу, перекачування суміші); основна заробітна плата та нарахування; витрати на амортизацію. Витрати поділяються на 3 підгрупи: вилучення й транспортування хвостів до комплексу, виготовлення пастової суміші та породне закладання.

Для визначення еколого-економічної ефективності комплексної ліквідації техногенних пустот, об'єднаних у групи 1, 2, 3 на основі розроблених технологічних рішень здійснено порівняльну характеристику за наступними варіантами: 1) ліквідація тільки всіх виявлених провальних зон; 2) ліквідація тільки непогашених пустот (прийнятих теоретично); 3) закладання тільки вироблених просторів закритих кар'єрів; 4) комплексна ліквідація всіх трьох груп техногенних пустот.

Аналіз результатів порівняння еколого-економічної ефективності різних варіантів ліквідації техногенних пустот підтверджує, що саме комплексний підхід є найбільш вигідним і має доведену стратегічну перевагу над локальним та вибіркоким принципом їх ліквідації. Встановлено, що окрема ліквідація всіх провальних зон і непогашених підземних пустот (рис. 21) є збитковими з -4,10 і -1,744 млрд грн від'ємного ефекту. Варіант з ліквідації всіх кар'єрних пустот об'ємом 8,0 млн м³ є також ефективним і демонструє швидку окупність (10 років) та значний чистий прибуток (6,11 млрд грн за 50 років) завдяки високій вартості відновленої землі та стабільному доходу внаслідок диверсифікованої економічної діяльності. Варіант комплексної ліквідації всіх пустот об'ємом 35,9 млн м³ пустот при терміні окупності 37 років є прибутковим у довгостроковій перспективі, що з 37 по 50 рік дозволить отримати близько 2,0 млрд грн.

Визначено, що комплексний підхід є більш стратегічно важливим, оскільки не лише відновлює значно більшу площу порушених земель, а саме 237 га проти 36,5 га кар'єрів, але й усуває критично важливу техногенну небезпеку від розвитку провальних зон і раптових обвалень та ефективно й безпечно утилізує суттєві обсяги відходів гірничо-металургійного комплексу, що чинять негативний вплив. Встановлено, що за умови повної реалізації проєкту буде утилізовано близько 53 млн т хвостів збагачення, 8 млн т відвальних порід та до 2,3 млн т шлаків. Наслідком є рекультивація 200 га і повернення у господарське використання 37 га земель, створення на місці ліквідованих кар'єрів різноманітної промислової інфраструктури, що забезпечить сталий розвиток.

Розроблені наукові основи комплексної ліквідації техногенних пустот із використанням гірничо-металургійних відходів можуть бути використані для раціонального й відповідального природокористування у будь-яких гірничорудних регіонах за умов наявності хвостосховища як джерела запасу закладного матеріалу та готових до ліквідації техногенних пустот.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна наукова проблема формування теоретико-методологічних засад керування геомеханічним станом масиву гірських порід та земної поверхні за рахунок застосування адаптованого екологіобезпечного способу пастового закладання, що ґрунтуються на виявлених закономірностях взаємозв'язку компонентного складу сумішей з параметрами масиву, на основі яких визначено їх оптимальний склад, необхідні фізико-хімічні, реологічні і міцнісні властивості та реалізовано позитивний вплив на трансформацію геомеханічної ситуації й охорону надр. Це стало основою для розробки технології комплексної ліквідації техногенних пустот, утворених видобутком корисних копалин, зменшення розвитку деформацій земної поверхні та ризиків нових обвалень, відновлення земельних площ, досягнення високого рівня утилізації відходів, підвищення техногенно-екологічної безпеки і сталого розвитку гірничорудних регіонів.

1. Виконано комплексний аналіз форм та структури порушень земної поверхні у Криворізькому басейні та ідентифіковано їх 4 основні види: провальні зони шахт, кар'єрні пустоти, зони плавного осідання та накопичення промислових відходів. Встановлено, що загальна площа порушених земель становить близько 49% від площі м. Кривий Ріг, причому найбільшу частку (понад 65%) складають об'єкти накопичення промислових відходів, а найбільш небезпечними є поширені активні провальні зони, глибина яких сягає 50 – 200 м.

2. За результатами систематичного огляду літературних джерел та існуючих заходів покращення стану земної поверхні визначено, що традиційні заходи рекультивації, а саме засипання пустот відвальними породами, не забезпечує достатньої ефективності з блокування розвитку небезпечних деформаційних процесів через недостатні фізико-механічні властивості й не дозволяють утилізувати більш ширший спектр проблемних відходів. Існуючі заходи є локальними та не вирішують проблем системного управління техногенно-екологічною безпекою гірничих територій.

3. На основі бібліометричного аналізу виявлено, що недостатньо дослідженими є принципи та підходи до управління геомеханічним станом масиву гірських порід і земної поверхні при ліквідації масштабних різнотипних техногенних пустот із використанням технології пастового закладання, адаптованої до підземного та відкритого просторів, із екологіобезпечною утилізацією у його складі відходів гірничо-металургійного комплексу. Зазначені наукові прогалини стримують розробку нових ефективних природоохоронних заходів та реалізацію принципів раціонального надрокористування.

4. Встановлено закономірності просторово-часового розвитку провальних зон залізрудних шахт, що проявляються у безперервному розширенні їх

контурів: для діючих шахт динаміка збільшення площ є інтенсивнішою та має логарифмічну закономірність, що зумовлено впливом залишкових деформаційних процесів й призводить до деградації прилеглих ландшафтів, знижуючи нормалізований індекс вологості NDVI з 0,49 до 0,36.

