

В.О. Назаренко, д.т.н., проф.

Г.В. Бруй, к.т.н., доц.

Технічний університет «Метінвест політехніка»

О.С. Кучин, д.т.н., доц.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

А.О. Криворучко, к.т.н., доц.

С.С. Іськов, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Маркшейдерський моніторинг стану гірничих виробок в умовах розробки зближених вугільних пластів як важливий елемент забезпечення безпеки праці та захисту шахтарів

Підвищення рентабельності гірничодобувних підприємств і забезпечення безпеки гірничих робіт значною мірою залежать від вибору раціонального й економічно вигідного варіанта ведення гірничих робіт. Пошук таких варіантів, їх порівняння та обґрунтування мають свої особливості під час відпрацювання пластових родовищ. А саме доводиться враховувати відмінність у геометричних розмірах очисних виробок і потужності пласта, вплив ціликів і крайових частин суміжних пластів, наявність тектонічних порушень. Ці особливості для ефективного ведення гірничих робіт вимагають кількісної оцінки напруженого стану масиву гірських порід.

Метою роботи є дослідження поведінки масиву в зонах підвищеного гірничого тиску, оцінка його напружено-деформованого стану для обґрунтування оптимальних параметрів ціликів, що в умовах зближених пластів Західного Донбасу є вельми актуальним науковим завданням.

Моделювання напружено-деформованого стану гірничого масиву виконувалося методом скінченних елементів у програмному продукті Solid Works. Напруги масиву гірських порід визначали за різних параметрів цілика від 25 до 40 метрів з інтервалом у 2 метри.

Встановлено, що за розміру цілика 37 м напруження за контуром підготовчих виробок будуть порівнянними з напруженнями від впливу тільки рухомої лави. За розміру цілика 25 м, що відповідає величині фактично залишеного цілика, напруження в 4 рази перевищують аналогічні за відсутності впливу лави. Ці напруження є критичними для ділянок підготовчих штреків, які потрапляють до зони ПГТ, що неминуче призведе до істотних деформацій підготовчих виробок і необхідності їхнього перекріплення.

У роботі наведено результати маркшейдерського моніторингу стану виробок у міру наближення очисного вибою до моменту його зупинки. Виконано аналіз відповідності результатів моделювання з маркшейдерськими вимірами конвергенції виробок і аналізом фактичного стану виробок.

Ключові слова: *маркшейдерський замір; гірничі виробки; цілик; зона підвищеного гірничого тиску; напружено-деформований стан; моніторинг виробок.*

Актуальність теми. Підвищення рентабельності гірничодобувних підприємств і забезпечення безпеки гірничих робіт значною мірою залежать від вибору раціонального й економічно вигідного варіанта ведення гірничих робіт. Пошук таких варіантів, їх порівняння та обґрунтування мають свої особливості під час відпрацювання пластових родовищ. А саме доводиться враховувати відмінність у геометричних розмірах очисних виробок, потужності, що виймається, гірничі роботи на суміжних пластах, вплив ціликів і крайових частин суміжних пластів, наявність тектонічних порушень. Для врахування цих особливостей і, як наслідок, ефективного ведення гірничих робіт, необхідна кількісна оцінка напруженого стану масиву гірських порід і корисних копалин навколо виробок.

Питання визначення розмірів ціликів різних видів і призначення має вельми важливе значення, оскільки воно тісно пов'язане з питаннями повноти виїмки запасів корисних копалин, а також забезпеченням стійкості виробок, які охороняються.

Неправильне визначення розмірів ціликів може стати причиною втрат корисної копалини в надрах у разі вибору розмірів більших, ніж вимагають дані умови. Навпаки, вибір недостатніх для даних умов розмірів ціликів призводить до їх часткового або повного руйнування. Результатом цього є передчасне обвалення покрівлі, завали лав та інші більші або менші аварії, що спричиняють збільшення втрат і порушення нормального режиму роботи шахти. Тому встановлення оптимальних параметрів ціликів у конкретних гірничо-геологічних умовах є вельми актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На тлі постійного збільшення глибини розроблення вугільних пластів та інтенсивності їхнього відпрацювання значно зростає гірничий тиск і вертикальні напруження масиву, що призводить до різкого погіршення умов проведення та підтримання підготовчих виробок [1]. Численні існуючі способи та засоби забезпечення їх стійкості виявляються в багатьох випадках недостатніми. Розглядаються способи кріплення арочним кріпленням [2, 3], сталевими і канатними анкерами [4–6], рамно-анкерним кріпленням [7, 8], використання торкетування [9, 10] або попереднє розвантаження [11]. Питання підтримання виробок у разі потрапляння їх у зону підвищеного гірничого тиску від гірничих робіт на зближених пластах і додатковому впливі динамічного опорного тиску від рухомої лави малодосліджені.

