

УДК 622.831

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-34>

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ПІДНЯТТЯ ПІДОШВИ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК, ЩО ПІДТРИМУЮТЬСЯ ЗА ОЧИСНИМ ВИБОЄМ ДЛЯ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Сахно Іван Георгійович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-8592-0572

Сахно Світлана Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3917-9143

Кирсанов Олександр Леонідович,

аспірант кафедри розробки родовищ корисних копалин

Державного вищого навчального закладу

«Донецький національний технічний університет»

ORCID ID: 0009-0006-5374-1445

Кухаренко Антон Олександрович,

аспірант кафедри розробки родовищ корисних копалин

Державного вищого навчального закладу

«Донецький національний технічний університет»

ORCID ID: 0009-0009-3432-2183

Повторне використання дільничних гірничих виробок є одним з основних трендів підземного видобутку вугільних пластів довгими очисними вибоями. Безціликові системи розробки використовуються все частіше за межами Європи, що поширює актуальність цього методу видобутку. Основним стримуючим фактором повторного використання виробок є складність забезпечення їхнього експлуатаційного стану за лавою. При цьому досі невирішеними частинами проблеми стійкості виробок є критичні підняття підшви і асиметричне навантаження системи кріплення. Вітчизняні і закордонні вчені присвячували свої дослідження проблемі підняття підшви гірничих виробок у різних гірничо-геологічних умовах протягом останніх ста років, що дало підстави для розроблення трьох концептуально різних механізмів підняття підшви. Однак у реальних умовах підняття підшви вкрай складно класифікувати за класичними механізмами, особливо у виїмкових панелях, що відпрацьовуються сучасною очисною технікою і виробках закріплених сучасними системами кріплення. Під час підтримання виробок за лавою різні фактори мають одночасний різнозаговий вплив на підняття підшви. Це знижує ефективність наявних способів боротьби з підняттям підшви. Таким чином, ефективна протидія підняттю підшви можлива лише після вивчення механізму розвитку цього процесу в сучасних умовах. У зв'язку з цим у роботі проведено дослідження напружено-деформованого стану гірських порід навколо штреку, що підтримується за лавою задля повторного використання. Основним методом дослідження є метод скінченних елементів, реалізований у програмному середовищі ANSYS. На основі проведеного чисельного моделювання досліджено механізм розвитку підняття підшви за очисним вибоєм. Запропонована гіпотеза еволюції підняття підшви, що формує підстави для створення ефективних способів боротьби з підняттям підшви в зазначених умовах.

Ключові слова: підняття підшви, напруження, деформації, повторне використання штреків, стійкість гірничих виробок.

Sakhno Ivan, Sakhno Svitlana, Kyrsanov Oleksandr, Kukharenko Anton. Study of the floor heave mechanism in gob-side entry retaining

Reuse of gateroads is one of the main modern trends in underground longwall mining of coal seams. Pillarless mining techniques are more often used outside Europe, which extends the relevance of this mining method. The main restrictive factor of the gob-side entry retaining is the difficulty of ensuring gateroad's stability. At the same time, the unresolved part of the problem of gateroads stability is still the dramatic floor heave and the asymmetric

loading of the support system. Ukrainian and foreign scientists had been devoting their researches to the floor heave issue in various mining and geological conditions over the past hundred years. Based on this, three conceptually different floor heave mechanisms were developed. However, in-situ, it is extremely difficult to classify the floor heave cases according to classical mechanisms, especially in panels with modern mining equipment and gateroad support system. Vary factors have a simultaneous and unequal influence on the floor heave. This reduces the effectiveness of traditional floor heave control methods. Thus, effective floor heave control is possible only after studying the evolution mechanism of this process in modern conditions. In this regard, this work has conducted a study of the stress-strain state of surrounding rocks in the gob-side entry. The main research method is the finite element method, implemented in the ANSYS software. Based on the numerical simulation, the mechanism of the floor heave evolution in gob-side entry was investigated. A hypothesis of the floor heave evolution was proposed, which forms the basis for searching effective ways to control the floor heave in the specified engineering conditions.

Key words: floor heave, stress, strain, gob-side entry retaining, mine roadway stability.

Вступ. Основним трендом сучасної енергетики є поступовий перехід на зелені джерела енергії з плановим скороченням частки викопного палива у виробництві електричної енергії. Перехід на відновлювані джерела енергії в довгостроковій перспективі є неминучим, однак темпи цього переходу виявилися меншими, ніж очікувалося. Реалізація стратегії скорочення викидів парникових газів у розвинутих країнах, перш за все в Європі, привела до перенесення значної частини вугледобутку до країн, що розвиваються. Одночасно ключовий гравець на ринку вугілля – Китай, який забезпечує більше половини вугільної генерації світу, суттєво не скорочує видобуток вугілля і традиційну генерацію енергії з викопного палива. У зв'язку з цим за останні роки кількість вугілля, що видобувається і використовується, у світі суттєво не скоротилась.

Сьогодні вугілля забезпечує близько чверті світового виробництва енергії. За різними оцінками, до 2050 року частка вугілля на глобальному енергетичному ринку становитиме 7–12 %. Таким чином, традиційний видобуток вугілля буде доволі актуальним у найближчому майбутньому. Водночас, щоб зменшити негативний вплив видобутку викопного палива на довкілля, уряди різних вугледобувних країн запроваджують дедалі суворіші обмеження та екологічні норми, що стимулює пошук та впровадження нових технологічних рішень.