5. Науково доведено доцільність утилізації хвостів збагачення у складі пастових закладних сумішей як відходів з найвищим техногенним навантаженням, що визначено вдосконаленою системою інтегрального ранжування, обґрунтовано розробленою класифікацією технологій закладання за видовим різноманіттям відходів і сукупністю раціональних індикаторів їх використання. Експериментально підтверджено екологічну безпечність перетворення дисперсних хвостів у монолітний закладний масив, що забезпечує 100% іммобілізацію важких металів, зниження інтенсивності вилуговування сульфатів і заліза та обмеження міграції забруднюючих речовин у водне середовище.

6. Розроблено нову концепцію комплексної ліквідації різнотипних техногенних пустот від видобутку корисних копалин, що об'єднує їх в єдину закладну мережу з централізованим приготуванням пастових сумішей на основі хвостів збагачення та місцевих в'язучих речовин, у якій досягається синергетичний ефект від одночасної стабілізації земної поверхні та утилізації відходів гірничо-металургійного комплексу, що забезпечує перехід від локальних заходів до системного управління техногенно-екологічною безпекою.

7. На основі виявлених поліноміальних закономірностей зміни величини осадки суміші від дозування в'язучого матеріалу та вмісту твердої частини, поліноміальних залежностей зміни міцності закладного масиву від дозування в'язучого та експоненційних залежностей зміни міцності від вмісту твердої частини встановлено, що при використанні середньозернистих хвостів збагачення з осушених карт хвостосховищ оптимальний пастоподібний стан закладної суміші досягається при вмісті твердої частини 75% (хвости – 70,5% та в'язуче – 4,5%), а раціональна заміна цементу меленим гранульованим шлаком не перевищує 60%.

8. Виявлено, що електропровідність пастової суміші є кількісним індикатором інтенсивності гідратаційних процесів і визначає кінцеву міцність закладного масиву, яка змінюється за лінійною залежністю від пікового значення електропровідності та обернено пропорційною степеневою залежністю від часу, необхідного для досягнення цього піку. Уточнено реологічну поведінку пастових сумішей, яка описується моделлю Гершеля-Баклі та цілеспрямовано покращується введенням 1,0 – 1,5% суглинку, що ефективно компенсує водовіддачу при високому вмісті меленого граншлаку в комбінованому в'язучому при заміні частини цементу.

9. Встановлено, що міцність пастового закладання підвищується до 26 – 33% шляхом заміни частини хвостів збагачення дробленими відвальними породами, а її залежність від частки та крупності заповнювача описується поліноміальними функціями з оптимальним діапазоном 10 – 15% при крупності фракції -15 мм. Компенсація зниження водоутримуючої здатності досягається за рахунок пропорційного підвищення загального вмісту твердої фази з 75 до 79%, рухливість якої лінійно знижується й нормалізує стан консистенції закладної суміші.

10. Отримано нові аналітичні вирази на основі методів граничної рівноваги із трансформацією критерія Хоека-Брауна у еквівалентні параметри Мора-Кулона

та багат шарового пружного середовища з урахуванням ефектів перерозподілу напружень на борти кар'єру: некомпенсованого тиску на відкис провальної зони від кута його відкосу та глибини розробки; міцності пастового закладання від розміру пустоти за падінням, глибини її розташування та кута падіння покладу; розподілу осідань поверхні закладного масиву за профілем ширини кар'єру при змінній його геометрії та величині модуля деформації.

11. Встановлено механізм часткового блокування геомеханічних процесів зсуву при підземній розробці крутоспадних покладів в інтервалах глибин 1300 – 1800 м, що реалізується формуванням у провальній зоні упорної призми з монолітного пастового закладання із засипанням недозакладеної частини пустими породами. Ефективність блокування поліноміально залежить від кута відкосу висячого боку провалу та модуля деформації закладного масиву і досягає до 32% за умов активації ефекту самозаклинювання при куті відкосу понад 50°.

12. Виявлено, що для підземних непогашених пустот, окрім стійкого та нестійкого геомеханічного стану масиву, існує приграничний стан, що формується у діапазоні показника $H/L_{кр} = 0,4 - 1,2$ і характеризується нижньою та верхньою межами, які логарифмічно зростають зі збільшенням глибини пустоти, тоді як відстань між цими межами зменшується зі збільшенням кута падіння покладу, а необхідна міцність пастового закладання експоненційно залежить від співвідношення $H/L_{кр}$, зростаючи при зменшенні кута падіння.

13. Обґрунтовано новий геотехнічний підхід до створення комбінованого закладного масиву з чередуванням шарів пастового та породного закладання йодночасним розміщенням підземних сховищ та наземної інфраструктури у виробленому просторі закритого кар'єру. Встановлено, що стабільність масиву критично залежить від жорсткості пасти за степеневою функцією й підвищення модуля деформації до 1000 МПа знижує осідання поверхні на 50%. Доведено, що для гарантування коефіцієнта запасу стійкості у межах 1,6 – 2,1 модуль деформації пастового шару повинен складати $E \geq 800$ МПа.

14. Розроблено нові технологічні рішення ліквідації різнотипних техногенних пустот і методики розрахунку їх параметрів: для провальних зон шахт – формування упорної призми з монолітного закладного масиву шляхом пошарової подачі пастової суміші через систему випускних патрубків уздовж висячого боку з подальшим засипанням клиноподібної зони недозакладання пустими породами; для непогашених підземних пустот – нагнітання пастової закладної суміші через закладну свердловину, з'єднану з магістральним трубопроводом від мобільного закладного комплексу; для кар'єрних пустот – поуступне комбіноване пошарове закладання шляхом просторового поділу їх об'єму на ізольовані закладні карти з улаштуванням насипних дамб. Обґрунтовано структуру та компонування модульного закладного комплексу з економічно доцільним виробництвом меленого граншлаку. Методом мінімізації сумарних витрат на конвеєрний та трубопровідний транспорт визначено раціональний діапазон розташування комплексу, що повинен знаходитись на відстані 3300 – 4700 м від хвостосховища.