Аналіз нормативної бази [12–14] і літературних джерел дав змогу встановити, що навантаження на цілик, за інших рівних умов, залежить від форми та площі розробки, системи розробки та її елементів, методу управління гірничим тиском [15, 16] тощо. У [17] вивчено еволюцію напружень на кріплення, напружень під вугільним пластом, що розробляється, та кута нахилу виробки. Низка авторів вивчає деформації масиву гірських порід над очисною виробкою, виконуючи вимірювання опускань земної поверхні [18, 19]. Отримані закономірності використовують для прогнозування деформацій об'єктів, що охороняються, на земній поверхні та в надрах [20, 21]. Дані цих досліджень дають змогу зробити висновок, що навантаження на цілик залежить від цілої низки чинників, без урахування яких правильне визначення цієї величини неможливе.

Метою статті є дослідження поведінки масиву в зонах підвищеного гірничого тиску, оцінювання його напружено-деформованого стану для обґрунтування оптимальних параметрів ціликів в умовах зближених пластів Західного Донбасу.

Як об'єкт дослідження розглянуто реальну ситуацію, яка склалася під час відпрацювання запасів пласта c_{10} ШУ ім. Героїв Космосу ДТЕК «Павлоградвугілля».

1061-біс лава підготовлена для виїмки запасів вугілля в східному крилі шахтного поля за простяганням. Довжина виїмкового стовпа 920 м, довжина лави – 250 м, середня глибина відпрацювання – 410 м, кут падіння пласта – 3°. Вугільний пласт c_{10} марки Г, переважно простої будови, геологічна потужність у середньому становить 1,02 м (рис. 1). Вугільний пласт небезпечний за газом і пилом, до самозаймання нескхильний.

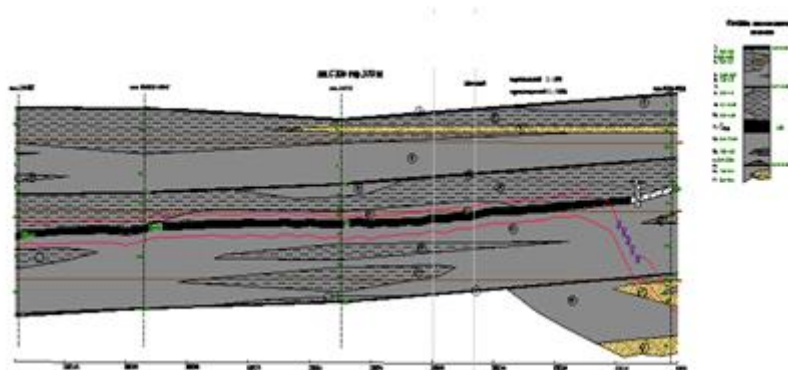


Рис. 1. Фактичний геологічний розріз по 1061-біс збірному штреку по c_{10} гор. 370 м

Очікуваний водоприплив у виробку з вугільного пласта очікується до 1,5 м³/год, можливий капеж із покрівлі виробки до 1,5 м³/год. Під час розмокання породи ґрунту схильні до інтенсивного пучіння з втратою несучої здатності.

Гірничо-геологічні умови відпрацювання виробки ускладнені наявністю зон непружних деформацій, що утворилися від проведення 1061-біс бортового штрека, 1061-біс збірного штрека і монтажної камери. Породи основної та безпосередньої покрівлі тріщинуваті, дуже нестійкі та схильні до раптового обвалення.

Під час відпрацювання вугільного пласта c_{10} ш. ім. Героїв Космосу виникла проблемна ситуація у зв'язку з охороною 1061-біс збірного і 1061-біс бортового штреків попереду лави, що рухається, – 1061-біс (рис. 2). Ці підготовчі виробки пройдені після відпрацювання 1061-ї лави. Довжина виїмкового стовпа 1061-ї лави становила 790 м, довжина лави – 175 м (рис. 2).

Першим етапом визначення розмірів цілика є дослідження прояву підвищеного гірничого тиску (ПГТ) за даних умов як основного чинника, що визначає навантаження на ціликову частину масиву. Визначення геометричних параметрів зони ПГТ від впливу очисних робіт 1061-ї лави виконано відповідно до нормативного документа [14]. Межі зон ПГТ, побудовані на розрізах, нанесені на календарний план розвитку гірничих робіт червоним кольором (рис. 2).

Під час підходу лави до зони підвищеного гірничого тиску, з метою збільшення повноти виїмки запасів, було ухвалено рішення про подальше відпрацювання вугілля. Під час переходу зони ПГТ темпи посування зменшилися, що призвело до зупинки лави через руйнування кріплення і здимання гірських порід на ділянках ПК10–ПК20 по 1061-біс бортовому штреку і в районі ПК10 по 1061-біс збірному штреку.

