

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**«Наукові основи комплексної ліквідації техногенних пустот
із використанням відходів гірничо-металургійного комплексу»,**
представлену Петльованим Михайлом Володимировичем на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями
05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин
та 21.06.01 – екологічна безпека

**1. Ступінь актуальності обраної теми дисертаційного дослідження,
її зв'язок з важливими державними програмами, планами та науковими
темами**

У сучасних умовах видобуток та переробка мінеральних ресурсів мають суттєве значення для розвитку різних галузей економіки та технологій. Водночас розробка надр і вилучення значних обсягів гірничої маси призводять до істотної трансформації природного геологічного середовища у техногенно-порушений масив, що в подальшому ускладнює ведення гірничих робіт. Значною проблемою гірничодобувної галузі є утворення значних обсягів промислових відходів, які переважно складаються на земній поверхні та протягом тривалого часу залишаються джерелами техногенного навантаження на компоненти навколишнього середовища. Існуючі напрями використання та утилізації таких відходів, як правило, не забезпечують темпів, зіставних з масштабами їх утворення й накопичення, внаслідок чого проблема як в Україні, так і у світі має довготривалий системний характер.

Особливо виразно поєднання геомеханічних та екологічних наслідків тривалого освоєння надр проявляється у Криворізькому залізорудному басейні (КЗБ), який має стратегічне значення для гірничо-металургійного комплексу (ГМК) України. Багаторічна інтенсивна розробка залізорудних родовищ басейну без системного застосування закладання виробленого простору призвела до утворення масштабних та локальних провальних зон на земній поверхні, глибина яких сягає 50–200 м. Такі порушення не лише ускладнюють ведення підземних гірничих робіт, але й формують високий рівень техногенно-екологічної небезпеки для прилеглих ландшафтів, промислової та цивільної інфраструктури. Значну техногенну загрозу становлять непогашені підземні пустоти від функціонування шахт, що розробляли рудні поклади у приповерхневій товщі та можуть спричиняти раптові обвалення земної поверхні. Також слід зазначити наявність низки вироблених просторів закритих кар'єрів, особливо в межах промислових територій м. Кривий Ріг, над якими відновлення земної поверхні ще не здійснено. Серед накопичених промислових відходів значну частку становлять відвальні породи і хвости

збагачення залізних руд. Значна частина цих об'єктів розташована поблизу забудованих територій та водних систем, унаслідок чого їх довготривале зберігання формує додаткове техногенно-екологічне навантаження та обмежує можливості раціонального використання земель.

Для покращення стану земної поверхні та зменшення навантаження на довкілля традиційно застосовується засипка техногенних пустот пустими відвальними кар'єрними і шахтними породами, при цьому інші відходи, накопичені у значних обсягах, такі як дрібнодисперсні хвости збагачення залізних руд, переважно складуються у хвостосховищах та використовуються для будівництва нових дамб, а пошук новітніх, екологічнобезпечних шляхів їх утилізації ще залишається недостатньо реалізованим. Такі заходи як засипка пустими породами мають локальний характер, адже ліквідують переважно близькі до відвалів пустоти, а більш віддалені – залишаються не ліквідованими, що свідчить про обмеженість застосованих заходів. Слід відзначити, що сипке середовище з геомеханічної точки зору має обмежену ефективність через пустотність та високі фільтраційні властивості. Сьогодні бракує науково-технічних рішень ліквідації пустот, у яких окрім пустих порід були б залучені також інші види відходів, накопичених у значних обсягах.

У цьому контексті актуальність дисертаційного дослідження визначається передусім необхідністю переходу від окремих локальних заходів із ліквідації наслідків гірничих робіт до комплексного підходу, за якого різнотипні техногенні пустоти та накопичені промислові відходи, у тому числі хвости збагачення, розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної природно-техногенної системи. Такий підхід потребує наукового обґрунтування властивостей закладних матеріалів, закономірностей їх взаємодії з породним масивом, умов геомеханічної стабілізації масиву навколо різних типів пустот, а також технологічних параметрів закладних робіт. Реалізація такого підходу сприятиме раціональному надрокористуванню та сталому розвитку гірничопромислових регіонів.

