

УДК 622.831.31:622.112.3

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.250226.120.1216

ОБҐРУНТУВАННЯ ФОРМ І РОЗМІРІВ ЗОН ІНЕКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ В УМОВАХ АСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПІДЗЕМНІ СПОРУДИ

СЛАЩОВ І. М.^{1*}, *докт. техн. наук, с. н. с.*,

БЄЛІКОВ А. С.², *докт. техн. наук, проф.*,

КРИВЕНКО Є. В.³, *асп.*,

КОРОТАЄВ В. М.⁴, *канд. юр. наук*,

ДІГТЯР К. В.⁵, *асп.*

^{1*} Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 7460151, e-mail: OASlashchova@nas.gov.ua, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

² Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

³ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: 6211484@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-4110-268X

⁴ Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр Міністерства внутрішніх справ України, Україна, Тулик Будівельний, 1, Дніпро, 49033, тел. +38 (056) 732-16-93, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0269-0389

⁵ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-08-19, e-mail: degtyar.kirill@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-5568-1249

Анотація. Постановка проблеми. Для умов асиметричних навантажень на підземні споруди, які викликані нерівномірним ослабленням порід внаслідок обводнення та інших природних і техногенних факторів, питання обґрунтування раціональних форм і розмірів зон ін'єкційного зміцнення вимагають подальших комплексних досліджень, що об'єднують геомеханіку, матеріалознавство та методи оптимізації. **Мета дослідження.** Обґрунтування параметрів зон ін'єкційного зміцнення порід для підвищення рівня безпеки експлуатації підземних виробок та заглиблених споруд в умовах асиметричних навантажень на кріплення. **Методика.** Узагальнення даних з асиметричності навантажень на кріплення підземних споруд; методологія оцінки руйнування масиву порід; математичне моделювання методом скінченних елементів. **Результати.** Зміцнення порід навколо підземних виробок і заглиблених споруд дозволяє знизити ймовірність виникнення тріщин, запобігти розвитку деформацій і підвищити загальну стійкість об'єктів до впливу експлуатаційних і природних навантажень. Вимагають подальших досліджень питання обґрунтування раціональних форм та розмірів зон ін'єкційного зміцнення для умов асиметричних навантажень на підземні споруди, що викликані нерівномірним ослабленням порід внаслідок обводнення та інших природних і техногенних факторів. Визначені особливості процесу формування асиметричності навантажень на кріплення підземних споруд. Обґрунтована методика оцінки стану насиченого полімерами масиву порід та прогнозу його змін під впливом тих чи інших заходів зі зміцнення порід навколо підземної споруди. Встановлено, що зміцнення порід за рахунок ін'єкційних та інших технологій зміцнення ефективно компенсує недоліки кріплень без значного збільшення капітальних витрат. Крім того, застосування різних конфігурацій та схем розташування зон зміцнення дозволяє гнучко адаптуватися до конкретних геологічних умов, перерозподіляти напруження в породах, знижувати їх концентрації в потенційно небезпечних зонах, запобігати локальним обваланням, деформаціям та водопритокам, що забезпечує довготривале безпечне використання підземних споруд. Для умов нерівномірних навантажень на кріплення запропонована асиметрична форма зміцненої зони, яка може бути використана як резерв підвищення стійкості підземної споруди. Встановлено, що еліпсоподібна форма зміцненої зони, як елемент управління гірським тиском, забезпечує підвищення стійкості підземної споруди за рахунок зменшення на 10–35 % зони непружних деформацій та зміщення вглиб на 0,5–3,0 м асиметричної зони опорного тиску. Зміщення покрівлі підземної виробки знижуються на 6–13 % від загальних зміщень, а підосви – на 7–23 %. **Наукова новизна.** Вперше для підвищення рівня безпеки експлуатації підземних виробок та заглиблених споруд в умовах асиметричних навантажень на кріплення встановлені закономірності змін максимальних головних напружень при використанні різних еліпсоподібних форм зон ін'єкційного

зміцнення порід. **Практична значимість.** Запропоновані конфігурації зон ін'єкційного зміцнення знижують концентрації напружень у породах, що дозволяє запобігати раптовим деформаціям кріплень і забезпечувати довготривале безпечне використання підземних споруд.

Ключові слова: безпека експлуатації підземних виробок; заглиблені споруди; асиметричні навантаження на кріплення; форма зон ін'єкційного зміцнення; напружено-деформований стан порід

JUSTIFICATION OF THE FORMS AND DIMENSIONS OF INJECTION HARDENING ZONES UNDER CONDITIONS OF ASYMMETRICAL LOADS ON UNDERGROUND STRUCTURES

SLASHCHOV I.M.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res.,
BIELIKOV A.S.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
KRYVENKO Yev.V.³, Postgrad. Stud.,
KOROTAIEV V.M.⁴, Ph.D. (Juridical),
DIHTIAR K.V.⁵, Postgrad. Stud.

