ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 622.83:624.19:338.49 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.275

© О.М. Тимченко[1], В.В. Янко[1]
[1] Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ГЕОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ ДОСВІДУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГЛИБОКИХ ШАХТ

O. Tymchenko[1], https://orcid.org/0009-0009-2757-4788
V. Yanko[1] https://orcid.org/0000-0003-1025-3047
[1] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

GEOMECHANICAL PREREQUISITES FOR DEVELOPING UNDERGROUND CRITICAL INFRASTRUCTURE BASED ON THE EXPERIENCE OF DEEP MINE OPERATION

Мета. Обґрунтувати можливість використання встановлених закономірностей шахтної геомеханіки як наукової бази для оцінювання стійкості перспективних підземних і заглиблених об'єктів критичної інфраструктури.

Методика. Дослідження поєднує аналіз нормативно-правових положень щодо захисту критичної інфраструктури, узагальнення теоретичних і натурних досліджень геомеханічних процесів навколо глибоких шахтних виробок та безрозмірний аналіз. Для зіставлення підземних об'єктів різного призначення, масштабу і глибини використано природний напружений стан, міцнісні й деформаційні властивості геоматеріалу, переміщення контуру, відносну глибину, нерівнокомпонентність напружень, водонасичення та жорсткість несучої конструкції.

Результати. Сформовано систему безрозмірних критеріїв часткової геомеханічної подібності глибоких шахтних виробок і неглибоких підземних споруд. Розрахунковим прикладом встановлено, що об'єкти з істотно різними абсолютними напруженнями та властивостями геоматеріалу можуть мати близький ступінь мобілізації міцності σ_0/S_m і відносну деформативність σ_0/E_m. Водночас близькість цих критеріїв не забезпечує повної геомеханічної подібності: зі зменшенням H/R зростає визначальна роль вільної поверхні, тому механізм деформування неглибокої споруди відрізняється від глибокої виробки.

Наукова новизна. Встановлено залежність умов часткової геомеханічної подібності від сукупності безрозмірних параметрів, що характеризують мобілізацію міцності, деформативність, відносну глибину, нерівнокомпонентність поля напружень, водонасичення та відносну жорсткість несучої конструкції. Встановлено закономірність, за якою зближення критеріїв σ_0/S_m і σ_0/E_m для глибокої виробки та неглибокої споруди характеризує подібність за мобілізацією міцності й деформативністю, тоді як істотна відмінність H/R обмежує таке перенесення через зростання впливу вільної поверхні.

Практична значимість. Система критеріїв дає змогу визначати, які результати натурних спостережень і верифікованих моделей гірничої геомеханіки можуть бути використані як вихідна база для постановки задач стійкості нових підземних об'єктів. Підхід не замінює інженерні вишукування, чисельне моделювання та нормативний розрахунок конкретної споруди.

Ключові слова: *критична інфраструктура, вугільна шахта, підземний простір, геомеханіка, напружено-деформований стан, слабкі ґрунти, геомеханічна подібність, стійкість підземних споруд.*

Вступ. Збройна агресія Російської Федерації проти України перетворила захист критичної інфраструктури з переважно організаційної та техногенної задачі на комплексну проблему забезпечення функціонування держави в умовах систематичного фізичного ураження об'єктів. Закон України «Про критичну інфраструктуру» визначає правові та організаційні засади створення і функціонування національної системи її захисту [1]. Чинний перелік секторів критичної інфраструктури охоплює, зокрема, паливно-енергетичний сектор, водопостачання та водовідведення, транспорт, охорону здоров'я, цифрові технології, фінансовий сектор та інші суспільно важливі сфери [2].

Для тематики цього дослідження принциповим є те, що до паливно-енергетичного сектору безпосередньо включено вугільно-промисловий комплекс, а до його основних послуг віднесено видобуток вугілля для генерації електроенергії на теплоелектростанціях і теплоелектроцентралях, а також зберігання та постачання вугілля [2]. Отже, стійкість вугільних підприємств і системи їх підземних виробок має розглядатися не лише як галузева гірничотехнічна задача, але й як складова стійкості критичної енергетичної інфраструктури.