Дисертаційне дослідження за своєю тематичною спрямованістю відповідає важливим національним програмам і стратегіям, зокрема Загальнодержавній програмі розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року, Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року та державним орієнтирам щодо досягнення Цілей сталого розвитку в Україні. Дисертаційна робота виконувалася в межах багаторічної наукової діяльності здобувача за відповідним тематичним напрямом, у ході якої була виконана та наразі виконується низка науково-дослідних робіт і проєктів, що фінансувались МОН України, Національним фондом досліджень та гірничодобувними підприємствами (0116U004619, 0116U008041, 0120U101099, 2021.01/0306, 0126U001271, 0126U001271, 7/19, 10146-22/4122-ПУ).

У частині зазначених робіт здобувач виступав виконавцем, у частині – науковим керівником. Тематика цих науково-дослідних робіт і проєктів безпосередньо пов'язана з дисертаційним дослідженням та відповідними державними пріоритетами у сфері використання мінерально-сировинної бази, управління відходами та сталого розвитку.

2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у докторській дисертації, їх достовірність та новизна

За результатами виконаних досліджень здобувачем сформульовано чотири наукові положення, що відображають основні результати роботи, відповідають її меті й завданням та тематичним напрямкам спеціальностей 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин та 21.06.01 – екологічна безпека.

Їх зміст можна узагальнити таким чином:

1. Встановлено логарифмічний характер розширення провальних зон у постактивній фазі та кількісно оцінено пов'язане з цим погіршення стану ґрунтово-рослинного покриву; обґрунтовано використання монолітного пастового закладання для обмеження деформацій і іммобілізації забруднюючих речовин.

2. Встановлено раціональні параметри пастової суміші з вмістом твердої фази 75%, закономірності її реологічної поведінки та зв'язок електропровідності з формуванням міцності закладного масиву.

3. Визначено закономірності часткового блокування деформацій земної поверхні упорною призмою з пастового закладання залежно від геометрії провальної зони та жорсткості закладного масиву.

4. Виявлено приграничний геомеханічний стан масиву навколо непогашених підземних пустот у діапазоні $H / L_{кр} = 0,4-1,2$ та встановлено залежності його меж і необхідної міцності закладання від глибини й кута падіння покладу.

Наукову новизну отриманих результатів здобувач систематизував за категоріями «вперше», «уточнено» та «дістало подальшого розвитку».

До результатів, отриманих уперше, віднесено концепцію комплексної ліквідації різнотипних техногенних пустот із використанням відходів ГМК, що створюють значне техногенне навантаження; встановлення закономірностей формування приграничного стану масиву навколо непогашених підземних пустот; зв'язку міцності пастового закладання з параметрами електропровідності суміші; логарифмічного характеру розвитку площі провальних зон у постактивній фазі.

Уточнено закономірності часткового блокування деформацій земної поверхні пастовим закладним масивом; залежності необхідної міцності закладання від параметрів приграничного стану; ефект іммобілізації

забруднюючих речовин у цементній матриці; раціональні параметри пастових сумішей та вплив дроблених відвальних порід на їх міцність.

Подальшого розвитку набули методологія чисельного моделювання геомеханічних процесів з урахуванням структурної неоднорідності масиву та напрям утилізації хвостів збагачення у складі пастових закладних сумішей на основі системи інтегрального ранжування відходів.

Обґрунтованість наукових положень і висновків забезпечується комплексним застосуванням аналітичних, експериментальних і чисельних методів, дистанційного зондування та статистичної обробки даних. Результати аналітичних розрахунків зіставлено з результатами чисельного моделювання, для яких наведено збіжність 73–89%. Екологічну складову обґрунтовано результатами аналізу просторово-часових змін стану земної поверхні й рослинного покриву та лабораторними дослідженнями вилуговування забруднюючих речовин. Сукупність застосованих методів і обсяг вихідних даних дають підстави вважати основні висновки роботи достатньо обґрунтованими.

Аналіз змісту дисертаційної роботи, наведеного особистого внеску здобувача та опублікованих результатів дає підстави вважати дисертацію самостійно виконаною науковою працею, у якій отримано нові наукові результати, що мають теоретичне та практичне значення.

3. Загальнонаціональне та світове значення результатів дисертаційної роботи для науки та практики

Вважаю, що загальнонаціональне наукове значення результатів роботи полягає у розвитку теоретико-методологічних засад керування геомеханічним станом природно-техногенного масиву при ліквідації різнотипних техногенних пустот шляхом формування пастових і комбінованих закладних масивів із залученням відходів ГМК до повторного використання, що сприяє підвищенню техногенно-екологічної безпеки гірничорудних регіонів.