^{1*} Department of Mining at Great Depths, The M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Simferopolska Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2432-9092

² Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

³ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: 6211484@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-4110-268X

⁴ Dnipropetrovsk Scientific Research Forensic Center of the MIA (Ministry of Internal Affairs) of Ukraine, 1, Construction Dead, Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 732-16-93, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0269-0389

⁵ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 452-08-19, e-mail: degtyar.kirill@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-5568-1249

Abstract. Problem statement. For conditions of asymmetric loads on underground structures caused by uneven weakening of rocks due to flooding and other natural and man-made factors, issues of substantiating rational forms and sizes of injection hardening zones require further comprehensive studies combining geomechanics, materials science and optimization methods. **Purpose of the study.** Justification of the parameters of injection rock hardening zones to improve the safety level of underground workings and buried structures under conditions of asymmetric loads on the support. **Methods.** Generalization of data on the asymmetry of loads on the support of underground structures; methodology for assessing the rock massif destruction; mathematical modeling using the finite element method. **Research results.** Hardening of rocks around underground workings and buried structures allows to reduce the probability of cracks, prevent the development of deformations and increase the overall resistance of objects to the impact of operational and natural loads. The issue of substantiation of rational forms and sizes of injection hardening zones for conditions of asymmetric loads on underground structures which are caused by uneven weakening of rocks due to flooding and other natural and man-made factors requires further research. The features of the formation process of loads asymmetry on the support of the underground structures are determined. The method of assessing the state of the polymer-saturated rock massif and forecasting its changes under the influence of certain measures to strengthen the rocks around the underground structure is substantiated. It has been established that rock hardening by means of injection and other hardening technologies allows for effective compensation of supporting deficiencies without a significant increase in capital expenditures. In addition, the use of various configurations and arrangement schemes of hardening zones allows for flexible adaptation to specific geological conditions, redistribution of stresses in rocks, reduction of their concentrations in potentially hazardous zones, prevention of local collapses, deformations and water inflows, which ensures long-term safe use of underground structures. For conditions of uneven loads on the supports, an asymmetric shape of the hard-ened zone is proposed, which can be used as a reserve for increasing the stability of the underground structure. It is established that the nearly elliptical shape of the hardened zone as an element of rock pressure control ensures an increase in the stability of the underground structure due to a 10–35 % reduction in the inelastic deformation zone and a 0,5–3,0 m deep displacement of the asymmetric support pressure zone. The displacement of the roof of the underground workings is reduced by 6–13 % of the total displacements, and the workings floor by 7–23 %. **Scientific novelty.** For the first time, in order to increase the level of safety in the operation of

underground workings and buried structures under conditions of asymmetric loads on the support, patterns of changes in maximum principal stresses have been established when using various nearly elliptical shape of injection rock hardening zones. **Practical significance.** The proposed configurations of injection hardening zones reduce stress concentrations in rocks, which helps prevent sudden deformations of supports and ensure long-term safe use of underground structures.

Keywords: *safety of underground workings; buried structures; asymmetric loads on supports; shape of injection hardening zones; stress-strain state of rocks*

Постановка проблеми. Зміцнення порід навколо підземних виробок і заглиблених споруд дозволяє знизити ймовірність виникнення тріщин, запобігти розвитку деформацій і підвищити загальну стійкість об'єктів до впливу експлуатаційних і природних навантажень. Підкреслимо, що вимоги до довговічності та експлуатаційної безпеки інфраструктурних та промислових споруд постійно зростають [1].

Асиметричні навантаження на підземні споруди виникають внаслідок нерівномірного ослаблення порід, яке може бути викликане природними процесами, наприклад, обводненням або розміцненням порід. Важливу роль у нерівномірності навантажень вносять техногенні чинники – вібрації устаткування, динамічні впливи вибухових робіт чи руйнування суміжних виробок. В результаті виникають деформації, тріщини та обвалення, це ставить під загрозу безпеку і довговічність споруд. Аналіз особливостей деформування порід і втрати стійкості інженерних споруд підтверджує, що традиційні системи кріплення в умовах асиметричності навантажень і високої тріщинуватості порід не завжди забезпечують необхідний рівень стійкості.

Зміцнення порід являє собою технологію заповнення порожнин, пор і тріщин спеціальними складами (цементними, полімерними або хімічними), здатними до затвердіння. В результаті полімеризації розчину формується каркас, який підвищує міцність і водонепроникність порід, що сприяє зниженню деформацій порід, зменшує фільтрацію води і підтоплення споруд [2–4]. Параметрами зміцнення є змінені фізико-механічні характеристики

порід після застосування технології зміцнення (залежать від обраного способу зміцнення), а також форма, розміри та локалізація зміцнених зон щодо контуру споруди [5]. Основними характеристиками, що визначають ефективність зміцнення, є досягнута міцність і підвищення несучої здатності порід, які безпосередньо впливають на стійкість споруди. У той же час відмінності в складі порід, тріщинуватість, наявність водоносних джерел і динамічний характер навантажень, вимагають індивідуального підходу до вибору форми і розмірів зміцнених зон, наприклад, при поступовому посиленні нерівномірності деформацій через тривале обводнення [4; 6].

Існуючі методи проектування ін'єкційного зміцнення часто виявляються недостатньо гнучкими. Вони традиційно орієнтовані на симетричні навантаження і не враховують локальні аномалії або несиметричні деформації порід. Це призводить або до надмірного зміцнення та збільшення вартості підтримання виробки в експлуатаційному стані на 20–30 %, або до недостатнього зміцнення та ризику обвалів. Наприклад, у практиці будівництва метрополітену відомі випадки, коли недооцінка асиметрії навантажень через обводнення однієї зі стін тунелю призводила до втрати опори та необхідності масштабного ремонту [7]. Тому для умов асиметричних навантажень на підземні споруди, які викликані нерівномірним ослабленням порід внаслідок обводнення та інших природних і техногенних факторів, питання обґрунтування раціональних форм і розмірів зон ін'єкційного зміцнення вимагають подальших комплексних досліджень, що об'єднують геомеханіку,

матеріалознавство та методи оптимізації. Перспективним напрямом є застосування чисельних моделей [8; 9], що враховують непружні деформації, асиметрію навантажень та дані моніторингу.

Мета дослідження – обґрунтування параметрів зон ін'єкційного зміцнення порід для підвищення рівня безпеки експлуатації підземних виробок та заглиблених споруд в умовах асиметричних навантажень на кріплення.