У зв'язку з цим виникло актуальне завдання для цього підприємства оптимізувати і науково обґрунтувати розміри цілика для максимально можливої повноти виїмки запасів вугілля і одночасно забезпечення збереження виробок.

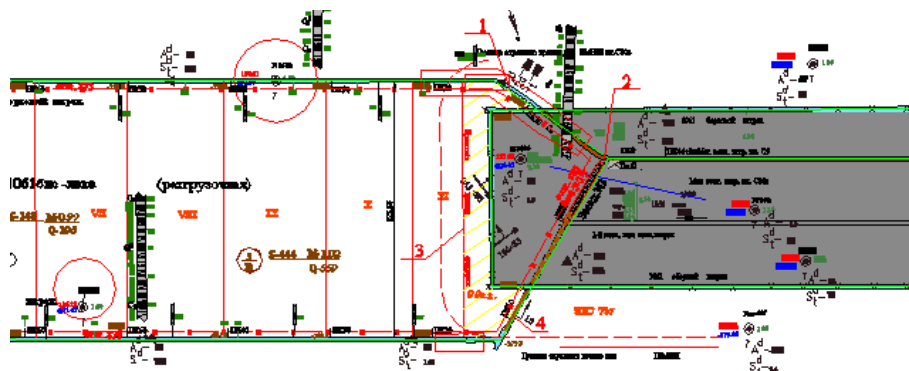


Рис. 2. Викопіювання з плану гірничих виробок по пласту с₁₀ гор. 370 м

Викладення основного матеріалу. Одним із методів дослідження складноструктурних об'єктів у геомеханіці є графічне та математичне моделювання процесів перерозподілу напруженого стану масиву (НДС) гірських порід внаслідок техногенного впливу. На моделі в тривимірному зображенні відтворюється процес деформування породного масиву в міру створення в ньому штучних порожнин. Найзручнішим для дослідження проявів гірничого тиску є метод моделювання [22, 23]. Однією з переваг методу моделювання є можливість визначення показників, що відображають НДС масиву в областях, що цікавлять, які в натурних умовах здійснити практично неможливо через важкодоступність ділянок масиву.

Мета розрахунків – оцінити вплив 1061-біс лави, а також зони раніше зруйнованих порід від 1061-ї лави на стан 1061-біс бортового і 1061-біс збірного штреків, оскільки ці підготовчі виробки слугують для провітрювання, доставки матеріалів до лави та транспортування видобутого вугілля.

Для аналізу напружено-деформованого стану області породного масиву в околиці підготовчих виробок 1061-біс лави змодельовано об'ємну задачу з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Тривимірна модель розв'язуваної задачі представлена на рисунку 3.

Зони зруйнованих і ущільнених порід моделювали шляхом задавання умовних характеристик: модуля Юнга E_p , коефіцієнта Пуассона ν_p , межі міцності на стиснення $\sigma_{ст}$, які значно відрізняються від характеристик незайманого масиву.

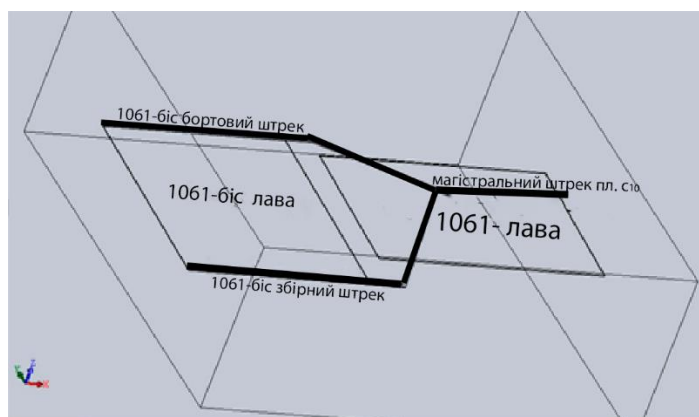


Рис. 3. Тривимірна модель 1061-біс лави

Вирішення поставленого завдання здійснювалося за допомогою програмного продукту Cosmos Works. Визначено навантаження, які будуть прикладені до побудованої тривимірної моделі.

Коефіцієнт бічного тиску в незайманому масиві (λ), визначимо з виразу:

$$\lambda = \frac{\mu}{1-\mu} \quad (1)$$

У цьому виразі μ – коефіцієнт Пуассона, який для пружних порід, нескільних до повзучості, у незайманому масиві може мати значення в межах від 0,25 до 0,43. Приймаємо його таким, що дорівнює 0,3.

$$\text{Звідси } \lambda = \frac{0,3}{1-0,3} = 0,43.$$

Питома вага товщі порід для даних умов дорівнює $\gamma = 22 \text{ кН/м}^3$.