Практичне значення результатів полягає у розробленні технології комплексної ліквідації техногенних пустот, методик розрахунку параметрів пастового і комбінованого закладання, принципів раціонального розміщення закладного комплексу та методики еколого-економічної оцінки запропонованих рішень.

Міжнародне значення отриманих результатів пов'язане з можливістю використання запропонованих підходів в інших гірничопромислових регіонах, для яких характерне поєднання техногенних пустот, порушених земель і значних обсягів відходів видобування та переробки мінеральної сировини. Запропоновані рішення узгоджуються із сучасними напрямками повторного використання гірничих відходів, рекультивації постмайнінгових територій та впровадження принципів циркулярної економіки.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес підготовки фахівців НТУ «Дніпровська політехніка», а також у вигляді методик, рекомендацій передані у науково-дослідну і проєктну діяльність Науково-дослідного гірничорудного інституту (НДГРІ) Криворізького національного університету, Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України і компанії ТОВ «Гема Трейдинг».

4. Оцінка змісту та логічно-структурної побудови дисертаційного дослідження, повнота викладу результатів у наукових публікаціях

Виконане здобувачем дисертаційне дослідження складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, 7 основних розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 318 найменувань і 6 додатків. Містить значну кількість ілюстративного матеріалу (174 рисунки) та кількісно-якісних показників основних і допоміжних результатів досліджень, викладених у 79 таблицях. Обсяг безпосередньо основного тексту дисертації становить 509 сторінок.

Далі наведено стислий аналіз структурних частин дисертаційної роботи.

У **вступі** здобувачем обґрунтовано актуальність обраної теми досліджень, висвітлено 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.

Розділ 1 дисертаційної роботи присвячено аналізу сучасного стану проблеми порушення земної поверхні та зміни стану масиву гірських порід під впливом гірничих робіт. Здійснено системний аналіз масштабів і характеру техногенних порушень у гірничодобувних регіонах, особливу увагу приділено КЗБ, а також узагальнено науковий доробок щодо питань геомеханічної та екологічної безпеки, рекультивації й закладання виробленого простору. За результатами аналізу аргументовано визначено наукові прогалини, що стало підґрунтям для формулювання наукової проблеми та передумов переходу від локальних заходів до комплексної ліквідації техногенних пустот.

Розділ 2 присвячено комплексній оцінці техногенно-екологічної небезпеки техногенних пустот і накопичених відходів ГМК. Виконано їх багатofакторну систематизацію та ранжування, досліджено просторово-часовий розвиток провальних зон і його вплив на стан прилеглих територій, обґрунтовано пріоритетність використання хвостів збагачення у складі пастових закладних сумішей та за результатами непрямих досліджень оцінено вплив хвостосховищ на прилеглі водні системи. Експериментальними дослідженнями оцінено екологічну безпечність трансформації хвостів збагачення у монолітний закладний масив. Логічним підсумком розділу є

формування екологоорієнтованої концепції комплексної ліквідації техногенних пустот із використанням відходів ГМК.

У розділі 3 сформовано методологічну основу подальших досліджень, що комплексно поєднує аналітичні, лабораторні та чисельні методи. Обґрунтовано методики визначення фізичних, фізико-хімічних, реологічних і фізико-механічних властивостей закладних сумішей та масивів, розроблено розрахункові схеми для визначення необхідних міцнісних характеристик закладних масивів для різних типів техногенних пустот і методологію чисельного моделювання трансформації геомеханічного стану масиву під впливом закладного масиву, у якій використано поширений у світовій практиці геотехнічних розрахунків критерій міцності Хоека-Брауна. Застосований комплекс методів є сучасним, різноплановим та логічно відповідає поставленим у роботі науковим завданням.

Розділ 4 висвітлює результати аналітичних досліджень силової взаємодії закладного масиву з породним середовищем у різних видах техногенних пустот. Розроблено аналітичні моделі для визначення навантаження на закладний масив у провальних зонах, необхідної міцності закладання непогашених підземних пустот та прогнозування осідань поверхні закладного масиву у вироблених просторах кар'єрів. Розроблені моделі дають змогу прогнозувати міцнісні та деформаційні параметри закладання залежно від гірничо-геологічних і геометричних умов пустот.