15. Запропоновано удосконалену методику еколого-економічної оцінки та доведено стратегічну перевагу комплексного підходу до ліквідації техногенних

пустот над їх вибіркоким принципом, що дозволяє збалансувати економічні показники, досягти позитивного інтегрального ефекту (1,74 млрд грн за 50 років) та вирішити критичні питання техногенно-екологічної безпеки регіону, які неможливо розв'язати точковими заходами.

Основні положення і результати дисертації опубліковані у роботах:

1. **Petlovanyi, M., & Sai, K.** (2026). Numerical modelling of critical conditions for the onset of a limit state in the rock mass surrounding unfilled underground voids in iron ore deposits. *Engineering Journal of Satbayev University*, 148(1), 38-47. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2026.i1.05>
2. **Petlovanyi, M.V., Sai, K.S., Lozynskyi, V.H., Buchavyi, Y.V., & Saik, P.B.** (2026). Assessment of the impact of iron-ore tailings dams on water resources and new methods for beneficiation waste utilization. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 35(1), 172-186. <https://doi.org/10.15421/112616>
3. **Petlovanyi, M., Fediv, I., Popovych, V., Boyko, T., Stepova, K., Konanets, R., & Popovych, N.** (2026). An industrial method for mitigating surface deformations and restoring soil integrity in the Kryvyi Rih Basin. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 41(1), 33-47. <https://doi.org/10.17794/rgn.2026.1.4>
4. Sherstiuk, Ye.A., **Petlovanyi, M.V., & Sai, K.S.** (2025). Predicting the geofiltration processes within the closed quarry zone in difficult technogenically disturbed conditions. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 13-21. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-1/013>
5. **Petlovanyi, M., & Sai, K.** (2024). Research into cemented paste backfill properties and options for its application: Case study from a Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 18(4), 162-179. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.162>
6. **Petlovanyi, M.V., Sai, K.S., Popovych, V.V., Khalymendyk, O.V., & Ruskykh, V.V.** (2024). Studying the geotechnical stability of the earth's surface during the formation of different backfill mass types in quarry cavities. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 33(4), 780-796. <https://doi.org/10.15421/112471>
7. Bazaluk, O., **Petlovanyi, M., Sai, K., Chebanov, M., & Lozynskyi, V.** (2024). Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: Case study of Kryvyi Rih Iron-Ore Basin, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1480344. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344>
8. Kuzmenko, O., Dychkovskyi, R., **Petlovanyi, M., Buketov, V., Howaniec, N., & Smolinski, A.** (2023). Mechanism of interaction of backfill mixtures with natural rock fractures within the zone of their intense manifestation while developing steep ore deposits. *Sustainability*, 15(6), 4889. <https://doi.org/10.3390/su15064889>
9. **Petlovanyi, M., Sai, K., Khalymendyk, O., Borysovska, O., & Sherstiuk, Ye.** (2023). Analytical research of the parameters and characteristics of new “quarry cavities – backfill material” systems: Case study of Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 126-139. <https://doi.org/10.33271/mining17.03.126>
10. Bazaluk, O., **Petlovanyi, M., Zubko, S., Lozynskyi, V., & Sai, K.** (2021). Instability assessment of hanging wall rocks during underground mining of iron ores. *Minerals*, 11, 858. <https://doi.org/10.3390/min11080858>
11. Bazaluk, O., **Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., Zubko, S., Sai, K., & Saik, P.** (2021). Sustainable underground iron ore mining in Ukraine with backfilling worked-out area. *Sustainability*, 13(2), 834. <https://doi.org/10.3390/su13020834>
12. **Petlovanyi, M.V., Zubko, S.A., Popovych, V.V., & Sai, K.S.** (2020). Physicochemical mechanism of structure formation and strengthening in the backfill massif

- when filling underground cavities. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6, 142-150. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-142-150>
13. **Petlovanyi, M.V.**, Ruskykh, V.V., & Zubko, S.A. (2019). Peculiarities of the underground mining of high-grade iron ores in anomalous geological conditions. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(4), 706-716. <https://doi.org/10.15421/111966>
 14. **Petlovanyi, M.**, & Mamaikin, O. (2019). Assessment of an expediency of binder material mechanical activation in cemented rockfill. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(20), 3492-3503.
 15. **Petlovanyi, M.**, Kuzmenko, O., Lozynskyi, V., Popovych, V., Sai, K., & Saik, P. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 24-38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>
 16. **Petlovanyi, M.**, Lozynskyi, V., Zubko, S., Saik, P., & Sai, K. (2019). The influence of geology and ore deposit occurrence conditions on dilution indicators of extracted reserves. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 34(1), 83-91. <https://doi.org/10.17794/rgn.2019.1.8>
 17. **Petlovanyi, M.** (2016). Influence of configuration chambers on the formation of stress in multi-modulus mass. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 48-54. <https://doi.org/10.15407/mining10.02.048>
 18. **Petlovanyi, M.**, Chebanov, M., Sai, K., & Khalymendyk, O. (2025). A new approach to restoring the earth's surface heavily disturbed by mining activities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1481, 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1481/1/012004>
 19. **Petlovanyi, M.**, Ruskykh, V., Sai, K., & Malashkevych, D. (2024). Prompt determination of predictive parameters for mining-technogenic landscape objects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348, 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012035>
 20. **Petlovanyi, M.**, Sai, K., Malashkevych, D., Popovych, V., & Khorolskyi, A. (2023). Influence of waste rock dump placement on the geomechanical state of underground mine workings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012007>
 21. **Petlovanyi, M.**, Ruskykh, V., Zubko, S., & Medanyk, V. (2020). Dependence of the mined ores quality on the geological structure and properties of the hanging wall rocks. *E3S Web of Conferences*, 201, 01027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101027>
 22. **Петльований, М.В.**, Бучавий, Ю.В., & Легеза, Ю.О. (2026). Дослідження розвитку провальних зон шахт та їх впливу на рослинний покрив із застосуванням методів дистанційного зондування. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, 7, 27-37. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-3>
 23. **Petlovanyi, M.** (2025). Substantiation of rational backfill complex placement when eliminating technogenic cavities of iron-ore deposits based on paste backfilling technology. *Geo-Technical Mechanics*, 173, 158-174. <https://doi.org/10.15407/geotm2025.173.158>
 24. **Петльований, М.В.**, Кузьменко, О.М., Сай, К.С., & Саїк, П.Б. (2025). Дослідження приграничного стану масиву гірських порід навколо непогашених підземних пустот залізородних родовищ на основі чисельного моделювання. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, 27, 48-63. <https://doi.org/10.37101/ftpgp27.01.005>
 25. **Петльований, М.В.** (2024). Особливості утворених зон обвалення земної поверхні від впливу підземної розробки крутоспадних рудних покладів в умовах Кривбасу. *Збірник наукових праць НГУ*, 79, 63-83. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.063>
 26. **Петльований, М.В.**, Сай, К.С., & Шерстюк, Є.А. (2024). Аналіз досягнутих фізико-механічних властивостей пастового закладання техногенних пустот на основі