Звідси визначимо вертикальне напруження на ціликову частину пласта без урахування впливу очисних робіт:

$$\sigma_y^0 = -\gamma H = 22 \cdot 410 = 9,0 \text{ МПа}. \quad (2)$$

Бічне навантаження на модельовану ділянку масиву прийнято:

$$\sigma_x^0 = \sigma_z^0 = -\lambda\gamma H = 0,43 \cdot 22 \cdot 410 = 3,87 \text{ МПа}. \quad (3)$$

Модуль пружності для цих умов прийнято 30 000 МПа.

Цій моделі задано параметр сітки 20 м, а виробкам – 1 м, що дало змогу доволі точно задати навантаження на всі необхідні ділянки.

З метою визначення розміру цілика, що задовольняє одночасно вимоги повноти виїмки і збереження підготовчих виробок, тривимірна модель для візуального оцінювання розподілів максимальних напружень відображена в площині 1061-біс лави (рис. 4). Після чого поступово методом наближення збільшувався розмір запобіжного цілика. Цей параметр варіювався в межах від 25 до 40 м з інтервалом у 2 м. Аналіз результатів моделювання виявив, що мінімальне напруження на стінки виробки для дотримання їхнього збереження на цих ділянках відповідає 37 метрам. Розподіл нормальних вертикальних напружень σ_y для випадку оптимального, на наш погляд, розміру цілика (37 м) і фактичного цілика під час зупинки лави (25 м) представлено на рисунках 4–5 відповідно.

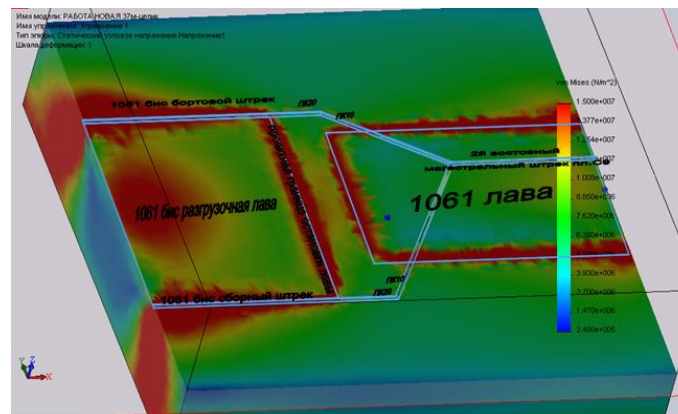


Рис. 4. Напруження в масиві гірських порід за розміру цілика 37 метрів

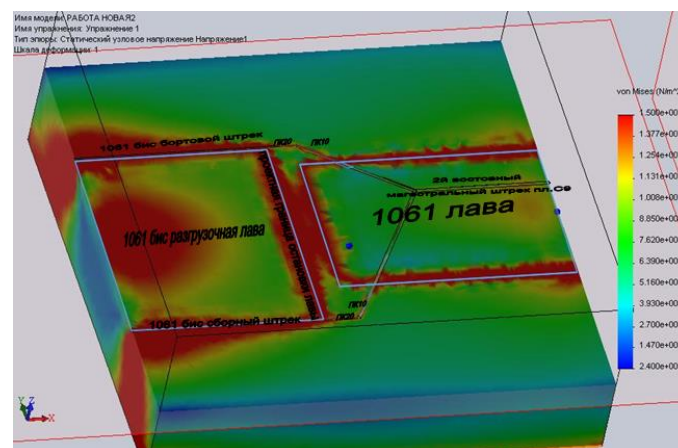


Рис. 5. Напруження в масиві гірських порід за розміру цілика 25 метрів

Найвища концентрація вертикальних напружень у підготовчих виробках (червона колірна гама) має місце за цілика, що дорівнює 25 метрам. На ділянках, що охороняються, 1061-біс бортового і 1061-біс

збірного штреків, згідно з даними моделювання, варто очікувати руйнування порід і, як наслідок, значних деформацій контуру виробки.

Таким чином, виходячи з величин нерівномірних навантажень на цілик, отриманих внаслідок розрахунку, встановлено, що в разі цілика, розмір якого становить 37 м, напруження за контуром підготовчих виробок будуть порівнянними з напруженнями від впливу тільки 1061-біс лави. Навпаки, за розміру цілика у 25 м, що відповідає величині фактично залишеного цілика, напруження в 4 рази перевищують аналогічні за відсутності впливу 1061-біс лави. Такі величини напружень є критичними для ділянок 1061-біс бортового і 1061-біс збірний штреків, розташованих у зоні ПГТ, що й призвело до деформацій підготовчих виробок і необхідності їхнього перекріплення.