Основна частина світового підземного видобутку вугілля ведеться лавами. США, Китай, Австралія, Польща та Україна використовують переважно довговибійні системи розробки. Різні гірничо-геологічні умови сприяли поширенню в цих країнах різних технологічних рішень, зокрема систем розробки. Однак під час видобування вугільних пластів потужністю 0,8–2,1 м, які завжди були і є основним об'єктом видобутку шахт в Україні, основним трендом і найближчою перспективою є повторне використання виробок за безціликових довговибійних систем розробки. Зокрема, у вибої 7/VII/385 шахти Богданка (Польща) було встановлено світовий

рекорд підземного видобутку 24 400 т/добу на пласті потужністю 1,63 м за комбінованої системи розробки з підсвіженням вентиляційного струменя (Y-подібна система вентиляції панелі за європейською класифікацією) [1].

Широке застосування прогресивних комбінованих систем розробки з повторним використанням виробок обмежується перш за все складністю забезпечення експлуатаційного стану виробок за лавою [2; 3]. Проблема посилюється постійним збільшенням глибини видобутку та природним погіршенням геологічних умов. Для стримання деформацій та руйнування покрівлі і боків виробок використовуються ефективні багаторівневі системи кріплення (арочне кріплення, сталевополімерні анкери, канатні анкери, торкрет), однак при цьому підшва виробок залишається не закріпленою. Тому критичне підняття підшви залишається не вирішеною частиною проблеми стійкості виробок, що повторно використовуються.

Багато вчених вивчали механізм підняття підшви за підтримання виробок за лавою [4–6]. Можна дійти висновку, що руйнування або пластична течія поряд із серією підшви, викликане напруженнями, що перевищують межу міцності вміщуючих порід, є передумовою для підвищення підняття підшви [7]. Лі та ін. [8] зазначили, що ключовими факторами підняття підшви є зміни напружено-деформованого стану навколишніх порід у результаті руйнування покрівлі. Це призводить до збільшення вертикального напруження в боках виробки, що впливає на стан порід підшви. Лі та ін. [5] стверджували, що породи під основою виробки стискаються з двох боків, утворюючи асиметричну силу ковзання до вільної поверхні виробки.

Більшість вчених погоджується з тим, що високі горизонтальні напруження в безпосередній підшві є однією з основних причин, що викликають різке пучіння. Величина підняття підшви залежить від співвідношення вертикальних і горизонтальних напружень [9; 10]. Мо та ін. [11] в результаті статистичного аналізу австралійської бази даних з підняття підшви

запропонували використовувати рейтинг горизонтальних напружень (HSR) як критерій, що відображає величину горизонтального напруження. Чжан та Шімада [12] виявили, що зміна співвідношення горизонтальних і вертикальних напружень у шарах підосви є основною причиною підняття. Гонг та ін. [4] виявили, що горизонтальне напруження в безпосередньому перекритті є кореневим фактором, який викликає пучіння. Чен та ін. [13] довели, що підняття підосви внаслідок стискання та пластичної течії відіграє велику роль у стабільності виробок за лавою. Гао та ін. [14] визначили основну роль зсувного руйнування в руйнуванні підосви штреків. Однак механізм, що описує еволюцію напружено-деформованого стану навколо виробки, що підтримується за лавою задля повторного використання, все ще потребує розробки.

Традиційні уявлення про підняття підосви у виробках визначають три основні механізми: втрата тримальної здатності, набухання порід під час зволоження та вигин [15]. Кожен з цих механізмів пов'язаний з ключовим фактором, який його викликає. Випадки втрати тримальної здатності пов'язані із зсувними руйнуваннями товщ під вугільними ціликами, коли вертикальне напруження перевищує тримальну здатність підосви. Набухання відбувається у вологих породах, що містять глинисті мінерали. Вигин відбувається під впливом високих горизонтальних напружень у породах підосви [16].

Однак у реальних умовах підняття підосви вкрай складно класифікувати за означеними механізмами. Під час підтримання виробок за лавою різні фактори часто мають одночасний вплив. У кожному випадку це призводить до різноагового впливу кожного з факторів, що часто справляють синергетичний ефект. Крім того, виробка, що повторно використовується, за лавою підтримується в неоднорідному середовищі: з одного боку, вугільний пласт, з протилежного – охоронна смуга. Окрім того, в поперечному перерізі виробка за лавою витримує неоднаковий вертикальний тиск, що призводить до асиметрії деформації виробки.

Зазначені обставини формують невіршену галузь наукової проблеми, якій присвячено дослідження, наведене у статті. На основі проведеного чисельного моделювання визначено механізм розвитку підняття підосви за очисним вибоєм.

Методи та методики дослідження.

Гірничо-геологічні та гірничотехнічні умови. Об'єктом дослідження були гірничі виробки ПРАТ Ш/У «Покровське», яке розташоване в Донецькій області України. В роботі

розглянуто умови блока № 10, а саме 11 південна лава блоку 10 ($m_{сер} = 1,48\text{м}$) та 12 південна лава «біс» блоку 10 ($m_{сер} = 1,45\text{м}$). Потужність порід 11-ї південної лави блоку 10 (рис. 1, а): основної покрівлі – 4,65–24,05 м, безпосередньої покрівлі – 0,00–3,65 м, основної підосви – 1,15–13,75 м, безпосередньої підосви – 0,00–2,40 м. Потужність порід 12-ї південної лави «біс» блоку 10 (рис. 1, а): основної покрівлі – 19,55–23,45 м, безпосередньої покрівлі – 0,3–1,75 м, основної підосви – 10,3–18,9 м, безпосередньої підосви – 0,0–0,20 м.

11 південна лава блоку 10 та 12 південна лава «біс» блоку 10 відпрацьовувались за комбінованою системою розробки стовпової із суцільною з прямоточним провітрюванням і підсвіжінням вентиляційного струменя. Схема провітрювання ЗВ наведена на рис. 1, б. Після доробки виїмкового стовпа 11 південний «біс» конвеєрний штрек блоку 10 використовувався повторно як відведення відпрацьованого повітря з діючої лави, а 12 південний «біс» конвеєрний штрек блоку 10 використовувався як вентиляційний штрек для майбутньої лави.