- хвостів збагачення залізних руд: закордонний досвід. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, 26, 65-81. <https://doi.org/10.37101/ftpgp26.01.005>
27. **Петльований, М.В.** (2024). Дослідження кінетики гідратації та ранніх міцнісних характеристик цементованого пастового закладання на основі хвостів збагачення залізних руд. *Науковий вісник ДонНТУ*, 2(13), 78-90. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-2-13-78-90>
28. **Petlovanyi, M.V.** (2024). Systematization of the mineral-raw material base of backfill materials and backfill methods in the Kryvyi Rih region. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 1(54), 114-122. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-114-122>
29. **Петльований, М., Сай, К., Попович, В., & Чебанов, М.** (2023). Методичний підхід до визначення перспективних систем “кар’єрні пустоти – закладний матеріал” на території України. *Екологічна безпека та природокористування*, 4(48), 32-47. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.32-47>
30. **Петльований, М.В., & Сай, К.С.** (2023). Аспекти безпечності застосування промислових відходів як закладних матеріалів техногенних пустот. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, 25, 126-140. <https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.010>
31. **Петльований, М.В., Сай, К.С., Борисовська, О.О., & Хорольський, А.О.** (2023). Аналіз використання промислових відходів для формування закладних масивів у техногенних пустотах. *Науковий вісник ДонНТУ*, 1(10), 115-126. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-8-1510.31474/2415-7902-2023-1-115-126>
32. **Петльований, М.В., & Сай, К.С.** (2021). Моделювання напруженого стану закладного масиву при різних фізико-механічних властивостях. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1(48), 7-18. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2021-1-7-18>
33. **Петльований, М.В., & Сай, К.С.** (2021). Комплексний вплив геологічних факторів на стійкість масиву при підземному видобутку залізних руд. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, 32(71(2)), 79-87. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/13>
34. **Філоненко, О.В., & Петльований, М.В.** (2021). Методика дослідження параметрів формування закладного масиву кар’єрних пустот з металургійних шлаків. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 64, 81-98. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.081>
35. **Петльований, М.В.** (2020). Інтенсифікація використання шахтних порід у закладних сумішах: екологічні та технологічні наслідки. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, 22, 103-117. <https://doi.org/10.37101/ftpgp22.01.008>
36. **Шустов, О.О., Петльований, М.В., Зубко, С.А., & Шерстюк, Є.А.** (2019). Геомеханічні проблеми стійкості природно-техногенних масивів рудних родовищ. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 58, 154-165. <http://doi.org/10.33271/crpnmu/58.154>
37. **Кузьменко, О.М., Петльований, М.В., & Лозинський, В.Г.** (2018). Вплив хімічних елементів твердої маси сумішей при заповненні штучних пустот у земній корі. *Геотехнічна механіка*, 142, 33-44.
38. **Кузьменко, О.М. & Петльований, М.В.** (2017). Стійкість площини штучного масиву на контакті з виробленим простором очисної камери в залежності від структури вміщуючих порід крутого рудного покладу. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, 19, 48-58.
39. **Кузьменко, О.М., & Петльований, М.В.** (2017). Взаємозв’язок структурних змін оточуючого масиву із стійкістю контуру очисних камер при розробці крутих покладів залізної руди. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2(41), 56-61.