Методи дослідження. Узагальнення даних з асиметричності навантажень на кріплення підземних споруд; методологія оцінки руйнування геосередовища; математичне моделювання методом скінченних елементів (МСЕ).

Результати досліджень.

1. Процес формування асиметричності навантажень на кріплення підземних споруд.

Розглянемо причини формування асиметричності навантажень на кріплення підземних та заглиблених споруд. Спочатку при будівництві споруд на кріплення, що утримує породи від обвалення, діє відносно рівномірне навантаження, обумовлене силами гірського тиску. У нормальних умовах, коли породи стійкі та їх структура не порушена, тиск на кріплення розподіляється рівномірно по всій площі контактної поверхні. Такий рівномірний розподіл навантаження дозволяє забезпечити надійне кріплення споруди і мінімізувати деформації. Однак, при впливі додаткових негативних факторів, пов'язаних з обводненнями, вибуховими динамічними впливами або вібраціями, породи послаблюються, їх структурна цілісність порушується. Зокрема, вплив води значно знижує міцність порід внаслідок розмиву розчинних глинистих мінералів, а також підвищує гідростатичний тиск внаслідок заповнення водою пор і тріщин. Вибухи та вібраційні впливи викликають локальні руйнування порід, порушують їх внутрішню структуру та знижують міцність.

Ослаблення порід призводить до зміни напрямку та величини навантажень, що викликає перерозподіл тиску на кріплення. У місцях, де породи втрачають свою міцність, оскільки вони вже не можуть витримувати колишній тиск, навантаження на кріплення починають зростати, напруження перерозподіляються. На ділянках масиву порід, де відбулися деформації навколо виробки, напруження знижуються. На сусідніх ділянках, навпаки, напруження збільшуються. Внаслідок цього процесу навантаження на кріплення кардинально змінюються, стають нерівномірними та асиметричними.

Схили на земній поверхні також створюють нерівномірний розподіл вертикальних та горизонтальних напружень в масиві порід, що призводить до асиметричного навантаження на заглиблені виробки. Поблизу укосів і схилів збільшується горизонтальна складова напружень з одного боку, а з протилежної – знижується. Зі збільшенням кута нахилу схилу асиметричність напруженого стану навколо підземної виробки посилюється. Чим крутіше схил, тим більше горизонтальна складова навантаження з боку схилу і тим вищий градієнт напружень в масиві порід. Особливо небезпечні потенційні зсувні ділянки, де виникають додаткові горизонтальні та дотичні напруження, спрямовані у бік зсувного руху. Якщо є небезпека активізації зсуву внаслідок зовнішніх динамічних впливів (вибухів, землетрусів), то потрібно зміцнення не тільки схилів, а й кріплення підземних споруд.

Таким чином, на певних ділянках підземних споруд навантаження значно зростають, оскільки порушується баланс сил, що діють на породи. В результаті збільшується асиметричність зміщень контуру підземних і заглиблених споруд. Кріплення інтенсивно деформуються і можуть бути зруйновані (у тому числі і раптово), якщо деформації перевищують

допустимі межі. Крім того, при руйнуванні порід навколо споруди збільшується їх тріщинуватість, суттєво зростає проникність та ризики прориву води. Очевидно, що комплекс практичних заходів щодо безпечного підтримання підземних виробок, у тому числі із застосуванням технологій зміцнення порід, повинен розроблятися з урахуванням протидії цим негативним процесам.

2. Методологія оцінки процесів руйнування геосередовища в умовах його зміцнення полімерами.

Використання способів та засобів з підвищення стійкості підземних споруд, які пов'язані зі зміцненням приконтурної зони порід, потребує завчасної оцінки стану геосередовища при насиченні його полімерами та прогнозу його змін під впливом тих чи інших технологічних заходів. В свою чергу, вивчення і аналіз напружено-деформованого стану (НДС) масиву порід незалежно від складності та багатофакторності можуть бути здійснені на імітаційній моделі геосередовища.

Сучасна наука трактує імітаційну модель як цифрову копію (цифровий двійник) геосередовища, який дозволяє проводити безпечні чисельні експерименти при зміні параметрів та процесів. Процеси моделюються за допомогою спеціального програмного забезпечення з використанням необхідних вхідних даних [10; 11]. Для оцінки стійкості геотехнічних об'єктів, до яких, у тому числі, відносяться підземні виробки та заглиблені споруди, цифрова копія створюється для породного масиву, як середовища, де розташовані виробки, і моделюються супутні процеси, що впливають на зміну стану середовища (деформаційні, газодинамічні,

гідрогеологічні та інші процеси). Такі моделі досить складні і, певною мірою, ідеалізовані (наприклад, пружні моделі середовища). Водночас сучасні інформаційні технології та методи їх реалізації удосконалювалися у багатьох роботах, наприклад, [11; 12]. Особливості побудови цифрових копій досліджуваних об'єктів для умов зміцненого полімерами масиву гірських порід також безумовно потребують подальшого вдосконалення, а їх застосування повинно відбуватися згідно відповідної методики.

Імітаційне моделювання геосередовища неможливо реалізувати тільки точними аналітичними методами, які часто приводять до математично некоректних результатів, оскільки ріст деформації при розміщенні порід супроводжується зменшенням напруження по абсолютній величині, а завдання коефіцієнтів структурного ослаблення в аналітичних розрахунках досить проблематичне або зовсім неможливе. У таких умовах кількісний аналіз напружень і деформацій можна коректно проводити за допомогою імітаційних геомеханічних моделей, що базуються на суміщенні принципів механіки суцільних середовищ і теорії граничних станів з методом початкових напружень і алгоритмами його реалізації.