У 11 південному «біс» конвеєрному штреці блока 10 як основне кріплення використовувалось арочне податливе кріплення КШПУ-М-20,3. Ширина та висота штреку становили 5,5 м та 4,36 м відповідно. Площа поперечного перерізу у світлі після осадки становила 11,2 м². Відстань між рамами становила 0,67 м. Виробка охоронялась литою смугою шириною 1,36 м. У 12 південному «біс» конвеєрному штреку блока 10 як основне кріплення використовувалось арочне податливе кріплення КШПУ-М-17,7. Ширина та висота штреку становили 4,95 м та 3,8 м відповідно. Площа поперечного перерізу у світлі після осадки становила 11,3 м². Відстань між рамами становила 0,67 м. Виробка охоронялась литою смугою шириною 1,36 м. Ширина охоронної смуги з урахуванням стійок органічного кріплення – 2,0 м. На рис. 2, а показано проєктний перетин виробки.

Під час відходу лави на відстань 100 м ширина та висота 12 південного «біс» конвеєрного штреку блока 10 становили 2,7 м та 3,0 м відповідно. Загальна вертикальна конвергенція становила близько 37 % від початкової висоти виробки. Середнє підняття підосви становило 0,90 м, середнє опускання покрівлі – 0,2 м. Штрек деформувався асиметрично. Сталеві рами були критично зігнуті. Виробка перекріплювалась за лавою. Стан виробки до перекріплення показано на рис. 2, б (синьою штриховкою показано підняття підосви). У виробці

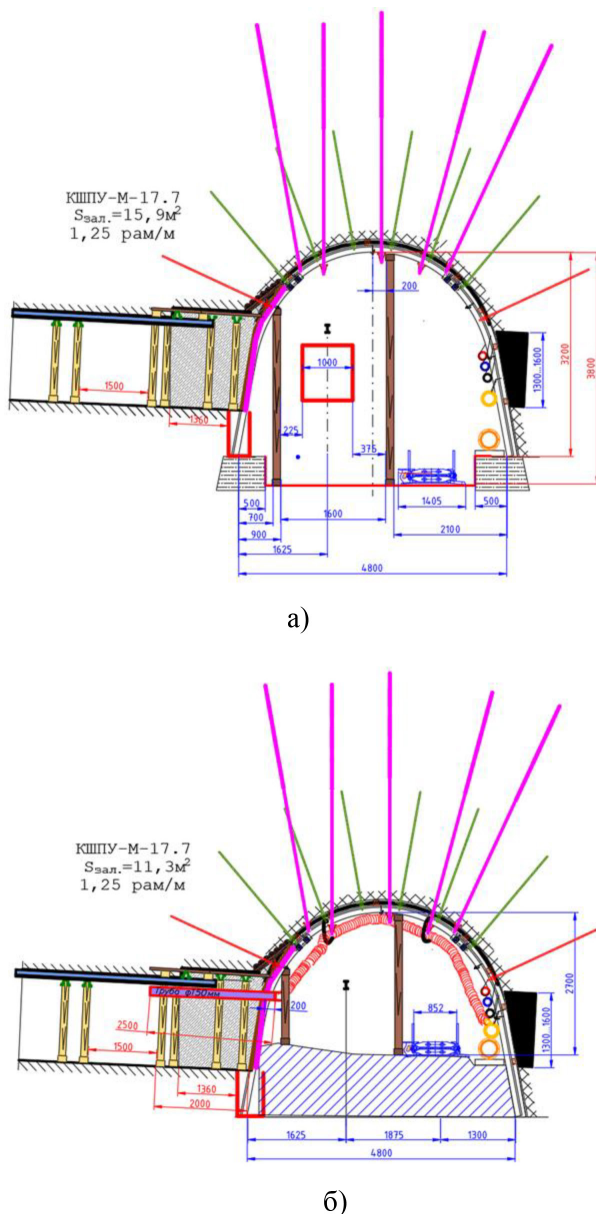


Рис. 2. Проектний перетин 12 південного «біс» конвеєрного штреку блока 10 за лавою після перекріплення (а) і перед перекріпленням (б)

основа було вибрано умови. Висота та ширина виробки становили 3,8 м та 4,95 м відповідно. Висота та ширина охоронної смуги (лита смуга + органне кріплення) становили 1,45 м та 2,0 м відповідно. Нижня межа моделі була зафіксована по вертикалі; зміщення бічних меж було обмежено в нормальному напрямку. До моделі прикладався тиск, розрахований за гіпотезою проф. Дінніка.

Для моделювання поведінки гірських порід, матеріалу литої смуги та пустої породи у виробленому просторі була застосована класична модель Друкера-Прагера. Можливість адекватного моделювання поведінки матеріалів, що залежать від тиску (таких як гірські породи) за

допомогою моделі Друкера-Прагера була доведена в попередніх дослідженнях [20; 21]. Для моделювання поведінки сталевий арочної рами було використано білінійну ізотропну модель зміцнення. Механічні параметри гірських порід були скориговані відповідно до критерію Хоека-Брауна [22]. Методика коригування наведена в роботі [23].

Результати. Розподіл напружень і деформацій у навколишніх породах показано на рис. 4, 5. Початкове положення шарів гірських порід, яке було до виймання вугілля в лаві, показано на рис. 4 (а, б) пунктирною лінією. На цих рисунках можна відстежити рух товщі гірських порід порівняно з початковим станом. Характерні зміщення породної товщі позначені стрілками на рис. 4а. Прогин покрівлі над виробленим простором лави, спричинене видобутком вугілля, призводить до навантаження литої смуги. В результаті лита смуга втискається в безпосередню підошву, що викликає збільшення у ній концентрації вертикальних напружень (рис. 4, а).