40. Кузьменко, О.М., & Петльований, М.В. (2017). Вплив природних та технологічних факторів на стійкість порід та закладного масиву при їх відслоненні у очисних камерах. *Геотехнічна механіка*, 132, 62-73.
41. Кузьменко, О.М., & Петльований, М.В. (2017). Руйнування закладного масиву в залежності від технології його зведення. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 52, 159-166.
42. Кузьменко, О.М., & Петльований, М.В. (2017). Стійкість штучного масиву при підземній розробці потужного рудного покладу на великій глибині. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 50, 56-62.
43. Петльований, М.В., Борисовська, О.О., & Сай, К.С. (2024). Оцінка ступеня небезпечності відходів гірничо-металургійного комплексу, механізми та ефективність їх утилізації у проектах рекультивації порушеної земної поверхні. *Реалії та стратегії розвитку України: вітчизняний та закордонний досвід: колективна монографія* (с. 94-110). Харків: СГ НТМ «Новий курс».
44. Малашкевич, Д.С., Петльований, М.В., & Сай, К.С. (2022). *Наукові засади створення прогресивних технологій видобування вугілля з акумуляцією пустих порід у підземному просторі*. Дніпро, Україна: Видавець Лізунов Є.В., 170 с.
45. Petlovanyi, M., Sai, K., & Sherstiuk, Ye. (2021). Utilization of technogenic waste and the formation of a backfill mass on its basis during underground mining of iron ore deposits. *Ecology: Theory and Practice of Landfill Management: multi-authored monograph* (p. 131-154). Warsaw, Poland: Szkola Glowna Sluzby Pozarniczej.
46. Petlovanyi, M.V., & Ganushevych, K.A. (2021). Use of dump rocks in backfill mixtures while mining iron-ore deposits. *Perspective Trajectory of Scientific Research in Technical Sciences: collective monograph* (p. 349-367). Riga, Latvia: Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-085-8-17>
47. Кузьменко, О.М., & Петльований, М.В. (2020). *Розробка крутоспадних рудних покладів із застосуванням твердіючого закладення в умовах Південно-Білозерського родовища*. Дніпро, Україна: НТУ «Дніпровська політехніка», 103 с.
48. Петльований, М.В., Чебанов, М.О., & Сай, К.С. (2025). *Спосіб рекультивації виробленого простору кар'єру*. Патент № 159762 на корисну модель, Україна, МПК E21C 41/32; заявник і володілець патенту НТУ «Дніпровська політехніка». – № u202405542; заяв. 25.11.2024; опубл. 02.07.2025; Бюл. № 27. – 4 с.
49. Малашкевич, Д.С., Петльований, М.В., & Пойманов, С.М. (2021). *Спосіб закладки виробленого простору*. Патент № 147810 на корисну модель, Україна, МПК E21F 15/06; заявник і володілець патенту НТУ «Дніпровська політехніка». – № u202007489; заяв. 30.11.2020; опубл. 17.06.2021; Бюл. № 24. – 4 с.
50. Петльований, М. (2026). Результати чисельного моделювання впливу закладання утворених провальних зон від підземної розробки рудних покладів на деформації земної поверхні. В *Матеріалах IV міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми сучасності»* (с. 66-70). Дрогобич, Україна: Державний ВНЗ «ДонНТУ».
51. Petlovanyi, M., & Demydov, M. (2026). Systematization of technogenic objects in the mining region as a basis for substantiating an integrated approach to reducing technogenic-ecological hazards. *Proceedings of the International Scientific Conference «Modern Science: Theory, Methodology, and Interdisciplinary Practice»*, 7-11. Riga, Latvia: Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-672-0-2>
52. Петльований, М.В. (2025). Методологічні підходи до вдосконалення чисельного моделювання геомеханічних процесів у масиві гірських порід залізорудних родовищ Кривбасу. В *Матеріалах XXIII міжнародної конференції молодих вчених*

«Геотехнічні проблеми розробки родовищ» (с. 101-105). Дніпро, Україна: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова.

53. **Петльований, М., & Сай, К.** (2025). Виявлення приграничного стану масиву гірських порід навколо непогашених пустот у результаті розробки сліпих рудних покладів. В *Матеріалах XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 53-54). Східниця, Україна: ЛПрес. <https://doi.org/10.33271/usme18.053>

54. **Петльований, М.В., Халимендик, О.В., & Сай, К.С.** (2024). Обґрунтування доцільності застосування технології пастового закладання для рекультивації порушених земель Криворізького регіону. В *Матеріалах XXII міжнародної конференції молодих вчених «Геотехнічні проблеми розробки родовищ»* (с. 9-12). Дніпро, Україна: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова.

55. **Петльований, М.В., Сай, К.С., & Борисовська, О.О.** (2024). Еколого-економічні аспекти формування комбінованого закладного масиву для відновлення складно порушеної земної поверхні. В *Матеріалах VII міжнародної науково-практичної конференції «Екологічний стан навколишнього середовища та раціональне природокористування в контексті сталого розвитку»* (с. 144-149). Херсон-Одеса, Україна: Олді+.

56. **Petlovanyi, M., & Malashkevych, D.** (2024). Key factors in the implementation of projects for backfilling open technogenic cavities in the mining industry. *Proceedings of the International Scientific Conference «Scientific Area in the Context of Globalisation and Transformation»*, 4-9. Riga, Latvia: Baltija Pub. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-472-6-2>

57. **Petlovanyi, M., Sai, K., & Sherstiuk, Ye.** (2024). Criteria for paste backfill mixes when filling inactive technogenic cavities. In *Materials of the XVII International Scientific and Practical Conference «Ukrainian School of Mining Engineering»* (p. 33-36). Skhidnytsia, Ukraine: LizunoffPress. <https://doi.org/10.33271/usme17.033>

58. **Petlovanyi, M.V., Popovych, V.V., & Sai, K.S.** (2023). Development of an approach to the effective restoration of the earth's surface disturbed by mining operations. *Abstracts of the 6th International Scientific and Technical Conference «Innovative Development of Resource-Saving Technologies and Sustainable Use of Natural Resources»*, 33-34. Petroșani, Romania: Universitas Publishing.

59. **Петльований, М.В., & Сай, К.С.** (2023). Методологічні аспекти стратегії відновлення пошкодженої гірничими роботами земної поверхні на основі формування закладних масивів. В *Матеріалах VI міжнародної науково-практичної конференції «Екологічний стан навколишнього середовища та раціональне природокористування в контексті сталого розвитку»* (с. 114-118). Херсон-Одеса, Україна: Олді+.