Воєнні події одночасно сформували іншу інженерну постановку: для обладнання та технологічних систем, функціональні властивості яких допускають заглиблене або підземне розміщення, використання підземного простору може бути одним із засобів зниження вразливості. Держава вже реалізує спеціальні інженерно-технічні заходи захисту об'єктів паливно-енергетичного сектору. За даними Державного агентства відновлення, у межах відповідних проєктів споруджувалися захисні конструкції для розподільчих підстанцій НЕК «Укренерго» з рівнями захисту від БПЛА, уламків та ракетних уражень [3, 4]. Це підтверджує перехід від традиційної експлуатаційної надійності до вимоги фізичної стійкості енергетичних об'єктів у воєнних умовах.

Водночас створення підземних або заглиблених споруд неминуче формує геотехнічну задачу взаємодії конструкції з навколишнім ґрунтовим чи породним масивом. У гірничій промисловості такі задачі досліджуються десятиліттями, особливо для глибоких шахт, де високі геостатичні напруження, слабкі та шаруваті породи, тривала експлуатація і розвиток непружних деформацій створюють складні умови підтримання виробок [9, 10]. Тому актуальним є встановлення того, які саме закономірності шахтної геомеханіки можуть бути адаптовані для ширшого класу підземних споруд.

Аналіз попередніх досліджень. Сучасна механіка підземних споруд розглядає стійкість виробок і тунелів як результат взаємодії геометрії порожнини, природного поля напружень, міцнісних та деформаційних характеристик масиву, технології розкриття й жорсткості системи підтримання. У convergence-confinement method реакція масиву та реакція кріплення аналізуються спільно; сучасні модифікації методу враховують момент встановлення й жорсткість підтримувальної системи [11–13]. Для слабких порід одним із ключових факторів розвитку пластичних деформацій є співвідношення міцності масиву та рівня природних напружень [12, 14].

Для умов глибоких шахт України значний обсяг теоретичних та натурних досліджень узагальнено у працях О.М. Шашенка, О.В. Солодянкіна та співавторів [9, 10]. У монографії «Управление устойчивостью протяженных выработок

глубоких шахт» стійкість підземного об'єкта розглядається через напружено-деформований стан, переміщення контуру, розвиток зон непружних деформацій та геомеханічний моніторинг [9]. У монографії «Пучение пород почвы в выработках угольных шахт» процес великих деформацій розглядається як прояв втрати пружно-пластичної стійкості системи «виробка – кріплення – навколишній масив» [10]. Натурні дослідження у Західному Донбасі показують формування зон зруйнованих приконтурних порід, розвиток значних переміщень і тривалу у часі перебудову масиву [10].

Разом із тим глибокі шахтні виробки та неглибокі інфраструктурні споруди не можуть бути ототожнені. Для неглибоких тунелів і підземних споруд істотно зростає роль вільної поверхні, співвідношення глибини закладання до розміру поперечного перерізу, структурної нестійкості та водонасичення ґрунтів [15, 16]. Показано, що чинна нормативна база України відносить вугільно-промисловий комплекс до паливно-енергетичного сектору критичної інфраструктури, а видобуток вугілля для теплової генерації – до основних послуг відповідного підсектору. На основі відкритих даних ДТЕК продемонстровано збереження значних інвестицій у роботу шахт та одночасне зростання воєнних ризиків для вуглевидобувних підприємств. Отже, науково коректною є не ідея прямого перенесення шахтних конструктивних рішень, а встановлення критеріїв часткової геомеханічної подібності, за якими результати шахтних досліджень можуть використовуватися як вихідна інформація для нових розрахункових моделей.