Результати моніторингу стану 1061-біс збірний і 1061-біс бортового штреків. Результати моделювання підтверджуються даними моніторингу стану кріплення. На ділянках ПК10-ПК20 за 1061-біс бортовим штреком і в районі ПК10 за 1061-біс збірним штреком загальна вертикальна конвергенція становила приблизно 0,96 м, водночас спостерігалось інтенсивне здимання порід. Моніторинг стану виробок містив у собі візуальні спостереження за поведінкою кріплення, а також періодичні маркшейдерські заміри на контурних спостережних станціях, закладених у 1061-біс бортовому штреку (ПК10 і ПК15) та у 1061-біс збірному штреку (ПК10).

Під час замірів перерізу виробки визначали загальну вертикальну конвергенцію, а також горизонтальну конвергенцію кріплення залежно від положення лави.

Систематизовані та узагальнені результати спостережень на контурних станціях за вертикальною та горизонтальною конвергенцією надано на рисунку 6.

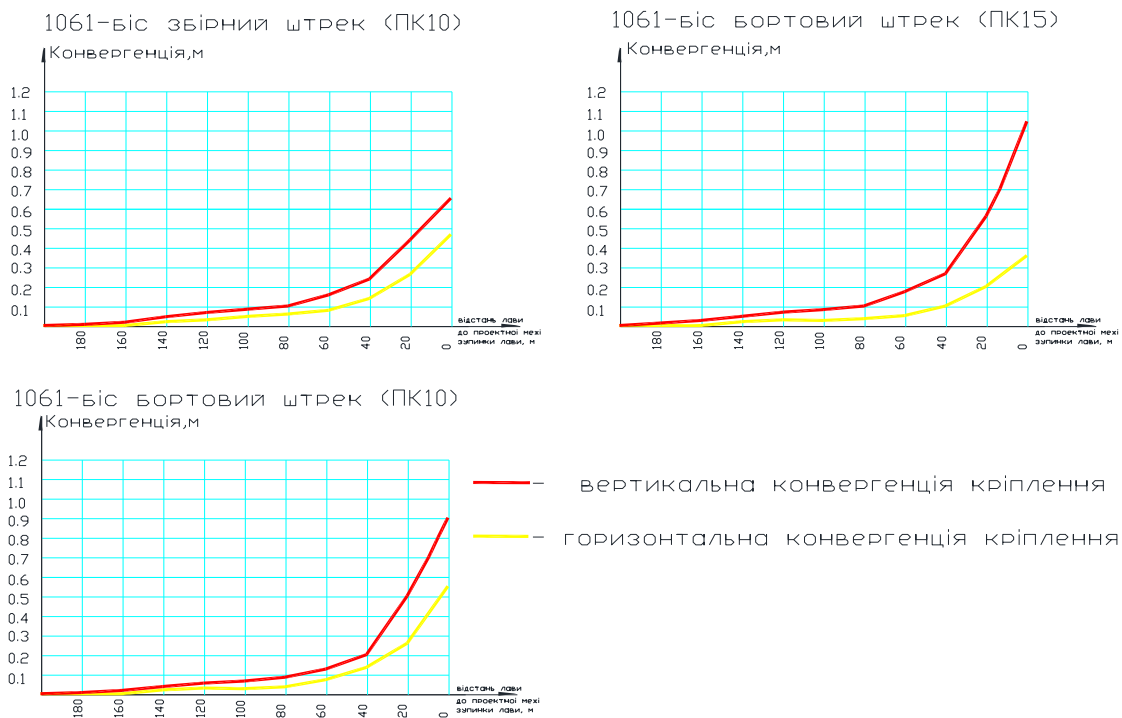
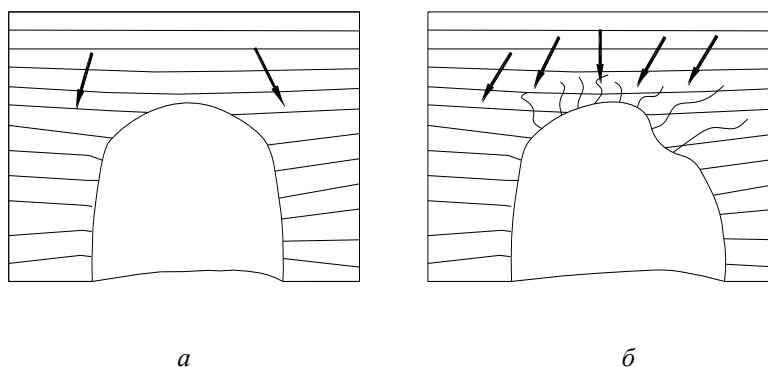


Рис. 6. Графіки вертикальної і горизонтальної конвергенції кріплення залежно від відстані до лави

Аналіз отриманих результатів конвергенції дав змогу встановити, що під час підходу лави на відстань 20 м до проектної межі зупинки кріплення деформується несуттєво, а конвергенція не перевищує фонову для цих гірничо-геологічних умов (рис. 7, а). У міру просування лави підготовчі виробки істотно деформуються внаслідок збільшення горизонтальних напружень масиву, що призводить до деформування однієї зі сторін виробки з боку лави. Принципову схему деформування виробки представлено на рисунку 7, б. Візуалізація цього процесу представлено на рисунку 9, а.