У розділі 5 представлено результати комплексу експериментальних досліджень фізико-хімічних, реологічних і міцнісних властивостей закладних матеріалів, сумішей та сформованого масиву. Встановлено закономірності впливу вмісту твердої фази, дозування та виду в'язучого, мінеральних добавок і дроблених відвальних порід на технологічні та механічні характеристики пастового закладання. Визначено раціональні компонентні склади пастових сумішей та модель їх реологічної поведінки. Важливим результатом є також встановлення зв'язку електропровідності суміші з формуванням міцності закладного масиву, що розширює можливості оперативного контролю його властивостей.

Розділ 6 містить результати багатоваріантного чисельного моделювання трансформації геомеханічного стану масиву навколо різнотипних техногенних пустот та оцінки впливу сформованого закладного масиву на розвиток деформацій. Досліджено ефективність закладання провальних зон, встановлено закономірності формування приграничного стану масиву навколо непогашених підземних пустот та оцінено стійкість поверхні закладного масиву у вироблених просторах кар'єрів. Отримані результати дозволили кількісно оцінити геомеханічний ефект запропонованих рішень і обґрунтувати умови їх раціонального застосування.

У розділі 7 здобувачем узагальнено отримані теоретичні та експериментальні результати у вигляді конкретних технологічних рішень і методик розрахунку параметрів комплексної ліквідації техногенних пустот. Обґрунтовано технологічні схеми пастового та комбінованого закладання провальних зон, непогашених підземних пустот і вироблених просторів кар'єрів, визначено принципи розміщення мобільного закладного комплексу та виконано еколого-економічну оцінку запропонованих рішень. Розділ має виражену практичну спрямованість, логічно узагальнює отримані наукові результати та визначає напрями їх практичної реалізації.

У додатках наведено документи, що підтверджують практичне використання результатів у навчальному процесі та проєктній діяльності організацій і підприємств, а також патенти на корисні моделі. Представлено інформаційно-аналітичну карту геопросторового розташування техногенних пустот і потенційних закладних матеріалів в Україні та Криворізькому басейні.

Дисертаційне дослідження характеризується цілісністю та комплексністю. У роботі отримано нові наукові результати, які покладено в основу чотирьох наукових положень, що відповідають тематичним напрямкам спеціальностей 05.15.02 і 21.06.01.

Список використаних джерел охоплює значний масив праць українських і закордонних учених, що свідчить про належне опрацювання сучасного стану досліджуваної проблеми.

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 корисні моделі; 23 статті та тези доповідей у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Вважаю, що в опублікованих наукових працях здобувача основні результати дисертаційного дослідження висвітлено достатньою мірою. Результати роботи пройшли широку апробацію на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях. В опублікованих працях розкриті основні результати досліджень за обома спеціальностями 05.15.02 і 21.06.01.

5. Відсутність (наявність) порушень академічної доброчесності

За результатами вивчення дисертаційної роботи ознак порушення академічної доброчесності не виявлено. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується відповідними посиланнями на

джерела. Особистий внесок здобувача у наукові праці, виконані у співавторстві, наведено в дисертації.

6. Зауваження та дискусійні питання стосовно змісту та результатів докторської дисертації

Щодо змісту роботи та результатів досліджень:

1. У п. 3.3.4 (с. 251) достатньо детально наведено граничні умови чисельної моделі. Доцільно було б більш детально охарактеризувати вихідне природне поле напружень, зокрема співвідношення його горизонтальної та вертикальної складових. Наведення цього параметра дозволило б повніше представити прийняті умови чисельного моделювання.

2. У розділі 4 автором розроблено аналітичні моделі для визначення силового навантаження та необхідних параметрів закладних масивів при ліквідації різних типів техногенних пустот. При цьому для кожної моделі наведено відповідні передумови та прийняті припущення, зумовлені складністю реальних геомеханічних систем. Доцільно було б наприкінці розділу узагальнити їх у вигляді більш чіткого визначення умов і меж практичного застосування аналітичних моделей залежно від мінливих параметрів систем та випадків, коли результати потребують уточнення чисельними методами.

3. У п. 5.2 (с. 334–335, рис. 5.6–5.7) експериментально обґрунтовано раціональний вміст твердої фази пастової закладної суміші на рівні 75%. При цьому хвости збагачення в межах осушених карт наміву можуть характеризуватися певною просторовою неоднорідністю гранулометричного складу та вологості. Доцільно було б детальніше пояснити, яким чином у виробничих умовах передбачається забезпечувати стабільність встановленого компонентного складу та пастоподібного стану суміші при можливій мінливості характеристик вихідних хвостів.