Критична інфраструктура та роль вугільно-промислового комплексу принциповим є галузевий рівень: вугільно-промисловий комплекс прямо визначений складовою паливно-енергетичного сектору [2]. Узагальнення функціональних груп критичної інфраструктури, релевантних задачі підземного захисту наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Функціональні групи критичної інфраструктури, релевантні задачі підземного захисту (узагальнено за [1, 2])

Сектор/група	**Приклади функцій**	**Значення для стійкості держави**
Паливно-енергетичний сектор	Електроенергетика, теплова генерація, вугільно-промисловий комплекс та інші енергетичні підсектори	Безперервність електро- і теплопостачання; паливна база для ТЕС/ТЕЦ
Водопостачання та водовідведення	Водозабір, підготовка, транспортування та відведення води	Життєзабезпечення населення, промисловості та енергетики
Транспорт і логістика	Ключові транспортні вузли та системи	Переміщення людей, палива, обладнання і матеріалів
Цифрова та комунікаційна інфраструктура	Електронні комунікації, інформаційні системи	Управління, диспетчеризація, зв'язок
Охорона здоров'я та інші суспільно важливі сектори	Об'єкти, порушення роботи яких має суттєві наслідки для населення і держави	Безперервність базових послуг

Вугільні шахти займають особливе місце у цій системі через технологічний зв'язок із тепловою генерацією. Функціональний ланцюг можна подати як: «шахта → видобуток і підготовка вугілля → транспортування та запаси → теплова генерація → електро- і теплопостачання» (табл. 2). Порушення роботи початкових ланок не тотожне миттєвій зупинці генерації через наявність запасів палива, однак систематичне або тривале зниження видобутку зменшує стійкість паливного забезпечення.

Таблиця 2

Функціональний зв'язок вуглевидобутку з тепловою генерацією

Вуглевидобуток	**Підготовка і запаси**	**Транспортування**	**ТЕС / ТЕЦ**	**Електро- і теплопостачання**

Відкриті дані ДТЕК як індикатор актуальності проблеми. Відкриті повідомлення ДТЕК Енерго демонструють, що навіть за умов війни вуглевидобуток залишається ресурсно значущим для підтримання теплової генерації. За підсумками 2025 року компанія повідомляла про 16 млрд грн інвестицій у підтримку теплової генерації та вуглевидобутку, у тому числі про фінансування роботи шахт, проведення та ремонт гірничих виробок, підготовку лав, підземний транспорт та інші виробничі заходи [5]. У першому півріччі 2026 року ДТЕК Енерго повідомив про 7,2 млрд грн інвестицій у роботу підприємств, включно з шахтами та машинобудівними заводами [6]. Наведені показники не характеризують усю вугільну галузь України, однак є відкритим індикатором того, що підтримання вуглевидобувних потужностей продовжує розглядатися як необхідна складова роботи енергетики.

Одночасно шахти самі стали об'єктами воєнного впливу. 4 липня 2026 року ДТЕК повідомив про удар по шахтному підприємству, під час якого загинув працівник охорони, п'ятеро людей були поранені, а на момент удару під землею перебували 86 шахтарів [7]. 1–2 лютого 2026 року атаки були спрямовані на працівників та вугільне підприємство ДТЕК; компанія повідомляла про 12 загиблих і 16 поранених унаслідок удару по автобусу з шахтарями та про наступну атаку на шахту [8]. Таким чином, воєнний ризик стосується як наземних технологічних вузлів, так і енергопостачання шахт, транспортної інфраструктури та безпеки персоналу.

Для геомеханіки важливо, що функціональна стійкість шахти залежить від збереження експлуатаційного стану мережі підземних виробок. Вони забезпечують транспорт, вентиляцію, водовідлив, електропостачання, зв'язок і доступ до виробничих дільниць. Пошкодження або поступова втрата поперечного перерізу магістральних виробок може не мати такої миттєвої видимості, як руйнування наземної підстанції, але безпосередньо впливає на довготривалу надійність підприємства.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Метою роботи є обґрунтування методичних передумов адаптації результатів досліджень глибоких шахтних виробок до задач оцінювання стійкості перспективних неглибоких підземних споруд критичної інфраструктури.

Для досягнення мети поставлено такі задачі: визначити місце вугільних підприємств у чинній системі критичної інфраструктури України; проаналізувати відкриті дані щодо ролі вуглевидобутку у забезпеченні теплової генерації та воєнних ризиків для шахт; обґрунтувати доцільність використання підземного простору як одного з напрямів фізичного захисту окремих технологічних систем; сформувати систему безрозмірних критеріїв для зіставлення геомеханічного стану глибоких і неглибоких підземних споруд; встановити межі застосовності такого перенесення.