У загальному виді, послідовність рішення задачі полягає в: розрахунку напружень і деформацій до і після насичення полімерами геосередовища навколо гірничої виробки, виявленні зон непружних деформацій, аналізі геомеханічних процесів і, у підсумку, оцінці змін НДС породного масиву під впливом зонального зміцнення гірських порід (рис. 1).



Рис. 1. Структурна схема методики імітаційного моделювання процесів руйнування геосередовища в умовах його зміцнення полімерами

Основні етапи методики імітаційного моделювання:

- коректне визначення необхідних для розрахунків фізико-механічних властивостей гірських порід, побудова структурної геологічної схеми (потужність і послідовність залягання шарів);

- розробка геомеханічної розрахункової схеми досліджуваної ділянки масиву на базі структурної геологічної схеми;

- розробка геомеханічної моделі, яка включає весь комплекс даних про вхідний напружений стан, властивості та структурні особливості порід, а також дані про параметри підземних споруд і

алгоритми реалізації непружної деформаційної моделі середовища. У процесі розробки виділяється літологія порід, виконується дискретизація досліджуваної області, установлюються жорсткі зв'язки і граничні умови, визначається вага та фізико-механічні властивості порід;

- аналіз інформативних параметрів НДС порід, прогноз стану геосередовища та його змін під впливом насичення полімерами.

Математична модель відповідає умові спільності деформацій, яка у суцільному середовищі гарантує, що поле деформацій безперервне та визначає поле переміщень (без розривів). Вони забезпечують

фізичну реалізованість деформованого стану, для двовимірної моделі:

$$\varepsilon_x = \frac{du_x}{dx}, \varepsilon_y = \frac{du_y}{dy}, \gamma_{xy} = \frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx}, \quad (1)$$

де u_x, u_y – осьові переміщення; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$, – повні відносні деформації за координатними осями x, y ; γ_{xy} – деформації зсуву.

У разі ізотропного лінійно пружного матеріалу взаємозв'язок між напруженнями та деформаціями виражається у вигляді математичного співвідношення:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{du_x}{dx} + \mu \frac{du_y}{dy} \right);$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{du_y}{dy} + \mu \frac{du_x}{dx} \right), \quad (2)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності, Па.

Умова сумісності напружень і деформацій:

$$\frac{d^2(\sigma_x - \mu\sigma_y)}{dx^2} + \frac{d^2(\sigma_y - \mu\sigma_x)}{dy^2} =$$

$$= \frac{2(1+\mu)d^2\tau_{xy}}{dxdy}, \quad (3)$$

де τ_{xy} – дотичні напруження; σ_x, σ_y – осьові нормальні напруження.

Ефективне моделювання процесів непружного деформування та руйнування середовища зі змінними властивостями вимагає інтеграції методу скінченних елементів з методикою реалізації методу початкових напружень. Фактичні максимальні і мінімальні головні напруження при знеміцненні порід:

$$\sigma_1 = [\sigma_1] - \left(\frac{\varepsilon_1 - [\varepsilon_1]}{(k-1)[\varepsilon_1]} \right) ([\sigma_1] - \sigma_1^{rs}) \quad (4)$$

$$\sigma_3 = \frac{E_i(\varepsilon_1 + \varepsilon_1 \operatorname{ctg} \xi) + 2\tau_0 \operatorname{ctg}(45 - \varphi/2)(\mu - 1)}{(1 - \mu)(1 + \operatorname{ctg} \xi)}$$

де $[\sigma_1], \sigma_1^{rs}, [\varepsilon_1], \varepsilon_1^{rs}$ – максимальні головні напруження і деформації, граничні і залишкові відповідно (Па); k – коефіцієнт, що характеризує крихкість породи; τ_0 – міцність на зсув, Па; $\operatorname{ctg} \xi$ – параметр, що визначає закон пластичної течії; φ – кут внутрішнього тертя, град.

Математичне моделювання виконано на програмному комплексі GEO-RS[®], який застосовується для аналізу стійкості оголень масиву порід та оперативного прогнозу геомеханічних процесів з використанням МСЕ [7]. Програмне забезпечення забезпечує можливість визначення геометричних та енергетичних параметрів зон руйнування порід (довжини, об'єму, потенційної енергії, інтенсивності деформування, зон зародження руйнувань), систем техногенних магістральних тріщин, високу точність результатів.

3. Дослідження форм і розмірів зон ін'єкційного зміцнення.

Різні форми зон зміцнення, такі як еліпсоподібні, розширені або асиметричні, сприяють тому, щоб напруження перерозподілялися рівномірно і не створювали локальних піків поблизу боків виробки. Завдяки цьому знижується ризик руйнувань, спричинених концентрацією напружень в обмежених зонах, які є найбільш вразливими.

Технології зміцнення з використанням ін'єкційних матеріалів, анкерів або механічного зміцнення доповнюють адаптивний підхід [5] за рахунок створення більш міцних і стійких областей в породах, де очікуються найбільші руйнування. Ці технології дозволяють змінювати механічні властивості порід, покращуючи їх здатність витримувати навантаження. Крім того, сучасне обладнання для спорудження зміцнених зон дає можливість точного контролю їх розмірів, форми та глибини, що дозволяє уникати помилок та неточностей під час проектування. При використанні таких способів підвищення стійкості

передбачається створення навколо виробки породної зони підвищеної міцності, яка повністю або частково сприймає навантаження від сил гірського тиску.

Фізико-механічні властивості порід навколо підземної виробки встановлювалися на основі усереднених даних опору порід одноосовому стисненню $[\sigma]$ для аргіліту (модуль пружності $E = 4,0 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$, об'ємна вага $\gamma = 2,4$ т/м³, межа міцності при зсуві $\tau_0 = 10,0$ МПа, кут внутрішнього тертя $\phi = 35$ град.).