*Рис. 7. Схема деформування виробки:
а – виробка перебуває в природній рівновазі, тиск передається на стінки виробки;
б – із покрівлі виробки випадають клини, бічний тиск переважає*

На рисунку 8 наведено результати спостережень за вертикальною конвергенцією після зупинки лави залежно від часу зупинки очисного вибою. Аналіз результатів показав, що в перші 10–18 днів тиск на кріплення підготовчих виробок, а отже, і його деформація – максимальна, а починаючи з 25–30 дня спостерігається помітне загасання. При цьому підготовчі виробки на 30-й день втратили близько 60 % свого первісного перерізу (рис. 9, б), у зв'язку з чим на 45-й день після зупинки вибою 1061-біс лави розпочали роботу з відновлення кріплення деформованих ділянок виробок. Подальші спостереження за станом кріплення і приконтурного масиву гірських порід виконувати було неможливо.

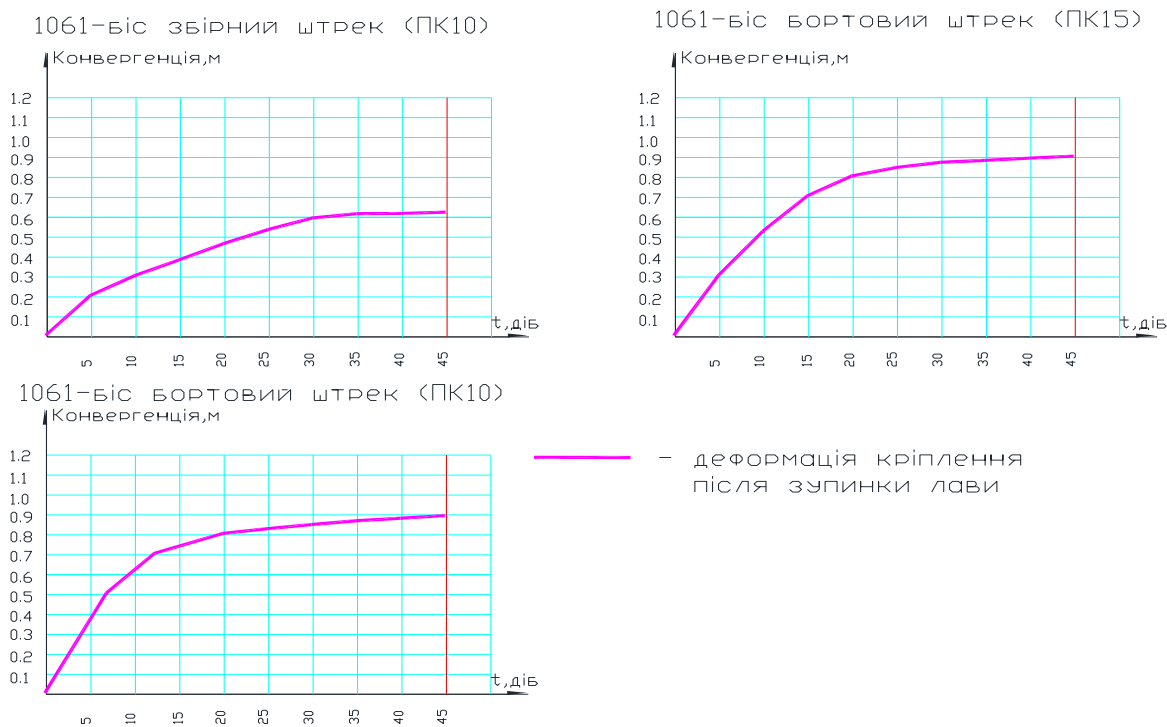


Рис. 8. Графіки вертикальних і горизонтальних деформацій кріплення залежно від часу зупинки лави

Результати моніторингу стану 1061-біс бортового і 1061-біс збірного штреків показано на рисунках 9, а–б.



Рис. 9: а) 1061-біс бортовий штрек ПК10–ПК20;
б) магістральний штрек – 1061-біс бортовий штрек ПК0

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналіз моделі напружено-деформованого стану масиву для умов відпрацювання 1061 лави пл. с₁₀ ШУ ім. Героїв Космосу ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» засвідчив, що найвища концентрація напружень у підготовчих виробках має місце за цілика, що дорівнює 25 метрів. На ділянках 1061-біс бортового і 1061-біс збірних штреків, що охороняються, згідно з даними моделювання, варто очікувати руйнування порід і, як наслідок, значних деформацій контуру виробки і кріплення. Результати моделювання підтверджуються даними моніторингу стану кріплення. На ділянках ПК10–ПК20 за 1061-біс бортовим штреком і в районі ПК10 за 1061-біс збірним штреком загальна вертикальна конвергенція становила приблизно 0,96 м, водночас спостерігалось інтенсивне здимання порід.