З боку вугільного пласта вертикальні напруження також зростають у покрівлі та підшві. Збільшення вертикальних напружень у породах підшви під боками виробки викликає бічне розширення порід у горизонтальному напрямку. Таким чином, горизонтальні напруження в безпосередній підшві під литою смугою та вугільним пластом збільшуються. Більше того, величина цих напружень під литою смугою вища, ніж під пластом, як видно з рис. 4, б. Високі горизонтальні напруження під ніжками арочного кріплення провакують поперечне розширення порід (у вертикальному напрямку) та їх зміщення в бік порожнини виробки. Це призводить до розвантаження від напружень гірського масиву під час наближення до виробки та зміни знаку напружень у приконтурній області (рис. 4, а, б).

Зона вертикального розширення та підняття порід у безпосередній підшві під литою смугою має глибину 5 м, згідно з результатами чисельного моделювання, що показано на рис. 4, б. В результаті вдавнення литої смуги в безпосередню підшву під нею утворюється зона просідання порід глибиною до 3,5 м, як показано на рис. 4, б. Пучіння під боком виробки, за результатами моделювання, склало 948 мм. Це на 5,3 % більше, ніж за результатами натурного моніторингу. Загалом можна дійти висновку, що чисельна модель є цілком адекватною. Описаний механізм підтверджується аналізом розподілу деформацій (рис. 4, в, г). Шкала відносних деформацій, наведена на рис. 4, в, г, сконфігурована таким чином, щоб можна було побачити позамежну деформацію.

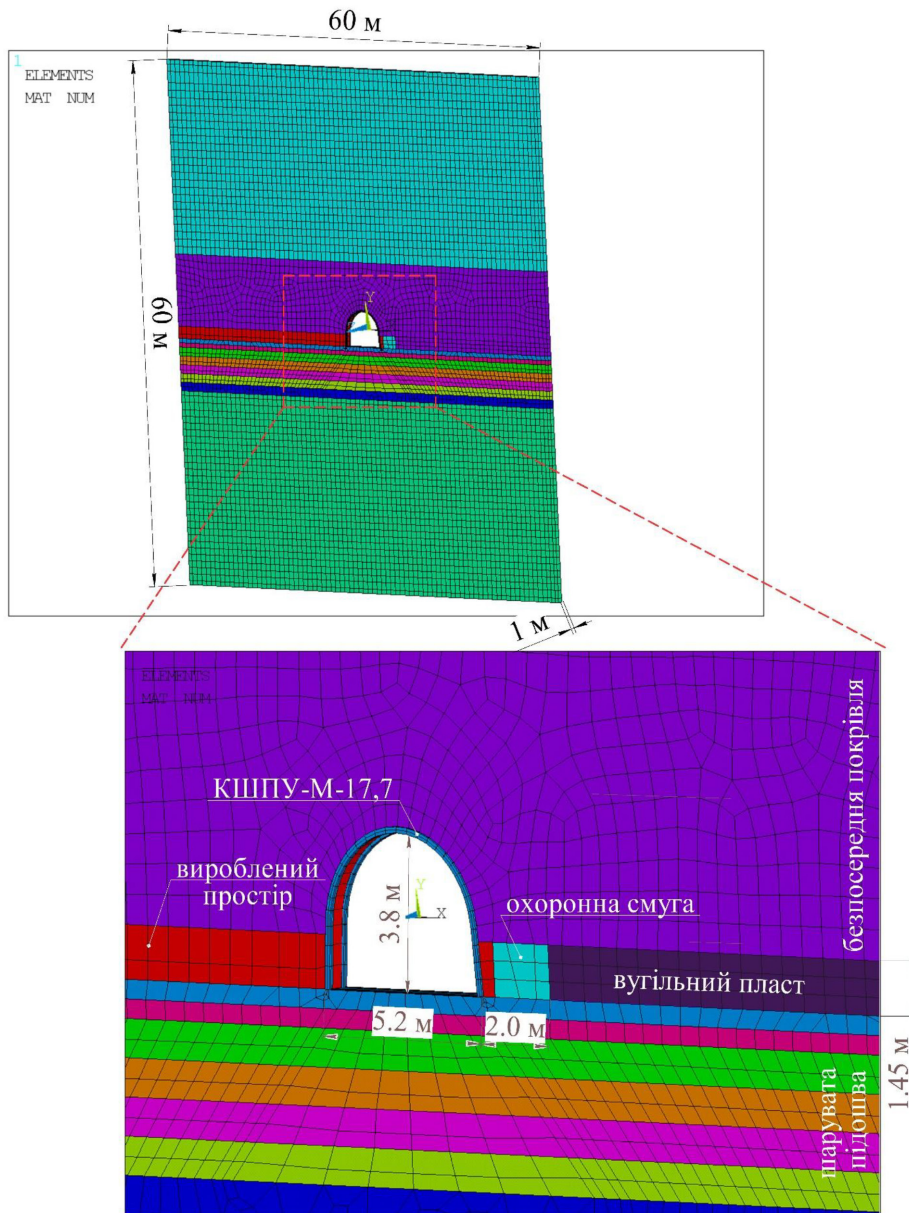


Рис. 3. Чисельна модель кінцевих елементів

Результати випробувань зразків гірських порід [25–27] показують, що для аргіліту, алевроліту, аргіліту та пісковика з одноосьовою міцністю 25–40 МПа критерій руйнування за відносною деформацією становить близько 0,02–0,03. Отже, за чисельного моделювання межа руйнування була прийнята в діапазоні «–0,02»–«+0,02».

Контур зони вертикального розширення з позамежною деформацією показано на рис. 4, в. Вертикальні деформації в цій зоні перевищують критерії руйнування за деформацією для аргіліту більш ніж у 2 рази. У цій зоні спостерігаються позапружна деформація та розшарування порід.