60. **Petlovanyi, M., Khalymendyk, O., & Sai, K.** (2023). Study of the earth's surface disturbances in large mining region of Ukraine. *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Scientific Projects on Improving the Environment»*, 215-217. Brussels, Belgium: International Science Group.

61. **Sai, K., & Petlovanyi, M.** (2023). Conditions and issues of accumulation of mining waste in large mining regions of Ukraine. *Proceedings of the International Scientific Conference «Modern Science: Global Trends, Technologies and Innovations»*, 125-129. Riga, Latvia: Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-354-5-34>

62. **Petlovanyi, M., Sai, K., & Malashkevych, D.** (2023). Specifics and practical examples of low-hazard industrial waste utilization for filling technogenic cavities. *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Scientific Trends and Trends in the Context of Globalization»*, 37(171), 314-322. Umea, Kingdom of Sweden: Scientific Publishing Center «InterConf». <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.09.2023.026>

63. **Petlovanyi, M.**, Chebanov, M., & Sherstiuk, Ye. (2023). Formation of a backfill mass as an effective method of mining-technical reclamation when rehabilitating lands disturbed by mining. *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Recent Scientific Investigation»*, 164, 177-182. Oslo, Norway: Scientific Publishing Center «InterConf».

64. Хорольський, А.О., & **Петльований, М.В.** (2023). Застосування маржинального аналізу для обґрунтування обсягів робіт із закладки виробленого простору твердіючими сумішами на основі відходів гірничого виробництва. В *Матеріалах міжнародної науково-практичної конференції «Збалансоване природокористування: традиції, перспективи та інновації»*, 1, (с. 163-165). Київ, Україна: ДІА.

65. **Петльований, М.В.**, & Сай, К.С. (2023). Підземний видобуток залізних руд в умовах мінливого геологічного середовища. В *Матеріалах міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки»* (с. 89-92). Рівне, Україна: Національний університет водного господарства та природокористування.

66. **Petlovanyi, M.**, & Sai, K. (2023). Problems of the earth's surface disturbances by mining operations in the conditions of the Kryvyi Rih iron-ore basin. In *Materials of the International Scientific Conference «Modern Science: Processes of Globalisation and Transformation»* (p. 35-39). Riga, Republic of Latvia: Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-309-5-11>

67. **Петльований, М.В.**, & Сай, К.С. (2022). Закладання виробленого простору як ефективний спосіб збереження довкілля при видобутку залізних руд. В *Матеріалах V міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку»* (с. 170-172). Херсон-Кропивницький, Україна: Олді-Плюс.

68. Драгун, Д.В., **Петльований, М.В.**, & Сай, К.С. (2022). Аналіз проблемних питань застосування твердіючого закладання для заповнення підземних пустот рудних родовищ. В *Матеріалах X міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації»* (с. 432-434). Дніпро, Україна: НТУ «Дніпровська політехніка».

69. **Петльований, М.В.**, & Сай, К.С. (2021). Вплив видобутку залізних руд на екологічний стан денної поверхні в умовах Кривбасу: шляхи вирішення. В *Матеріалах IV міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку»* (с. 205-208). Херсон, Україна: Олді-Плюс.

70. **Петльований, М.В.**, & Філоненко, О.В. (2019). Техногенна та екологічна небезпека підземного видобутку залізних руд Кривбасу. В *Матеріалах міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика»* (с. 66-68). Харків, Україна: Національний університет цивільного захисту України.

71. **Петльований, М.В.** (2019). Особливості утилізації доменних гранульованих шлаків у гірничодобувній галузі. В *Матеріалах VIII міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Сучасний рух науки»*, 3, (с. 12-17). Дніпро, Україна: WayScience.

72. **Petlovanyi, M.**, Ruskykh, V., & Sai, K. (2018). Challenges of underground mining of steeply pitching deposits with stowing in anomalous geological environment. In *Materials of the International Scientific Conference «Innovative Development of Resource-Saving Technologies of Mineral Mining and Processing»* (p. 56-60). Petrosani, Romania: University of Petrosani.

Особистий внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві:

Особистий внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві: [7, 25, 60, 70, 71] – аналіз стану розвитку гірничодобувної галузі та її впливу на стан земної поверхні; [11, 15, 26, 67-69, 72] – критичний аналіз літературних джерел, опрацювання та систематизація даних; [13, 16, 21, 33, 65] – аналіз гірничо-геологічних, гірничо-технічних умов та показників підземного видобутку; [7, 10, 25, 36, 22] – аналіз форм та масштабів порушень земної поверхні; [36, 40, 66] – вивчення проблем стійкості природно-техногенних масивів; [9, 19, 28, 29] – геопросторове вивчення техногенних пустот та закладних матеріалів; [2, 30, 31, 43-45] – дослідження екологобезпечності застосування відходів у складі закладних сумішей; [15, 32, 61, 62, 2] – оцінка ступеня екологічної небезпечності відходів; [3, 7, 54, 56, 58, 59, 63, 51] – розробка нової концепції комплексної ліквідації техногенних пустот; [5, 34, 52, 53, 57, 64] – розробка методик проведення досліджень; [8, 34, 38, 39, 41, 47] – проведення теоретичних та аналітичних досліджень; [5, 12, 14, 27, 35, 37, 46] – проведення комплексу експериментальних досліджень, аналіз та обробка результатів; [1, 6, 17, 20, 24, 32, 42, 50] – виконання чисельного моделювання деформацій масиву та земної поверхні, аналіз результатів; [3, 55] – еколого-економічна оцінка комплексної ліквідації; [5, 18, 23, 48, 49, 58, 59] – розробка технології та способів ліквідації техногенних пустот.