Таким чином, виходячи з величин вертикального навантаження на цілик, отриманих у результаті моделювання, встановлено, що для цілика, розмір якого становить 37 м, напруження по контуру підготовчих виробок такі ж, як від впливу тільки 1061-біс лави. Якщо цілик дорівнює 25 м, що відповідає фактичним його параметрам при зупинці лави, напруження в 4 рази збільшуються. Ці напруження є критичними для ділянки 1061-біс бортового і 1061-біс збірних штреків, розташованих в зоні ПГТ, що і призвело до деформацій підготовчих виробок і необхідності відновлення кріплення.

На підставі моделювання напружено-деформованого стану масиву з ув'язкою фактичного стану штреків за результатами моніторингу визначено оптимальні параметри цілика, які в умовах, що досліджуються, становлять 37 метрів.

Результати досліджень можна буде використовувати під час планування гірничих робіт з подібною гірничо-геологічною ситуацією в межах цього пласта.

Список використаної літератури:

1. Microseismic investigation of mining-induced brittle fault activation in a Chinese coal mine / G.Cheng, L.Li, W.Zhu and other // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2019. – No. 123. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104096.
2. Numerical Simulation Analysis of New Steel Sets Used for Roadway Support in Coal Mines / Q.Li, J.Li, J.Zhang and other // Metals. – 2019. – No. 9. DOI: 10.3390/met9050606.
3. Simplified Rules for the Selection of Frame Support for Roadway Workings in Hard Coal Mining Plants / K.Rulka, J.Mateja, E.Kowalski and other. – Katowice, Poland : Central Mining Institute Publishing House, 2001. – P. 1–30.
4. Study on Mechanical Properties and Application of a New Flexible Bolt / Z.Xie, N.Zhang, Q.Wei and other // Appl. Sci. – 2021. – No. 11. DOI: 10.3390/app11030924.
5. The use of steel and injection rock bolts to support mine workings when crossing tectonic faults / O.Krukovskyi, V.Krukovska, S.Kurnosov and other // IOP Conference. Series : Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1156 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/1156/1/012024.
6. Evaluation of the Effects of Yielding Rockbolts on Controlling Self-Initiated Strainbursts: A Numerical Study / J.Wang, D.B. Apel, H.Xu and other // Energies. – 2022. – No. 15. DOI: 10.3390/en15072574.
7. Šňupárek R. Stability of roadways in coalmines alias rock mechanics in practice / R.Šňupárek, P.Konečný // J. Rock Mech. Geotech. Eng. – 2010. – No. 2. – P. 281–288. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2010.00281.
8. Research on the mechanism of asymmetric deformation and stability control of near-fault roadway under the influence of mining / R.Shan, Z.Li, C.Wang and other // Eng. Fail. Anal. – 2021. – No. 127. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105492.