Враховувався коефіцієнт структурного ослаблення [13–15], який змінювався залежно від тріщинуватості та обводненості порід відповідно до таблиці. У вузлах на контурі підземної виробки було задано нормальне розподілене навантаження, що моделювало відсіч стандартного кріплення (120 кН). Розподілене навантаження, розраховане на 1 м периметра – 0,015 МН/м. Верхня межа розрахункової схеми встановлювалася рухомою у вертикальному напрямку, а нижня та бічні – фіксованими у двох напрямках.

Таблиця

Властивості порід у зонах ін'єкційного зміцнення навколо підземної виробки

Порода, матеріал	Межа міцності на стиснення $[\sigma]$, МПа	Коефіцієнт зниження міцності			
		Тріщинуватість		Водопритлив	
		Тріщинуваті	Сильнотріщинуваті	Сильна крапель	Крапель і струмені
Аргіліт	34,0	0,7	0,5	0,9	0,8
Полімери:					
– MC Montan Injekt FN	75,0	1,0	1,0	1,0	1,0
– Carbo Pur WF	80,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Звісно, що стійкість підземної споруди визначається за величинами зміщень різних ділянок контуру виробки (поточних і прогнозованих на певний час) на які впливають локалізація тріщинуватих і обводнених зон, орієнтація домінуючих зміщень та інші параметри. У кінцевому підсумку, проводиться оцінка стійкості об'єкта в цілому за гранично допустимими зміщеннями, які регламентуються в залежності від типу споруди та її призначення, способів охорони та підтримання. Наприклад, для податливих кріплень втрата стійкості визначається по вичерпанню конструктивної податливості кріплення, коли зміщення покрівлі перевищують 600–1 200 мм.

Параметрами способів зміцнення вважають ширину зони зміцнення та коефіцієнт підвищення міцності порід k . Зазвичай питання підвищення стійкості підземних споруд, що підтримуються такими способами, вирішуються шляхом аналізу зазначених параметрів при їх

рівній ширині в покрівлі, підшві або боках виробки, тобто форма зміцнення має форму, близьку до кола. Однак при асиметричних навантаженнях форму зміцненої зони логічно створювати близькою до еліпса (рис. 2).

На наш погляд, кругова форма має суттєві недоліки, які пов'язані з тим, що навколо виробки довільної форми по периметру контуру в різних радіальних напрямках напружено-деформований стан порід суттєво різниться. У такому разі використання будь-якого зі способів зміцнення в локальній зоні приконтурної частини виробки призводить до зміни загальної картини напружень, які, у свою чергу, змінюються і впливають як на зону зміцнення, так і на поруч розташовані ділянки масиву. Тому зону зміцнення логічно розглядати комплексно і представляти її не тільки шириною (або радіусом кола), але і її більш складною конфігурацією (у нашому випадку близькою до еліпса) з відповідними параметрами.

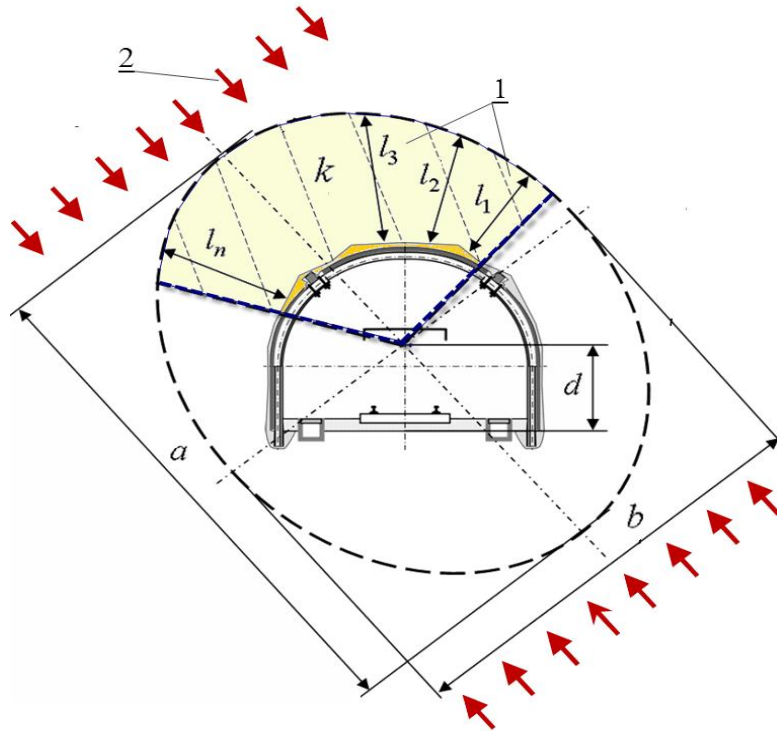


Рис. 2. Основні параметри еліпсоподібної зони зміцнення для умов нерівномірних навантажень на кріплення підземних і заглиблених споруд :
1 – сектор зони зміцнення; 2 – орієнтація домінуючих деформацій

Внаслідок того, що найбільшу стійкість в умовах нерівномірних навантажень представляє еліпсоподібна форма зміцненої зони, вона прийнята як базова конфігурація. Очевидно, що такого типу несиметрична породна «конструкція» матиме найбільшу опірність у напрямку великої осі еліпса, яка має бути спрямована за напрямом максимальних головних деформацій. У цьому випадку параметри зміцненої зони можуть бути представлені у вигляді

геометричних характеристик еліпса із зазначенням довжини його великої a та малої b осей, які орієнтовані у просторі під певним кутом, а також залежності кута нахилу великої осі від напрямку або характеру деформацій порід.