АНОТАЦІЯ

Петльований М.В. Наукові основи комплексної ліквідації техногенних пустот із використанням відходів гірничо-металургійного комплексу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин, 21.06.01 – екологічна безпека. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної наукової проблеми формування теоретико-методологічних засад керування геомеханічним станом природно-техногенного масиву гірських порід і земної поверхні при ліквідації різнотипних техногенних пустот, утворених підземним та відкритим видобутком корисних копалин, на основі застосування екологобезпечної технології пастового закладання з утилізацією відходів гірничо-металургійного комплексу.

Встановлено закономірності просторово-часового та безперервного розвитку площ провальних зон діючих і закритих залізрудних шахт та їх впливу на рослинно-ґрунтовий покрив. Науково доведено доцільність утилізації хвостів збагачення у складі пастової закладної суміші, що обґрунтовано вдосконаленою системою інтегрального ранжування відходів за рівнем безпеки, класифікацією технологій закладання за різноманіттям відходів та сукупністю раціональних індикаторів. Виявлено закономірності іммобілізації важких металів і обмеження міграції забруднюючих речовин при трансформації дисперсних хвостів у монолітний закладний масив.

Встановлено систему закономірностей формування оптимальних реологічних, фізико-хімічних і міцнісних властивостей пастових закладних сумішей та визначено раціональні параметри їх компонентного складу для ліквідації підземних та поверхневих пустот. Отримано залежності підвищення міцності та нормалізації консистенції пастової закладної суміші від додавання частки дроблених порід і розміру їх фракції. Розроблено аналітичні моделі, що визначають міцнісні властивості закладного масиву при ліквідації провальних зон шахт, непогашених підземних і кар'єрних пустот. Вдосконалено методологію чисельного моделювання складних геомеханічних процесів при підземній розробці рудних покладів. Отримано залежність ефективності блокування зсувних процесів та деформацій земної поверхні від кута відкосу висячого боку й модуля деформації закладного масиву при ліквідації провальної зони. Виявлено існування приграничного геомеханічного стану масиву навколо підземних пустот, закономірності його формування та меж стійкості залежно від глибини, кута падіння покладу і геометричних параметрів виробленого простору, що визначає можливість їх ліквідації до стадії обвалення.

Розроблено технологічні рішення ліквідації різнотипних техногенних пустот на основі пастових і комбінованих закладних масивів та методики розрахунку параметрів. Еколого-економічною оцінкою доведено ефективність комплексного підходу до ліквідації пустот у порівнянні з локальним та вибіркоким їх усуненням.

Ключові слова: провальні зони, підземні пустоти, промислові відходи, пастове закладання, аналітична модель, лабораторні дослідження, чисельне моделювання, ліквідація, рекультивація, утилізація, техногенно-екологічна безпека

ABSTRACT

Petlovanyi M.V. Scientific foundations for the integrated elimination of technogenic voids using mining and metallurgical waste. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation submitted for the Doctorate Degree in Technical Sciences in the specialty 05.15.02 – underground mining of mineral deposits; 21.06.01 – environmental safety. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

The dissertation is devoted to solving an important scientific problem of developing theoretical and methodological foundations for managing the geomechanical state of the natural-technogenic rock mass and the ground surface during the elimination of various types of technogenic voids formed by underground and open-pit mining, based on the application of an environmentally safe paste backfilling technology with the utilization of mining and metallurgical industry wastes.

The analysis of ground surface subsidence showed that, unlike coal-mining regions where smooth deformations with relatively small amplitudes prevail, iron-ore mining areas are characterized by the largest and deepest disturbances of the ground surface. The Kryvyi Rih Basin is characterized by a combination of gradual subsidence zones and localized destructive deformations manifested as sinkholes and collapse zones reaching depths of 50 – 200 m, associated with long-term underground mining using caving systems without backfilling of mined-out spaces. Particularly dangerous

are mine collapse zones and unfilled underground voids located within shallow strata, periodically manifesting as sinkholes and funnels on the ground surface. Four main types of technogenic objects determining the condition of disturbed territories were identified: mine collapse zones, gradual subsidence zones, quarry voids, and industrial waste accumulation facilities (waste dumps and tailings storage facilities). Their total area reaches about 49% of the territory of Kryvyi Rih, more than 65% of which is occupied by waste storage facilities.

The analysis of reclamation approaches showed that traditional methods for eliminating technogenic voids, particularly backfilling with waste rock, do not provide sufficient stabilization of the rock mass due to limited mechanical properties of the material and restricted possibilities for utilizing other waste types, including beneficiation tailings. A transition from local elimination of individual voids to a systemic approach to managing technogenic-environmental safety of mining territories is required.

Based on geoinformation analysis of historical Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite imagery, the spatiotemporal dynamics of the development of mine collapse zones in the Kryvyi Rih Basin were determined. The spatiotemporal patterns and continuous expansion of collapse zones at operating and closed iron ore mines, as well as their impact on the soil-vegetation cover, were established. This impact is manifested by a decrease in the NDVI from 0.49 to 0.36 within the 0–100 m zone adjacent to the collapse area. According to the results of an improved integrated environmental hazard assessment of waste accumulation facilities in the Kryvyi Rih Basin, tailings storage facilities were found to have the highest potential hazard level (23.6 points). Based on the analysis of hydrochemical indicators of the Inhulets River waters, relationships between sulfate and chloride concentrations within the tailings impact zone and climatic factors, particularly precipitation and air temperature, were determined. It was found that during periods of intensive precipitation sulfate concentrations may increase by up to 2.6 times and chloride concentrations by up to 2 times, indicating the activation of leaching and infiltration processes of pollutants from tailings deposits.