Основна частина. Підземний простір як напрям підвищення фізичної захищеності у воєнних умовах одним із напрямів підвищення живучості технологічних систем може бути перенесення окремих функцій у заглиблені або підземні споруди. Це положення не слід трактувати як універсальну рекомендацію щодо розміщення під землею всіх енергетичних чи комунальних об’єктів. Технічна доцільність визначається вибухопожежними ризиками, вентиляцією, тепловиділенням, ремонтопридатністю, евакуацією, доступом до обладнання, водозахистом, вартістю будівництва та наслідками можливого пошкодження.

Разом із тим нормативний і практичний досвід воєнного часу вже підтверджує значення заглиблення та спеціальних огороджувальних конструкцій. ДБН В.2.2-5:2023 встановлюють вимоги до проєктування і будівництва захисних споруд цивільного захисту та споруд подвійного призначення із захисними властивостями [17]. Державні проєкти інженерного захисту енергетичних об’єктів також використовують масивні захисні конструкції для зниження вразливості критично важливого обладнання [4].

Для підземних об’єктів зовнішній захист від засобів ураження є лише однією стороною задачі. Друга сторона – довготривала геотехнічна стійкість самої споруди. Саме тут накопичений досвід гірничої геомеханіки може мати міжгалузеву цінність.

Геомеханічна основа для перенесення закономірностей. Пряме перенесення параметрів шахтної виробки на неглибоку споруду в ґрунті є некоректним. На глибині 500–800 м визначальним фактором часто є високий рівень початкових напружень, тоді як для споруди на глибині 5–20 м геостатичний тиск у десятки разів менший. Водночас слабкий, водонасичений або структурно нестійкий ґрунт може характеризуватися на порядки нижчими значеннями міцності та модуля деформації. Через це різні за абсолютними параметрами системи можуть наближатися одна до одної за відносним ступенем мобілізації міцності або за відносними деформаціями.

У працях з геомеханіки глибоких шахт як узагальнювальний показник умов розробки використовується співвідношення між міцністю масиву та геостатичним навантаженням. Для подальшого узагальнення доцільно перейти до системи безрозмірних критеріїв. Її перевага полягає у можливості порівнювати об’єкти різного масштабу, глибини й типу геоматеріалу, не ототожнюючи абсолютні значення параметрів.

Система критеріїв геомеханічної подібності. Початкове вертикальне напруження в першому наближенні визначається вагою товщі порід або ґрунтів:

$$\sigma_v = \gamma H \quad (1)$$

де γ – об'ємна вага масиву; H – глибина закладання характерної точки споруди.

Першим критерієм пропонується відношення характерного початкового напруження σ_0 до еквівалентної опірності масиву руйнуванню S_m:

$$П_1 = \sigma_0 / S_m \quad (2)$$

Для гірських порід у спрощеній постановці S_m може бути пов'язана з міцністю на стиск Rc та коефіцієнтом структурного послаблення kc, тобто $S_m = Rckc$. Тоді $П_1$ є оберненою формою відомого показника відношення міцності до геостатичного тиску. Для дисперсних ґрунтів S_m повинна визначатися відповідно до прийнятого критерію міцності (наприклад, через ефективні параметри зчеплення і кута внутрішнього тертя), тому пряме прирівнювання Rc скельної породи до «міцності ґрунту» не допускається.

Другим критерієм є відносна деформативність середовища:

$$П_2 = \sigma_0 / E_m \quad (3)$$

де E_m – деформаційний модуль масиву. Цей параметр характеризує потенційний рівень деформацій при заданому напруженому стані.

Фактичну реакцію контуру доцільно характеризувати безрозмірною конвергенцією:

$$П_3 = u / R \quad (4)$$

де u – характерне переміщення контуру; R – характерний розмір (еквівалентний радіус або половина ширини) підземної споруди.