4. При чисельному моделюванні геомеханічних процесів масиву, що містить непогашену підземну пустоту, автором достатньо детально обґрунтовано вибір критеріїв міцності та вихідних фізико-механічних параметрів масиву (методика – п. 3.3.4; результати – п. 6.2). Проте доцільно було б більш детально оцінити чутливість отриманих результатів до можливого варіювання індексу геологічної міцності GSI, особливо для приповерхневого техногенно-порушеного масиву. Зокрема, становить науковий інтерес, наскільки така варіація може впливати на встановлені межі приграничного стану непогашених підземних пустот та визначення необхідної міцності закладного масиву.

5. Екологічну безпечність трансформації хвостів збагачення у монолітний пастовий закладний масив обґрунтовано, зокрема, результатами лабораторних досліджень статичного вилуговування тривалістю 7 діб.

Водночас для оцінки довготривалої екологічної безпечності такого масиву доцільно було б більш детально дослідити можливу зміну його характеристик у часі під впливом тривалого та циклічного водонасичення, висушування, тріщиноутворення та інших природних чинників.

6. За результатами досліджень, викладених у розділі 7, здобувачем запропоновано технологію комплексної ліквідації техногенних пустот із застосуванням пастових закладних сумішей, що є логічним завершенням виконаних теоретичних, експериментальних і чисельних досліджень. Доцільно було б більш чітко узагальнити область та межі її практичного застосування у вигляді системи технологічних і економічних критеріїв, які визначають доцільність або можливі обмеження впровадження запропонованої технології залежно від типу й параметрів техногенних пустот, умов забезпечення закладними матеріалами, можливостей їх транспортування та організаційно-технологічних режимів функціонування закладної системи.

7. Запропонована еколого-економічна оцінка засвідчує позитивний економічний ефект комплексної ліквідації техногенних пустот у розмірі 1,74 млрд грн за розрахунковий період 50 років при терміні окупності 37 років. Зважаючи на значну тривалість прогностичного періоду та внесок майбутнього використання рекультивованих територій у загальний економічний ефект, доцільним було б доповнити оцінку аналізом чутливості результатів до зміни вартості матеріалів та енергоресурсів, транспортних витрат, економічної вигоди від використання відновлених земель та інших найбільш впливових вихідних параметрів.

Щодо викладу основного матеріалу досліджень:

Дисертаційна робота містить значний обсяг експериментального, аналітичного та розрахункового матеріалу, що в цілому позитивно характеризує повноту та значущість виконаних досліджень. Окремі частини роботи доцільно було б подати більш компактно. Зокрема, у розділі 3 частину ілюстрацій стандартного лабораторного обладнання та лабораторних тестів доцільно було б перенести до додатків; у підрозділі 6.2 серії близьких за структурою графічних результатів багатоваріантного чисельного моделювання, а також частину епюр різних стадій і сценаріїв моделювання закладного масиву у виробленому просторі кар'єру (підрозділ 6.3), представити більш узагальнено, зосередивши увагу на найбільш важливих результатах та закономірностях. Такі зміни дозволили б дещо зменшити обсяг основного тексту без втрати його наукової інформативності та чіткіше окреслити основні результати роботи.

Наведені зауваження та дискусійні питання мають виключно характер окремих уточнень і рекомендацій та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи як завершеної наукової праці.

7. Загальний висновок щодо дисертаційного дослідження

Дисертація є цілісною за змістом, має логічну структуру та послідовне викладення результатів. Матеріал дисертації викладено грамотною науково-технічною мовою. Отримані наукові результати є новими та достатньо обґрунтованими, а сформульовані висновки відповідають поставленій меті й завданням дослідження.

Дисертаційна робота Петльованого Михайла Володимировича «Наукові основи комплексної ліквідації техногенних пустот із використанням відходів гірничо-металургійного комплексу», подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин та 21.06.01 – екологічна безпека, є завершеною самостійною кваліфікаційною науковою працею, у якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності забезпечують вирішення актуальної наукової проблеми та мають теоретичне і практичне значення.

За змістом, науковим рівнем, обсягом виконаних досліджень, повнотою опублікування основних результатів та характером їх апробації дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, а також вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 23 вересня 2019 р. № 1220 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 8 жовтня 2019 р. за № 1086/34057.

Враховуючи наукову новизну, обґрунтованість і практичне значення отриманих результатів, вважаю, що Петльований Михайло Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин та 21.06.01 – екологічна безпека.

Офіційний опонент:

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

Олександр КРУКОВСЬКИЙ