Based on the study of the diversity of industrial waste types as a potential raw material base for backfill materials in the Kryvyi Rih Basin, a classification of possible methods for backfilling technogenic voids was developed for the first time. The classification includes variations in the component compositions of backfill mixtures and possible combinations of binders and inert materials. It was established that the following main backfilling methods may be implemented under regional conditions: dry backfilling, hydraulic backfilling, injection backfilling, cemented backfilling, and paste backfilling. Considering the identified trend of transformation of the backfill mass physical state from loose to monolithic, the necessity of utilizing beneficiation tailings as the largest source of technogenic load, and the set of technological, environmental, economic, and social feasibility indicators, the priority of applying paste backfill technology for the elimination of various types of technogenic voids was substantiated.

Experimental studies showed that when dispersed tailings meet water, the sulfate content increases according to a logarithmic relationship by 1.3 – 1.4 times within 7 days, whereas in a backfill massif the increase is also logarithmic, but the concentration is 25 – 30% lower. In the dispersed state of tailings, heavy metal emission follows a polynomial relationship, while in the paste backfill massif no

emission was detected, corresponding to a 100% immobilization effect of heavy metals by the cement matrix of the artificial massif even under the worst-case scenario. A reduction in iron leaching from the monolithic massif by 2 – 6 times compared with dispersed tailings was recorded.

A new environmentally oriented concept for the integrated elimination of technogenic voids in mining regions was developed, based on the use of mining and metallurgical waste as a raw material base for the formation of paste backfill massifs. The concept involves transforming the physical state of waste from dispersed to monolithic by converting it into multicomponent paste mixtures followed by filling technogenic voids. Seasonal features of the technology implementation were identified, according to which the elimination of open technogenic voids is carried out mainly during the warm season, whereas paste backfilling in underground spaces can be performed year-round due to the stable temperature regime of the rock mass.

A comprehensive research methodology combining experimental, analytical, and numerical approaches to substantiating the parameters of technogenic void elimination was developed. Analytical studies were aimed at determining the required strength properties of the backfill massif in different types of voids: based on limit equilibrium theory for collapse zones and underground voids, and a modified elasticity theory for quarry voids. The experimental part included a wide range of laboratory methods for determining physicochemical, rheological, and mechanical properties of materials, mixtures, and formed massifs. Numerical studies were performed using the finite element method with the nonlinear Hoek-Brown strength criterion for the host rock mass and the Mohr-Coulomb criterion for backfill massifs, considering realistic stratification of rocks and staged simulation of the historical mining of ore deposits.

A number of new analytical models were developed, including: a model for determining the resultant pressure on collapse zone boundaries considering the interaction of the active rock wedge pressing collapsed rock and its resistance; a model for determining the required strength of the paste backfill massif considering shear and retaining forces and geometric parameters of voids; model for predicting surface backfill massif subsidence in quarry voids considering the arching effect.

Laboratory studies made it possible to determine the conditions for forming a homogeneous paste-like state of backfill mixtures based on dewatered beneficiation tailings sampled from tailings storage areas, which is achieved at a solid phase content of about 75% (70.5% tailings and 4.5% binder), ensuring an optimal balance of transportability and strength properties of paste mixtures. The rheological behavior of paste backfill mixtures was found to be adequately described by the Herschel-Bulkley model and can be purposefully improved by introducing 1.0 – 1.5% natural loam, which reduces yield stress and optimizes mixture transport parameters while maintaining structural stability. A dependence of the strength of the paste backfill massif on the electrical conductivity of the mixture was established, expressed as a linear function of its peak value and an inverse power function of the time required to reach this maximum, enabling optimization of mixture composition and non-destructive control of its strength characteristics. A system of relationships describing the combined influence of solid phase content and binder dosage, including partial replacement of cement with ground granulated blast furnace slag, on the rheological

and physic -mechanical properties of paste mixtures was obtained. It was found that cone slump is approximated by polynomial relationships, strength gain by logarithmic functions, and hydration kinetics by power functions, enabling targeted formation of the artificial massif parameters.

Numerical modeling also revealed important new results. The regularity of partial blocking of ground surface deformation during the elimination of mine collapse zones through the formation of a supporting prism paste backfill was identified. Its effectiveness increases polynomial with the increase of the hanging wall slope angle and the deformation modulus of the backfill massif, reaching up to 32%, while the self-locking effect becomes activated after 50°. The existence of a near-limit state of the rock mass surrounding underground voids was also established at $H / L_{cr} = 0.4 - 1.2$.

Based on analytical, laboratory, and numerical research results, new technology and a comprehensive methodology for calculating parameters for void elimination were developed. An environmental and economic assessment methodology was also formed based on an integrated efficiency indicator. It was demonstrated that the integrated elimination of all technogenic voids (40 million m³) ensures a positive integrated effect of UAH 1.74 billion over 50 years. It was established that full implementation of the proposed concept will allow the utilization of about 53 million tons of beneficiation tailings, 8 million tons of waste rock, and up to 2.3 million tons of slag. As a result, 200 ha of disturbed land will be reclaimed and 37 ha will be returned to economic use, ensuring sustainable development of the Kryvyi Rih mining region.

Keywords: sinkhole zones, underground voids, quarry voids, paste backfill, strength, analytical model, laboratory research, numerical modeling, elimination, waste utilization, environmental and economic effect, technogenic and environmental safety

ПЕТЛЮВАННИЙ Михайло Володимирович

**НАУКОВІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОЇ ЛІКВІДАЦІЇ
ТЕХНОГЕННИХ ПУСТОТ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ**

(Реферат)

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19