Для врахування принципової відмінності між глибокою та неглибокою спорудою вводиться критерій відносної глибини:

$$П_4 = H / R. \quad (5)$$

За великих значень H/R вплив земної поверхні на локальне поле напружень навколо виробки зменшується. За малих H/R вільна поверхня, можливість формування зон обвалення до поверхні та поверхневі осідання стають визначальними факторами.

Нерівнокомпонентність природного поля напружень характеризується:

$$П_5 = K = \sigma_h / \sigma_v \quad (6)$$

де σ_h та σ_v – характерні горизонтальна і вертикальна компоненти початкових напружень.

Для водонасичених середовищ доцільно враховувати відносний поровий тиск:

$$П_6 = p^w / \sigma_0 \quad (7)$$

де p^w – поровий або гідростатичний тиск. У слабких ґрунтах цей параметр безпосередньо впливає на ефективні напруження і, відповідно, на мобілізовану міцність.

Взаємодію з несучою конструкцією можна у першому наближенні описати приведеною радіальною жорсткістю k_s. Тоді критерій відносної жорсткості системи має вигляд:

$$П_7 = k_s R / E_m \tag{8}$$

Узагальнено відносні переміщення контуру можна представити функцією:

$$u / R = F(П_1, П_2, П_4, П_5, П_6, П_7, \nu, \Psi) \tag{9}$$

де ν – коефіцієнт Пуассона; Ψ – сукупність додаткових факторів, що враховують анізотропію, шаруватість, тріщинуватість, форму поперечного перерізу, послідовність спорудження та інші особливості. Фізичний зміст і призначення запропонованих критеріїв узагальнено в таблиці 3.

Таблиця 3

Запропонована система критеріїв часткової геомеханічної подібності

Критерій	**Фізичний зміст**	**Застосування**
$П_1 = \sigma_0/S_m$	Ступінь мобілізації міцності	Порівняння близькості до граничного/пластичного стану
$П_2 = \sigma_0/E_m$	Відносна деформативність	Оцінка потенційного рівня деформацій
$П_3 = u/R$	Відносна конвергенція	Порівняння фактичних переміщень споруд різного масштабу
$П_4 = H/R$	Відносна глибина	Оцінка впливу вільної поверхні
$П_5 = \sigma_h/\sigma_v$	Нерівнокомпонентність поля напружень	Вплив орієнтації і співвідношення компонент напружень
$П_6 = p^w/\sigma_0$	Вплив води	Урахування ефективних напружень і водонасичення
$П_7 = k_s R/E_m$	Відносна жорсткість конструкції	Спільна робота масиву й несучої системи

Розрахунковий приклад часткової геомеханічної подібності

Для демонстрації підходу розглянемо умовну магістральну виробку глибокої шахти на глибині $H_1 = 600$ м. За $\gamma_1 = 25$ кН/м³ орієнтовне вертикальне напруження становить:

$$\sigma_{v1} = 25 \cdot 600 = 15000 \text{ кПа} = 15 \text{ Мпа}. \tag{10}$$

Нехай еквівалентна опірність породного масиву $S_{m1} = 18$ МПа, а модуль деформації $E_{m1} = 2500$ МПа. Тоді:

$$П_{1,1} = 15 / 18 = 0{,}83, \tag{11}$$

$$П_{2,1} = 15 / 2500 = 0{,}006. \tag{12}$$

Розглянемо неглибоку підземну споруду на глибині H_2 = 12 м у слабкому ґрунті з γ_2 = 19 кН/м³. Вертикальне напруження дорівнює:

$$\sigma_{v2} = 19 \cdot 12 = 228 \text{ кПа} = 0{,}228 \text{ Мпа}. \quad (13)$$

Для отримання такого самого значення $П_1$ = 0,83 еквівалентна опірність середовища повинна становити:

$$S_{m2} = 0{,}228 / 0{,}83 \approx 0{,}275 \text{ Мпа}. \quad (14)$$

Для рівності $П_2$ = 0,006 модуль деформації повинен бути:

$$E_{m2} = 0{,}228 / 0{,}006 \approx 38 \text{ Мпа}. \quad (15)$$

Отже, за певної комбінації параметрів слабкого ґрунту глибока виробка і неглибока споруда можуть бути близькими за двома визначальними відносними характеристиками – ступенем мобілізації міцності та деформативністю. Але перевірка критерію відносної глибини демонструє принципову відмінність. Якщо для шахтної виробки R_1 = 2,8 м, а для неглибокої споруди R_2 = 2,5 м, то:

$$H_1/R_1 = 600/2{,}8 \approx 214; \qquad H_2/R_2 = 12/2{,}5 = 4{,}8 \quad (16)$$