Зони зміцнення були представлені еліпсоподібними секторами (рис. 2). Геометричні розміри моделі описані параметрами, що характеризують ширину зони зміцнення в різних радіальних напрямках ($l_1, l_2, \dots, l_n$).

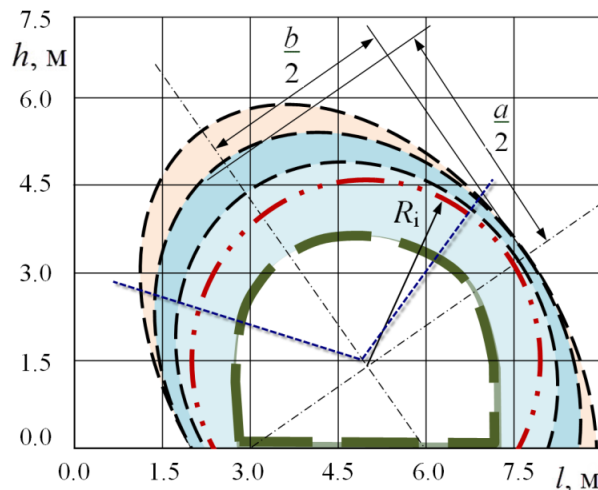


Рис. 3. Досліджувані форми еліпсоподібних секторів зони зміцнення

Дослідження перерозподілу напружень проведено для умов формування нерівномірного гірського тиску на кріплення для зон зміцнення, представлених еліпсоподібними формами (рис. 3). Геометричні параметри

еліпсоподібних форм зміцнених зон були встановлені перерахунком з умови рівності об'ємів зміцнення відносно кругової форми (для адекватності порівняння результатів).

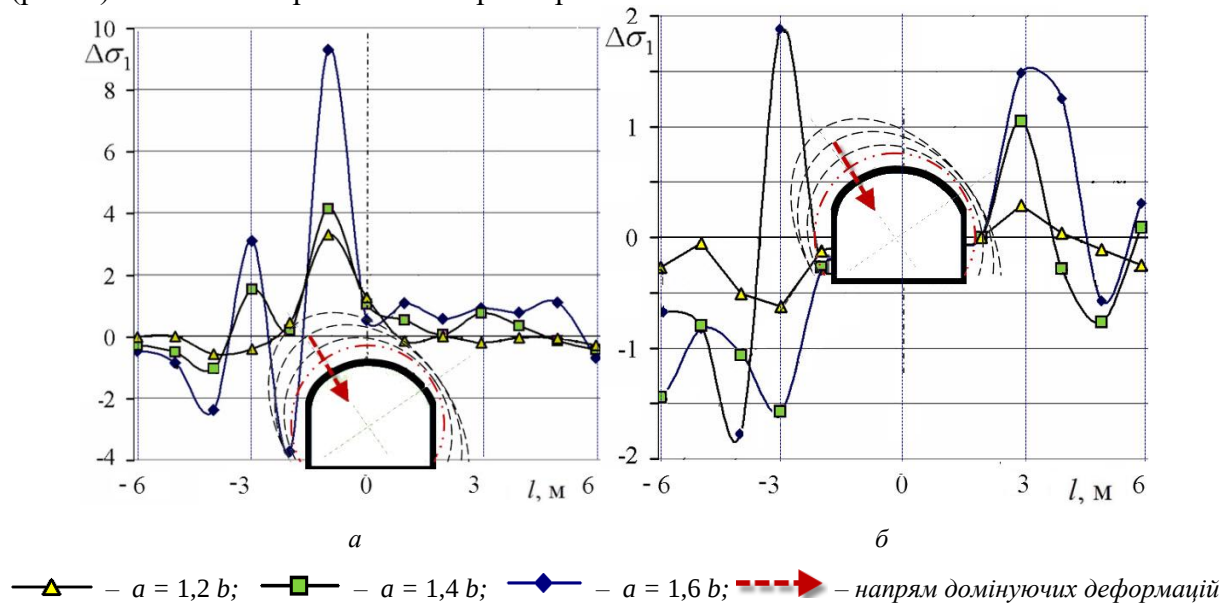


Рис. 4. Результати порівняння максимальних головних напружень при використанні різних еліпсоподібних σ_1^{ell} і кругової σ_1^{cir} форм зміцнених зон (зміни напружень $\Delta\sigma_1 = \sigma_1^{\text{cir}} - \sigma_1^{\text{ell}}$ в МПа): а – на відстані 0,7 м у покрівлі над підземною спорудою; б – у боках підземної споруди

Механічна реакція оточуючих виробку порід на зміну форми зміцненої зони проаналізована по зміні значень максимальних головних напружень, які визначені за горизонтальними перерізами в боках і у покрівлі над виробкою (рис. 4). Графіки, побудовані по різниці максимальних напружень в приконтурному масиві для кожного з еліпсоподібних секторів зон зміцнення і напружень при круговій формі зміцнення. У всіх випадках використання еліпсоподібних зон відзначається позитивний ефект. З боку виробки, де спостерігаються максимальні деформації порід, при зміні еліпсоподібної форми з параметрів $a/b = 1,2$ до $a/b = 1,6$ напруження у безпосередній покрівлі знижуються на 3–9 МПа, у вищележачій покрівлі на 0,5–1,5 МПа. Найбільший ефект досягається в основній покрівлі при $a/b = 1,6$. Реакція порід на зміни форми зміцненої зони у вищележачій покрівлі більш згладжена, ніж у безпосередньої покрівлі, напруження змінюються на

менш значну величину до 1,2 МПа. Тобто по напрямку максимальних деформацій напружено-деформований стан порід покращується, області високих напружень переміщуються до віддалених частин масиву, де вони поглинаються без значних наслідків для стійкості виробки.