Зони горизонтального позамежного розширення порід утворюються під литою смугою та

пластом. У цих зонах спостерігається дилатантне розширення порід під впливом високих вертикальних напружень (рис. 4, г). Розширення порід у цих зонах призводить до стиснення порід між ними, під прольотом виробки. Постікова зона горизонтального стиснення показана на рис. 4, г. Дилатансія в цій зоні викликана горизонтальними напруженнями.

Зони позамежних горизонтальних деформацій також утворюються в боках виробки. Це викликає деформацію елементів сталевго арочного кріплення. Асиметрія напружень викликає не тільки асиметрію підняття підшви, але й нерівномірну кривизну деформування рами арочного кріплення, що підтверджують результати натурних спостережень підтримки виробки за лавою [24].

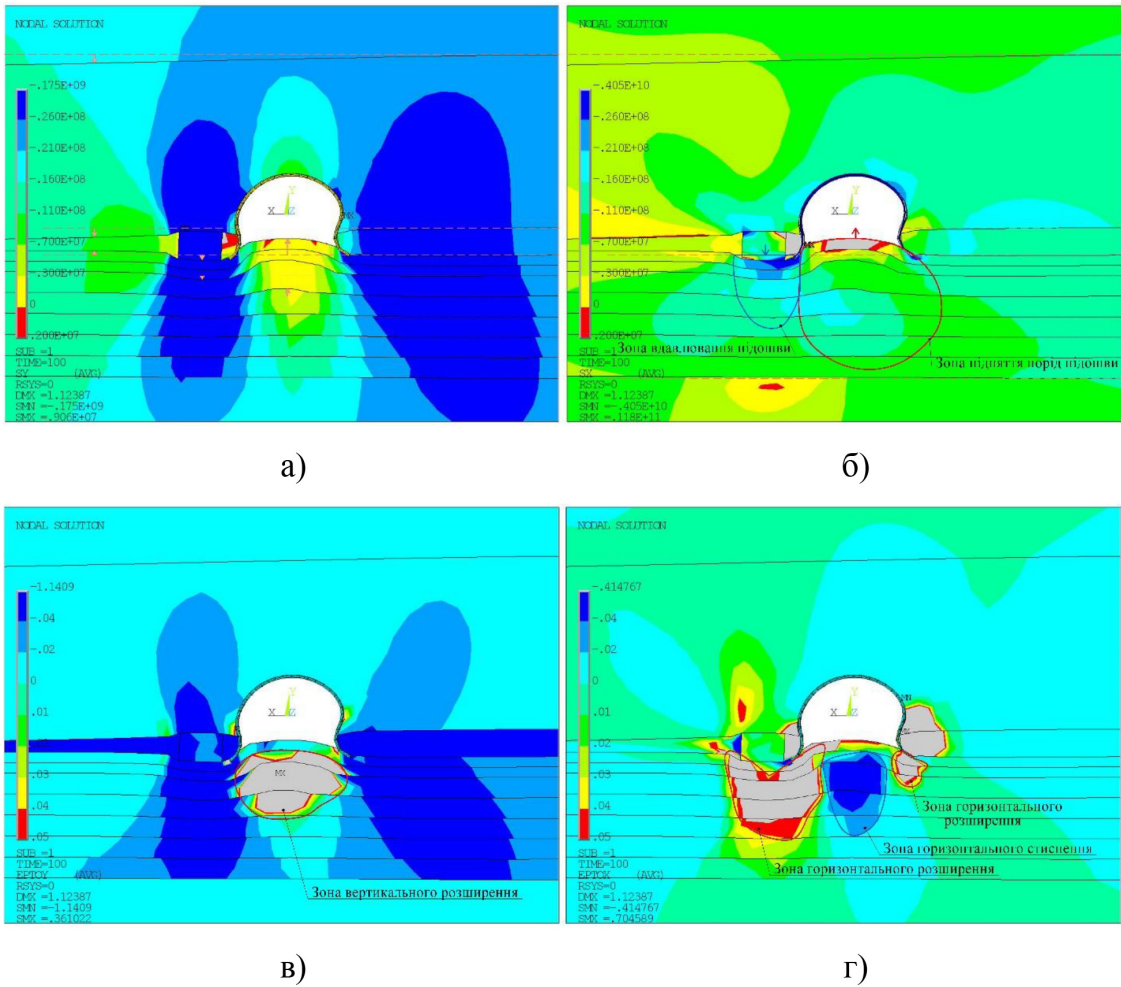


Рис. 4. Розподіл напружень і деформацій навколо виробки, що підтримується за лавою для повторного використання: (а) вертикальні напруження; (б) горизонтальні напруження; (в) вертикальні відносні деформації; (г) горизонтальні відносні деформації