Таким чином, у першому випадку вплив вільної поверхні на локальне поле напружень практично не визначає поведінку виробки, тоді як у другому він є суттєвим. Це дозволяє говорити не про повну, а про часткову геомеханічну подібність.

Методика адаптації результатів шахтних досліджень. На основі запропонованих критеріїв послідовність адаптації результатів шахтних досліджень до нового підземного об’єкта може бути представлена такими етапами. Спочатку визначаються геометрія, глибина закладання та інженерно-геологічна будова. Далі встановлюються природний напружений стан, міцнісні та деформаційні характеристики, рівень ґрунтових вод і параметри можливого підкріплення. Після цього розраховуються безрозмірні критерії $П_1$–$П_7$. За базою шахтних спостережень або результатів чисельного моделювання добираються стани з близькими значеннями тих критеріїв, які визначають досліджуваний механізм. Встановлені для шахт закономірності використовуються як початкова гіпотеза, але кінцеве рішення перевіряється окремою моделлю нового об’єкта.

Важливо розділяти повну та часткову подібність. Для оцінки початку непружного деформування першочерговими можуть бути $П_1$ і $П_5$; для прогнозування конвергенції – $П_1$, $П_2$ і $П_4$; для системи «масив – несуча конструкція» додатково необхідний $П_7$; для водонасичених ґрунтів – $П_6$. Такий підхід не вимагає штучного забезпечення рівності всіх критеріїв, а дозволяє визначити, які саме фрагменти накопиченого шахтного досвіду є релевантними конкретній задачі (табл. 4).

Таблиця 4

Принципова схема адаптації результатів шахтної геомеханіки

Шахтні натурні дані	**Безрозмірні критерії**	**Відбір подібних станів**	**Модель нового об’єкта**	**Перевірка / моніторинг**
НДС, ЗНД, конвергенція, властивості масиву	$П_1$…$П_7$	Часткова геомеханічна подібність	Ґрунт + геометрія + конструкція	Уточнення параметрів

Запропонований підхід має методологічний характер і не замінює повноцінного геотехнічного проєктування. Найбільш суттєві обмеження пов'язані з різною природою скельних і дисперсних геоматеріалів. Для скельного масиву визначальними можуть бути тріщинуватість, структурні блоки, деструкція і післяпікова поведінка; для ґрунтів – ефективні напруження, дренування, поровий тиск, повзучість, консолідація та залежність міцності від траєкторії навантаження. Тому параметр S_m повинен визначатися через адекватну конкретному матеріалу модель міцності, а E_m – відповідно до діапазону деформацій і дренованого або недренованого стану.

Друге обмеження пов'язане з H/R. Велика глибина шахтної виробки створює умови, близькі до нескінченного середовища, тоді як неглибока споруда взаємодіє із земною поверхнею. Через це механізми руйнування можуть відрізнятися навіть за однакових $П_1$ і $П_2$. Саме тому критерій $П_4$ має використовуватися як фільтр, що не дозволяє некоректно переносити моделі глибоких виробок у випадки, де домінують механізми неглибокого обвалення або поверхневого осідання.

Третє обмеження стосується воєнного навантаження. Геомеханічні критерії, запропоновані у роботі, описують переважно квазістатичну взаємодію споруди з масивом. Дія вибухової хвилі, локальне проникнення боєприпасу, вібрації та імпульсні навантаження потребують окремого динамічного розрахунку. Підземне розміщення може зменшувати деякі зовнішні впливи, але не усуває потреби у спеціальному розрахунку захисних конструкцій за чинними нормами.