У боках виробки при параметрі $a/b = 1,4$ напруження знижуються на 2,0 МПа, тоді як в інших випадках відбувається їх незначне збільшення, пов'язане з більш рівномірним перерозподілом.

Більш детально проведена порівняльна оцінка максимальних головних напружень в масиві для кругової та асиметричної еліпсоподібної ($a/b = 1,2$) форм зон зміцнення. Встановлено, що зміна контуру зони зміцнення тягне за собою ефект згладжування напружень по всіх напрямках. При стандартній круговій формі зони зміцнення спостерігається інтенсивна хвилюподібна зміна напружень. Це пов'язано з тим, що породи при переході в пластичний стан

розвантажуються, внаслідок чого відбуваються розшарування і хвиля опорного тиску переміщується вглиб масиву. При використанні еліпсоподібної зони зміцнення напруження більш згладжені і породи більшою мірою самі сприймають навантаження. Тому така конфігурація зміцненої зони є кращою.

В результаті моделювання було встановлено, що зміна форми зміцненої зони призводить до перерозподілу поля напружень і деформацій, при цьому опорний тиск дещо зміщується у бік від вертикальної осі виробки (рис. 4). Площа зони непружних деформацій за рахунок зміни форми зміцненої зони знижується до 35 %. В результаті чого зміщення покрівлі виробки знижуються на 6–13 %, а підосви до 25 %. Для умов нерівномірних навантажень на кріплення заглиблених споруд асиметрична форма укріпленої зони може бути використана як резерв підвищення стійкості. Еліпсоподібна форма зміцненої зони, як елемент управління гірським тиском, забезпечує підвищення стійкості підземної споруди за рахунок зменшення на 10–35 % зони непружних деформацій та зміщення вглиб на 0,5–3 м асиметричної зони опорного тиску. При цьому стійкість підземної споруди може бути підвищена більш ніж на 30 % у разі застосування способів зміцнення, які відповідають навантаженням, що діють у породах.

Зони зміцнення у вигляді еліпсоподібних або асиметричних форм сприяють тому, щоб напруження перерозподілялися рівномірно і не створювали локальних максимумів поблизу контуру виробки. Завдяки цьому знижується ризик руйнувань, який викликаний концентрацією напружень у локальних зонах, прилеглих до кутів і сполучень заглиблених споруд. Наприклад, еліпсоподібні зони зміцнення

сприяють ефективному переміщенню області високих напружень у більш віддалені частини масиву, де їх енергія поглинається без значних наслідків для стійкості виробки.

Висновки

1. Зміцнення порід за рахунок ін'єкційних та інших технологій зміцнення компенсує недоліки стандартного кріплення без значного збільшення капітальних витрат. Застосування різних конфігурацій і схем розташування зон зміцнення дозволяє гнучко адаптуватися до конкретних гірничо-геологічних умов, перерозподіляти напруження в породах, знижувати їх концентрації в потенційно небезпечних зонах, запобігати локальним обваленням і деформаціям, а також забезпечувати довготривале безпечне використання підземних споруд.

2. Вперше для підвищенні рівня безпеки експлуатації підземних виробок та заглиблених споруд в умовах асиметричних навантажень на кріплення встановлені закономірності змін максимальних головних напружень при використанні різних еліпсоподібних форм зон ін'єкційного зміцнення порід.

3. Встановлено, що для умов нерівномірних навантажень на кріплення асиметрична форма зміцненої зони може бути використана як резерв підвищення стійкості підземної споруди. Еліпсоподібна форма зміцненої зони, як елемент управління гірським тиском, забезпечує підвищення стійкості підземної споруди за рахунок зменшення на 10–35 % зони непружних деформацій та зміщення вглиб на 0,5–3,0 м асиметричної зони опорного тиску. При еліпсоподібній зоні зміцнення зміщення покрівлі виробки знижуються на 6–13 % від загальних зміщень, а підосви – на 7–23 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhihang Ye., Kevin G., Halil S., Gang W., De-Cheng F. State-of-the-art review and investigation of structural stability in multi-story modular buildings. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 33. P. 101844.

2. Krukovskiy O., Krukovska V., Bulich Y., Demchenko S., Konstantynova I. Rock bolt and frame support of mine workings with a compound cross-section: Collective refuge chambers for mine workers. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. Vol. 18. Pp. 28–37.
3. Amanzholov D., Bakhranov B., Bakytbek A. Rock exfoliation in the unstable formations during underground mine working driving and selection of efficient adhesive compositions for strengthening. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. Vol. 18. Pp. 104–113.
4. Slashchova O. Water effect on the rocks and mine roadways stability. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. P. 00092.
5. Slashchov I. M., Slashchova O. A., Seleznev A. M., Shmyhlov V. V., Kryvenko Ye. V., Brizheniuk V. S. Justification of the parameters of injection rock hardening zones around mining workings and buried structures of critical infrastructure. *Geo-Technical Mechanics*. 2024. № 170. Pp. 165–180.
6. Бєліков А. С., Слещова О. А., Когтева О. П., Яланський О. А. Особливості визначення ризиків і контролю втрати стійкості підземних виробок в умовах мінливості властивостей гірських порід. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 5 (017). С. 44–54.
7. Serinaldi F., Kilsby C. G. Understanding Persistence to Avoid Underestimation of Collective Flood Risk. *Water*. 2016. № 8 (4). P. 152.
8. Yalanskyi O. A., Bielikov A. S., Barabanov S. S., Slashchova O. A. and Ikonnikov M. Yu. Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings. *Journal of Donetsk Mining Institute*. 2023. № 2 (53). Pp. 101–109.
9. Бєліков А. С., Яланський О. А., Барабанов С. С., Слещова О. А., Іконніков М. Ю. Розробка моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 3 (021). С. 7–18.
10. Булат А. Ф., Слещов І. М., Слещова О. А. Методи оцінки взаємопов'язаних геомеханічних та газодинамічних процесів у гірському масиві для систем контролю робочого середовища шахт. *Геотехнічна механіка*. 2017. № 134. С. 3–21.
11. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I., Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. P. 012010.
12. Булат А. Ф., Слещова О. А., Слещов І. М., Стаднійчук М. М. Обґрунтування методів контролю геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах. *Геотехнічна механіка*. 2020. № 150. С. 176–187.
13. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. [Чинний з 2009-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 5 с.
14. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Butterworth-Heinemann. 2013. 7th ed. 756 p. ISBN 008095135X.
15. Усаченко Б. М. Властивості порід та стійкість гірничих виробок. Київ : Наукова думка, 1979. 136 с.