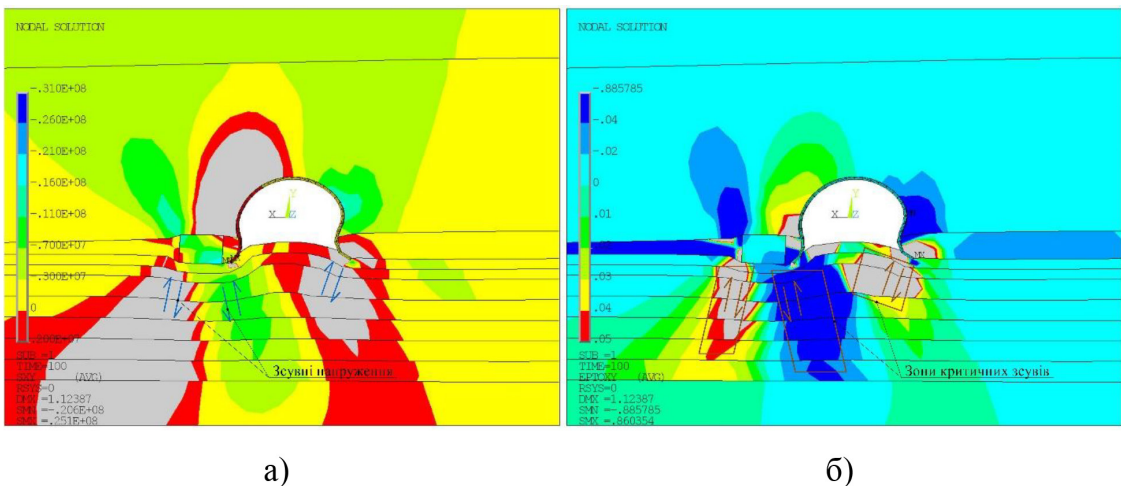


Рис. 5. Розподіл напружень зсуву (а) та деформації зсуву (б) навколо виробки, що підтримується за лавою для повторного використання

Аналіз рис. 4 показав, що в підшві виробки відбуваються зустрічні рухи гірських порід. Такі рухи викликають деформації зсуву. Для їх аналізу розподіл напружень зсуву та деформацій в навколишніх породах показано на рис. 5.

Основний інтерес у цьому дослідженні представляє центральна зона високого зсуву, яка виникає між зоною підняття та зоною просідання безпосередньої підшви. Ця зона бере початок біля кута литої смуги та поширюється в глибину

виробки під кутом (рис. 5, а). Зони позамежних деформацій зсуву показані на рис. 5, б. На протилежному боці тіла литої смуги та під ніжкою арочного кріплення з боку вугільного пласта також утворюються зони підвищених напружень зсуву та деформацій, як показано на рис. 5. Таким чином, зсув відіграє важливу роль у деформації та руйнуванні порід підшоши.

Результати моделювання приводять до розуміння механізму підняття підшоши під час підтримання виробки за лавою. Були визначені основні процеси, що розвиваються в породах підшоши, та встановлено їх причинно-наслідкові зв'язки.

Результати проведеного аналізу дають змогу дійти кількох висновків, що формують гіпотезу еволюції підняття підшоши виробок, що підтримуються за лавою.

1) Основною причиною критичного підняття підшоши у виробці, що підтримується за лавою для повторного використання, є вертикальне навантаження литої смуги вагою порід покрівлі, які втратили опору в результаті виймання вугілля в лаві. Тиск порід покрівлі на литу смугу приводить до втискування її в породи підшоши і формування під смугою зони підвищених вертикальних напружень. Ці напруження вищі за напруження з боку вугільного пласта, що є основною причиною асиметрії деформування виробки. Подальший перерозподіл напружень у підшоші виробки призводить до виникнення підвищених горизонтальних напружень у підшоші, які відіграють ключову роль у розвитку підняття підшоши.

2) Під дією підвищених вертикальних напружень під литою смугою і вугільним пластом виникає дилатансійне розширення порід у горизонтальному напрямку. Високі горизонтальні напруження в породах підшоши під боками виробки провокують формування області позамежного горизонтального стиснення під прольотом виробки. У цій зоні дилатансія та поперечне розширення порід у вертикальному напрямку викликають деформування безпосередньої підшоши та підняття порід.

3) Між зоною підняття порід під прольотом виробки і зоною опускання порід під литою

смугою формується зона високих зсувів. Під ніжкою рами кріплення з боку пласта також формується зона підвищених зсувних напружень і відносних деформацій. Руйнування порід у цих зонах ускладнює описаний механізм підняття підшоши. У зонах зсуву відбувається трансформування вертикальних напружень у горизонтальні.

Розроблення способів боротьби з підняттям підшоши і асиметрією деформування виробки за лавою має враховувати встановлені особливості еволюції напружено-деформованого стану і механізм розвитку підняття підшоши.

Висновки. Це дослідження зосереджено на вивченні механізму розвитку підняття підшоши у виробках, що підтримуються за лавою задля повторного використання. Для вивчення напружено-деформованого стану навколишніх гірських порід було використано метод скінчених елементів. Результати моделювання показали, що критичне підняття підшоши під час підтримання виробки за лавою викликано двома основними причинами:

– високими горизонтальними напруженнями, які передаються з боків виробки до порід підшоши; при цьому видавлювання порід з-під литої смуги також має суттєвий вплив;

– вертикальним розшаруванням порід підшоши в зоні позамежних деформацій під прольотом виробки та литою смугою.

Ці процеси доповнюють один одного та посилюють підняття підшоши. Таким чином, була запропонована гіпотеза еволюції підняття підшоши. Наведені результати чисельного моделювання є валідними лише для геонапружень, геологічних та механічних параметрів гірського масиву, параметрів литої смуги і системи кріплення блоку № 10 ПРАТ Ш/У «Покровське». Однак механізм підняття підшоши є типовим для схожих геологічних та інженерних умов.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення способу боротьби з підняттям підшоши в умовах виробки, яка підтримується за очисним вибоєм задля повторного використання і обґрунтування параметрів цього способу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Polish Bogdanka Mine sets production world record with Cat® Plow Longwall. *MINING.COM*. URL: <https://www.mining.com/polish-bogdanka-mine-sets-production-world-record-with-cat-plow-longwall>
2. Xu Y., Chen J., Bai J. Control of floor heaves with steel pile in gob-side entry retaining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. Т. 26, № 3. С. 527–534. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.02.024>
3. Research on Pillarless Mining by Gob-Side Caving under Soft Rock Roof Conditions: A Case Study / J. Hao та ін. *Applied Sciences*. 2023. Т. 13, № 5. С. 2816. URL: <https://doi.org/10.3390/app13052816>