Отже, наукова цінність шахтного досвіду для критичної інфраструктури полягає передусім у методах опису довготривалої взаємодії «масив – порожнина – конструкція», прогнозуванні зон непружних деформацій, конвергенції та необхідності моніторингу, а не в безпосередньому копіюванні шахтного кріплення чи його параметрів.

Висновки.

1. Чинна нормативна база України прямо відносить вугільно-промисловий комплекс до паливно-енергетичного сектору критичної інфраструктури, а видобуток вугілля для ТЕС і ТЕЦ – до основних послуг відповідного підсектору. Тому забезпечення стійкості вугільних підприємств і системи їх підземних виробок має значення для стійкості енергетичної інфраструктури.

2. Відкриті дані ДТЕК за 2025–2026 рр. одночасно свідчать про значні інвестиції в підтримання шахт і про прямі воєнні ризики для вуглевидобувних підприємств та персоналу. Це посилює актуальність досліджень довготривалої стійкості підземної частини таких підприємств.

3. Використання підземного простору може бути одним із напрямів підвищення фізичної захищеності окремих технологічних систем критичної інфраструктури, однак повинно обґрунтовуватися окремо для кожного типу обладнання та враховувати технологічні, пожежні, евакуаційні, гідрогеологічні й економічні обмеження.

4. Пряме перенесення результатів глибоких шахт на неглибокі споруди є некоректним. Об'єктом адаптації мають бути закономірності напружено-деформованого стану і взаємодії системи «масив – підземна споруда», а не абсолютні величини навантажень або готові конструктивні рішення.

5. Для кількісного зіставлення запропоновано систему критеріїв $П_1$–$П_7$, що характеризують мобілізацію міцності, деформативність, відносну конвергенцію, відносну глибину, співвідношення компонент напружень, вплив порового тиску та відносну жорсткість несучої конструкції.

6. Розрахунковий приклад показує можливість часткової подібності глибокої виробки у міцнішій породі та неглибокої споруди у слабкому ґрунті за критеріями σ_0/S_m і σ_0/E_m, але також демонструє принципову відмінність за H/R. Отже, перспективним напрямом подальших досліджень є чисельна перевірка запропонованої системи критеріїв на серіях моделей з варіюванням глибини, міцності, деформативності, водонасичення і геометрії підземного об'єкта.

Перелік посилань

1. Про критичну інфраструктуру: Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX. База даних «Законодавство України». Верховна Рада України. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20
2. Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 09.10.2020 № 1109 (чинна редакція). База даних «Законодавство України». Верховна Рада України. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF .
3. Про реалізацію експериментального проекту щодо будівництва, ремонту та інших інженерно-технічних заходів із захисту об'єктів критичної інфраструктури паливно-енергетичного сектору критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2022 № 1482. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1482-2022-%D0%BF .
4. Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України. Звіт Агентства відновлення за ключовими напрямками. 12.06.2024. https://restoration.gov.ua/blog/zvit-agentstva-vidnovlennya-za-klyuchovymy-napryamkamy/ .
5. ДТЕК Енерго. ДТЕК Енерго у 2025 році спрямував 16 млрд грн на підтримку теплової генерації та вуглевидобутку в опалювальний сезон 2025/2026. 25.02.2026. Офіційний сайт ДТЕК Енерго. https://energo.dtek.com/media-center/press/dtek-energo-u-2025-rotsi-spryamuvav-16-mlrd-grn-na-pidtrimku-teplovoi-generatsii-ta-vuglevidobutku-v-opalyuvalniy-sezon-2025202/ .
6. ДТЕК Енерго. ДТЕК Енерго сплатив 10,6 млрд грн податків за перше півріччя 2026 року. 05.08.2026. Офіційний сайт ДТЕК Енерго (дані про 7,2 млрд грн інвестицій у першому півріччі 2026 р. https://energo.dtek.com/media-center/press/dtek-energo-splativ-106-mlrd-grn-podatkiv-za-pershe-pivrichchya-2026-roku/
7. DTEK. DTEK security guard killed, five injured in russian strike on mine. 04.07.2026. Official DTEK website https://dtek.com/en/media-center/news/dtek-security-guard-killed-five-injured-in-russian-strike-on-mine/ .
8. DTEK. DTEK declares Day of Mourning after russian drone attack on miners' bus kills 12 and injures 16. 02.02.2026. Official DTEK website https://dtek.com/en/media-center/news/dtek-declares-day-of-mourning-after-russian-drone-attack-on-miners-bus-kills-12-and-injures-/ .
9. Шашенко, О.М., Солодянкін, О.В., & Мартовицький, А.В. (2012). *Управління стійкістю протяжних виробок глибоких шахт: монографія*. Дніпропетровськ: ЛізуновПрес.
10. Шашенко, О.М., Солодянкін, О.В., & Смирнов, А.В. (2015). *Здимання порід підошви виробок вугільних шахт: монографія*. Дніпропетровськ: ЛізуновПрес.
11. Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2000). Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 15, No. 2. P. 187–213. https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00046-8
12. Su, Y., Su, Y., Zhao, M., & Vlachopoulos, N. (2021). Tunnel stability analysis in weak rocks using the convergence confinement method *Rock Mechanics and Rock Engineering.*Vol. 54. P. 559–582. https://doi.org/10.1007/s00603-020-02304-y .
13. Oke J., Vlachopoulos N., Diederichs M. (2018). Improvement to the convergence-confinement method: inclusion of support installation proximity and stiffness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. 51. P. 1495–1519. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1418-0 .