REFERENCES

1. Zhihang Ye., Kevin G., Halil S., Gang W. and De-Cheng F. State-of-the-art review and investigation of structural stability in multi-story modular buildings, *Journal of Building Engineering*. 2021, vol. 33, p. 101844. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101844>
2. Krukovskiy O., Krukovska V., Bulich Y., Demchenko S. and Konstantynova I. Rock bolt and frame support of mine workings with a compound cross-section: Collective refuge chambers for mine workers. *Mining of Mineral Deposits*. 2024, vol. 18, pp. 28–37. URL: <https://doi.org/10.33271/mining18.02.028>
3. Amanzholov D., Bakhranov B. and Bakytbek A. Rock exfoliation in the unstable formations during underground mine working driving and selection of efficient adhesive compositions for strengthening. *Mining of Mineral Deposits*. 2024, vol. 18, pp. 104–113. URL: <https://doi.org/10.33271/mining 18.03.104>
4. Slashchova O. Water effect on the rocks and mine roadways stability. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 109, p. 00092. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900092>
5. Slashchov I.M., Slashchova O.A., Seleznev A.M., Shmyhlov V.V., Kryvenko Ye.V. and Brizheniuk V.S. Justification of the parameters of injection rock hardening zones around mining workings and buried structures of critical infrastructure. *Geo-Technical Mechanics*. 2024, no. 170, pp. 165–180. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2024.170.165>
6. Bielikov A.S., Slashchova O.A., Kohtieva O.P. and Yalanskyi O.A. *Osoblyvosti vyznachennya ryzykiv i kontrolyu vtraty stiykosti pidzemnykh vyrobok v umovakh minlyvosti vlastyvestey hirs'kykh porid* [Features of risk determination and control of the underground facilities stability loss under conditions of rocks properties variation]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and

Architecture]. 2023, no. 5 (017), pp. 44–54. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.44.992> (in Ukrainian).

7. Serinaldi F. and Kilsby C.G. Understanding Persistence to Avoid Underestimation of Collective Flood Risk. *Water*. 2016, no. 8 (4), p. 152. URL: <https://doi.org/10.3390/w8040152>

8. Yalanskyi O.A., Bielikov A.S., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings. *Journal of Donetsk Mining Institute*. 2023, no. 2 (53), pp. 101–109. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-101-109>

9. Bielikov A.S., Yalanskyi O.A., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. *Rozrobka modeley skladnykh kolyvan' dlya system avtomatyzatsiyi vibroakustychnoho kontrolyu bezpeky ekspluatatsiyi budivel' i sporud* [Development of models complex oscillations for automation systems of vibroacoustic operational safety control of buildings and structures]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 3 (021), pp. 7–18. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.7.1055> (in Ukrainian).

10. Bulat A.F., Slashchov I.N. and Slashchova O.A. *Metody otsinky vzayemopov'yazanykh heomekhanichnykh ta hazodynamichnykh protsesiv u hirs'komu masivi dlya system kontrolyu robochoho seredovyscha shakht* [Evaluation methods of interconnected geomechanical and gas dynamic processes in the rock massif for the systems of working medium control in the mines]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geo-Technical Mechanics]. 2017, no. 134, pp. 3–21. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2017.134.003> (in Ukrainian).

11. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 970, p. 012010. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012010>

12. Bulat A.F., Slashchova O.A., Slashchov I.M. and Stadniychuk M.M. *Obgruntuvannya metodiv kontrolyu heomekhanichnoyi bezpeky na hirnychkykh pidpryyemstvakh* [Substantiation of methods of geomechanical safety control in the mining enterprises]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geo-Technical Mechanics]. 2020, no. 150, pp. 176–187. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.150.176> (in Ukrainian).

13. DSTU B V.2.7-170:2008. *Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya seredn'oyi hustyny, volohosti, vodopohlynannya, porystosti i vodonepronyknosti. Chynnyy z 2009-07-01* [DSTU B V.2.7-170:2008. Building Materials. Concretes. Methods for Determining Average Density, Humidity, Water Absorption, Porosity and Water Resistance. National standard of Ukraine]. Kyiv : Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2008. URL: https://dnaop.com/html/43938/doc-ДСТУ_Б_В.2.7-170 (in Ukrainian).

14. Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L. *Finite Element Method : Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann. 2013, 7th ed., 756 p. ISBN 008095135X.

15. Usachenko B.M. *Vlastyvoli porid ta stiykist' hirnychkykh vyrobok* [Properties of rocks and stability of mine workings]. Kyiv : Sci. Thought, 1979, 136 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 10.12.2025.