4. Floor Heave Mechanism of Gob-Side Entry Retaining with Fully-Mechanized Backfilling Mining / P. Gong та ін. *Energies*. 2017. Т. 10, № 12. С. 2085. URL: <https://doi.org/10.3390/en10122085>
5. The Floor Heave Mechanism and Control Technology of Gob-Side Entry Retaining of Soft Rock Floor / Z. Li та ін. *Sustainability*. 2023. Т. 15, № 7. С. 6074. URL: <https://doi.org/10.3390/su15076074>
6. Innovative Control Technique for the Floor Heave in Goaf-Side Entry Retaining Based on Pressure Relief by Roof Cutting / G. Yu та ін. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Т. 2021. С. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/7163598>
7. Małkowski P., Ostrowski Ł., Stasica J. Modeling of Floor Heave in Underground Roadways in Dry and Waterlogged Conditions. *Energies*. 2022. Т. 15, № 12. С. 4340. URL: <https://doi.org/10.3390/en15124340>
8. Fracture Development at Laminated Floor Layers Under Longwall Face in Deep Coal Mining / C. Li та ін. *Natural Resources Research*. 2020. Т. 29, № 6. С. 3857–3871. URL: <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09684-6>
9. Mechanism for Controlling Floor Heave of Mining Roadways Using Reinforcing Roof and Sidewalls in Underground Coal Mine / G. Guo та ін. *Sustainability*. 2018. Т. 10, № 5. С. 1413. URL: <https://doi.org/10.3390/su10051413>
10. Application of a combined support system to the weak floor reinforcement in deep underground coal mine / Y. Kang та ін. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Т. 71. С. 143–150. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.03.017>
11. A new coal mine floor rating system and its application to assess the potential of floor heave / S. Mo та ін. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020. Т. 128. С. 104241. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104241>
12. Zhang Z., Shimada H. Numerical Study on the Effectiveness of Grouting Reinforcement on the Large Heaving Floor of the Deep Retained Goaf-Side Gateroad: A Case Study in China. *Energies*. 2018. Т. 11, № 4. С. 1001. URL: <https://doi.org/10.3390/en11041001>
13. Control mechanism and technique of floor heave with reinforcing solid coal side and floor corner in gob-side coal entry retaining / Y. Chen та ін. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2012. Т. 22, № 6. С. 841–845. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2012.12.002>
14. Discrete element modelling of deformation and damage of a roadway driven along an unstable goaf – A case study / F. Gao та ін. *International Journal of Coal Geology*. 2014. Т. 127. С. 100–110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.02.010>
15. Faria Santos C., Bieniawski Z. T. Floor design in underground coal mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1989. Т. 22, № 4. С. 249–271. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01262282>
16. A numerical investigation into floor buckling mechanisms in underground coal mine roadways / S. Mo та ін. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. Т. 103. С. 103497. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103497>
17. Sakhno I., Isayenkov O., Rodzin S. Local reinforcing of footing supported in the destroyed rock massif. *Mining of Mineral Deposits*. 2017. Т. 11, № 1. С. 9–16. URL: <https://doi.org/10.15407/mining11.01.009>
18. Małkowski P., Ostrowski Ł., Bednarek Ł. The Effect of Selected Factors on Floor Upheaval in Roadways – In Situ Testing. *Energies*. 2020. Т. 13, № 21. С. 5686. URL: <https://doi.org/10.3390/en13215686>
19. Research on roof damage mechanism and control technology of Gob-side entry retaining under close distance gob / H. Liu та ін. *Engineering Failure Analysis*. 2022. С. 106331. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106331>
20. Geomechanical Modeling and Inversion Analysis of the in-situ Stress Field in Deep Marine Shale Formations: A Case Study of the Longmaxi Formation, Dingshan Area, China / Q. Liu та ін. *Frontiers in Earth Science*. 2022. Т. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.808535>
21. Sakhno I. G., Molodetskyi A. V., Sakhno S. V. Identification of material parameters for numerical simulation of the behavior of rocks under true triaxial conditions. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. № 5. С. 48–53. URL: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/4>
22. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference, NARMS-TAC*, м. Toronto. 2002. С. 267–271. URL: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Hoek-Brown-Failure-Criterion-2002.pdf>
23. Sakhno I., Sakhno S. Numerical Studies of Floor Heave Control in Deep Mining Roadways with Soft Rocks by the Rock Bolts Reinforcement Technology. *Advances in Civil Engineering*. 2023. Т. 2023. С. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1155/2023/2756105>

24. Оцінка асиметричності і неоднорідності втрати стійкості конвеєрних штреків ПРАТ Ш/У «Покровське» на всіх етапах їх експлуатації. / С. Сахно та ін. *Вісті донецького гірничого інституту*. 2025. № 1(56). С. 15–24. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2025-1-15-24>
25. Analysis of mechanical behavior of soft rocks and stability control in deep tunnels / H. Zhou та ін. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014. Т. 6, № 3. С. 219–226. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.03.003>
26. Almisned O. A., Alqahtani N. B. Rock analysis to characterize Saudi soft sandstone rock. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021. Т. 11, № 6. С. 2381–2387. URL: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01160-y>
27. Laboratory characterization of shale properties / M. Josh та ін. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2012. Т. 88-89. С. 107–124. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.023>

REFERENCES:

1. Polish Bogdanka Mine sets production world record with Cat® Plow Longwall. (б. д.). MINING.COM. Retrieved from <https://www.mining.com/polish-bogdanka-mine-sets-production-world-record-with-cat-plow-longwall>
2. Xu, Y., Chen, J., & Bai, J. (2016). Control of floor heaves with steel pile in gob-side entry retaining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26 (3), 527–534.
3. Hao, J., Zhang, P., Song, Y., Liu, H., Shi, Y., Liu, J., & Lu, G. (2023). Research on Pillarless Mining by Gob-Side Caving under Soft Rock Roof Conditions: A Case Study. *Applied Sciences*, 13 (5), 2816.
4. Gong, P., Ma, Z., Ni, X., & Zhang, R. (2017). Floor Heave Mechanism of Gob-Side Entry Retaining with Fully-Mechanized Backfilling Mining. *Energies*, 10 (12), 2085.
5. Li, Z., Zhang, Y., Ma, Q., Zheng, Y., Song, G., Yan, W., Zhang, Y., & Hu, L. (2023). The Floor Heave Mechanism and Control Technology of Gob-Side Entry Retaining of Soft Rock Floor. *Sustainability*, 15(7), 6074.
6. Yu, G., Wang, J., Hu, J., Zhu, D., Sun, H., Ma, X., Ming, W., & Li, W. (2021). Innovative Control Technique for the Floor Heave in Goaf-Side Entry Retaining Based on Pressure Relief by Roof Cutting. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1–17.
7. Małkowski, P., Ostrowski, Ł., & Stasica, J. (2022). Modeling of Floor Heave in Underground Roadways in Dry and Waterlogged Conditions. *Energies*, 15 (12), 4340.
8. Li, C., Zuo, J., Wei, C., Xu, X., Zhou, Z., Li, Y., & Zhang, Y. (2020). Fracture Development at Laminated Floor Layers Under Longwall Face in Deep Coal Mining. *Natural Resources Research*, 29 (6), 3857–3871.
9. Guo, G., Kang, H., Qian, D., Gao, F., & Wang, Y. (2018). Mechanism for Controlling Floor Heave of Mining Roadways Using Reinforcing Roof and Sidewalls in Underground Coal Mine. *Sustainability*, 10 (5), 1413.
10. Kang, Y., Liu, Q., Gong, G., & Wang, H. (2014). Application of a combined support system to the weak floor reinforcement in deep underground coal mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71, 143–150.
11. Mo, S., Ramandi, H.L., Oh, J., Masoumi, H., Canbulat, I., Hebblewhite, B., & Saydam, S. (2020). A new coal mine floor rating system and its application to assess the potential of floor heave. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 128, 104241.
12. Zhang, Z., & Shimada, H. (2018). Numerical Study on the Effectiveness of Grouting Reinforcement on the Large Heaving Floor of the Deep Retained Goaf-Side Gateroad: A Case Study in China. *Energies*, 11 (4), 1001.
13. Chen, Y., Bai, J., Yan, S., Xu, Y., Wang, X., & Ma, S. (2012). Control mechanism and technique of floor heave with reinforcing solid coal side and floor corner in gob-side coal entry retaining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22 (6), 841–845.
14. Gao, F., Stead, D., Kang, H., & Wu, Y. (2014). Discrete element modelling of deformation and damage of a roadway driven along an unstable goaf – A case study. *International Journal of Coal Geology*, 127, 100–110.
15. Faria Santos, C., & Bieniawski, Z.T. (1989). Floor design in underground coal mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 22 (4), 249–271.
16. Mo, S., Sheffield, P., Corbett, P., Ramandi, H. L., Oh, J., Canbulat, I., & Saydam, S. (2020). A numerical investigation into floor buckling mechanisms in underground coal mine roadways. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103497.
17. Sakhno, I., Isayenkov, O., & Rodzin, S. (2017). Local reinforcing of footing supported in the destroyed rock massif. *Mining of Mineral Deposits*, 11 (1), 9–16.

18. Małkowski, P., Ostrowski, Ł., & Bednarek, Ł. (2020). The Effect of Selected Factors on Floor Upheaval in Roadways – In Situ Testing. *Energies*, 13 (21), 5686.
19. Liu, H., Zhang, B., Li, X., Liu, C., Wang, C., Wang, F., & Chen, D. (2022). Research on roof damage mechanism and control technology of Gob-side entry retaining under close distance gob. *Engineering Failure Analysis*, 106331.
20. Liu, Q., Fu, Q., Yang, K., Wei, Q., Liu, H., & Wu, H. (2022). Geomechanical Modeling and Inversion Analysis of the in-situ Stress Field in Deep Marine Shale Formations: A Case Study of the Longmaxi Formation, Dingshan Area, China. *Frontiers in Earth Science*, 9.
21. Sakhno, I. G., Molodetskyi, A. V., & Sakhno, S. V. (2018). Identification of material parameters for numerical simulation of the behavior of rocks under true triaxial conditions. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 48–53.
22. Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. *Y Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference, NARMS-TAC* (p. 267–271). Hammah et al.
23. Sakhno, I., & Sakhno, S. (2023). Numerical Studies of Floor Heave Control in Deep Mining Roadways with Soft Rocks by the Rock Bolts Reinforcement Technology. *Advances in Civil Engineering*, 2023, 1–23.
24. Sakhno, S., Zavorodnia, L., Bulych, O., & Kyrsanov, O. (2025). Otsinka asymetrychnosti i neodnorodnosti vtraty stiikosti konveiernykh shtrekiv PRAT Sh/U «Pokrovske» na vsikh etapakh yikh ekspluatatsii. *Visti donetskoho hirnychoho instytutu.*, (1 (56)), 15–24. [in Ukrainian].
25. Zhou, H., Zhang, C., Li, Z., Hu, D., & Hou, J. (2014). Analysis of mechanical behavior of soft rocks and stability control in deep tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (3), 219–226.
26. Almisned, O. A., & Alqahtani, N. B. (2021). Rock analysis to characterize Saudi soft sandstone rock. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11 (6), 2381–2387.
27. Josh, M., Esteban, L., Delle Piane, C., Sarout, J., Dewhurst, D. N., & Clennell, M. B. (2012). Laboratory characterisation of shale properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 88–89, 107–124.

Стаття надійшла: 19.08.2025

Стаття прийнята: 12.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