14. Terron-Almenara J., Panthi K.K. (2025). Analysis of plastic deformations for tunnel support design in weak rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. https://doi.org/10.1007/s00603-025-04545-1 .
15. Terron-Almenara J., Holter K.G., Høien A.H. (2023). A hybrid methodology of rock support design for poor ground conditions in hard rock tunnelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. 56. P. 4061–4088. https://doi.org/10.1007/s00603-023-03273-8 .
16. Terron-Almenara J. et al. (2025). Design of rock support in hard rock tunnelling subject to low overburden: a study based on the Hestnes railway tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineerin*g. Vol. 58, P. 11553–11578 https://doi.org/10.1007/s00603-024-04126-8 .
17. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. [Чинна редакція]. Єдина державна електронна система у сфері будівництва. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3225773063500990463

ABSTRACT

Purpose. To substantiate the use of established mine-geomechanics regularities as a scientific basis for assessing the stability of prospective underground and deep-buried critical infrastructure facilities.

Methods. The study combines analysis of regulations on critical infrastructure protection, synthesis of theoretical and field studies of geomechanical processes around deep mine workings, and dimensionless analysis. The comparison of underground facilities of different purposes, scales and depths accounts for the natural stress state, strength and deformation properties of the geomaterial, contour displacement, relative depth, stress-field non-uniformity, water saturation and supporting-structure stiffness.

Findings. A system of dimensionless criteria for partial geomechanical similarity between deep mine workings and shallow underground structures has been developed. The computational example establishes that facilities with substantially different absolute stresses and geomaterial properties may have similar degrees of strength mobilization σ_0/S_m and relative deformability σ_0/E_m. However, similarity in these criteria does not ensure complete geomechanical similarity: as H/R decreases, the influence of the free surface becomes increasingly important, so the deformation mechanism of a shallow structure differs from that of a deep excavation.

Originality. The dependence of partial geomechanical similarity on a set of dimensionless parameters characterizing strength mobilization, deformability, relative depth, stress-field non-uniformity, water saturation and relative stiffness of the supporting structure has been established. A regularity is identified whereby convergence of σ_0/S_m and σ_0/E_m for a deep excavation and a shallow structure indicates similarity in strength mobilization and deformability, whereas a substantial difference in H/R limits such transfer because of the increasing influence of the free surface.

Practical implementation. The criteria make it possible to identify which field observations and verified models of mining geomechanics can serve as an initial basis for stability analyses of new underground facilities. The approach does not replace site investigations, numerical modelling or code-based design of a specific structure.

Keywords: *critical infrastructure, coal mine, underground space, geomechanics, stress-strain state, weak ground, geomechanical similarity, underground structure stability.*

дата першого надходження статті до видання	13.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	14.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. O. Tymchenko, V. Yanko
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.