9. Failure Mechanism and Optimization of Arch-Bolt Composite Support for Underground Mining Tunnel / *Y.Mei, W.Li, N.Yang and other* // *Adv. Civ. Eng.* – 2020. – Vol. 2020. DOI: 10.1155/2020/5809385.
10. A combined «ground support-rock modification-destressing» strategy for 1000-m deep roadways in extreme squeezing ground condition / *H.Kang, P.Jiang, Y.Wu, F.Gao* // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2021. – No. 142. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2021.104746.
11. *Zberovskiy V.* Specifics of hydro-loosening of coal seams with account of rocks displacement parameters / *V.Zberovskiy, O.Bubnova, K.Babii* // *E3S Web Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering.* – 2018. – No. 60. DOI: 10.1051/e3sconf/20186000025.
12. Розташування, охорона та підтримання гірничих виробок під час відпрацювання вугільних пластів на шахті : методичні рекомендації. – УкрНІМІ, 1998. – 149 с.
13. Інструкція з забезпечення стійкості дільничних виробок для повторного використання на вугільних шахтах : наказ Міністерства енергетики України від 10.11.2022 року. – № 378 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ips.ligazakon.net/document/RE39001?an=20/>.
14. Вказівки з управління гірничим тиском в очисних вибоях в очисних вибоях під (над) ціликами і крайовими частинами під час розроблення свити вугільних пластів потужністю до 3,5 м з кутом падіння до 350. – Л., 1984. – 62 с.
15. Influence of mining operating conditions on fault behavior / *Z.Burtan, A.Zorychta, J.Cieślak, D.Chlebowski* // *Arch. Min. Sci.* – 2014. – No. 59. – P. 691–704. DOI: 10.2478/amsc-2014-0048.
16. Choice of the Arch Yielding Support for the Preparatory Roadway Located near the Fault / *K.Skrzypkowski, K.Zagórski, A.Zagórska and other* // *Energies.* – 2022. – No. 15. DOI: 10.3390/en15103774.
17. Stress Evolution with Time and Space During Mining of a Coal Seam / *W.Yang, B.Lin, Y.Qu and other* // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2011. – No. 48. – P. 1145–1152. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2011.07.006.
18. *Кучин О.С.* Моделювання просторового зміщення точок земної поверхні за результатами геодезичних спостережень / *О.С. Кучин, Г.В. Бруй, О.Є. Янкін* // *Просторовий розвиток : науковий збірник.* – К. : КНУБА, 2023. – Вип. 3. – С. 122–131. DOI: 10.32347/2786-7269.2023.3.122-133.
19. The relationship between lowering the Earth's surface and bearing pressure above the advancing longwall face / *O.Kuchin, H.Brui, O.Yankin, H.Ishutina* // *JGD.* – 2023. – Vol. 1, № 34. – P. 28–36. DOI: 10.23939/jgd2023.01.028.
20. Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline / *O.Bazaluk, O.Kuchyn, P.Saik and other* // *Scientific Reports.* – 2023. – No. 13. DOI: 10.1038/s41598-023-46814-5.
21. *Bubnova O.* Regularities of subsidence development during multiple underworking of the earth's surface in the Lviv-Volyn coal basin conditions / *O.Bubnova* // *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* – 2024. – Vol. 1348. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012065.
22. *Yasitli N.* 3D Numerical Modeling of Longwall Mining with Top-coal Caving / *N.Yasitli, B.Unver* // *Int J Rock Mech Min Sci.* – 2005. – Vol. 42, Issue 2. – P. 219–235. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2004.08.007.
23. *Unver B.* Modelling of Strata Movement with a Special Reference to Caving Mechanism in Thick Seam Coal Mining / *B.Unver, N.Yasitli* // *Int J Coal Geol.* – 2006. – Vol. 66, Issue 4. – P. 227–252. DOI: 10.1016/j.coal.2005.05.008.

References:

1. Cheng, G., Li, L., Zhu, W. et al. (2019), «Microseismic investigation of mining-induced brittle fault activation in a Chinese coal mine», *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, No. 123, doi: 10.1016/j.ijrmmms.2019.104096.
2. Li, Q., Li, J., Zhang, J. et al. (2019), «Numerical Simulation Analysis of New Steel Sets Used for Roadway Support in Coal Mines», *Metals*, No. 9, doi: 10.3390/met9050606.
3. Rułka, K., Mateja, J., Kowalski, E. et al. (2021), *Simplified Rules for the Selection of Frame Support for Roadway Workings in Hard Coal Mining Plants*, Central Mining Institute Publishing House, Katowice, Poland, pp. 1–30.
4. Xie, Z., Zhang, N., Wei, Q. et al. (2021), «Study on Mechanical Properties and Application of a New Flexible Bolt», *Appl. Sci.*, No. 11, doi: 10.3390/app11030924.
5. Krukovskiy, O., Krukovska, V., Kurnosov, S. et al. (2023), «The use of steel and injection rock bolts to support mine workings when crossing tectonic faults», *IOP Conference. Series. Earth and Environmental Science*, Vol. 1156 (1), doi: 10.1088/1755-1315/1156/1/012024.
6. Wang, J., Apel, D.B., Xu, H. et al. (2022), «Evaluation of the Effects of Yielding Rockbolts on Controlling Self-Initiated Strainbursts: A Numerical Study», *Energies*, No. 15, doi: 10.3390/en15072574.
7. Šňupárek, R. and Konečný, P. (2010), «Stability of roadways in coalmines alias rock mechanics in practice», *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, No. 2, pp. 281–288, doi: 10.3724/SP.J.1235.2010.00281.
8. Shan, R., Li, Z., Wang, C. et al. (2021), «Research on the mechanism of asymmetric deformation and stability control of near-fault roadway under the influence of mining», *Eng. Fail. Anal.*, No. 127, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105492.
9. Mei, Y., Li, W., Yang, N. et al. (2020), «Failure Mechanism and Optimization of Arch-Bolt Composite Support for Underground Mining Tunnel», *Adv. Civ. Eng.*, Vol. 2020, doi: 10.1155/2020/5809385.
10. Kang, H., Jiang, P., Wu, Y. and Gao, F. (2021), «A combined “ground support-rock modification-destressing” strategy for 1000-m deep roadways in extreme squeezing ground condition», *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, No. 142, doi: 10.1016/j.ijrmmms.2021.104746.
11. Zberovskiy, V., Bubnova, O. and Babii, K. (2018), «Specifics of hydro-loosening of coal seams with account of rocks displacement parameters», *E3S Web Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering*, No. 60, doi: 10.1051/e3sconf/20186000025.
12. *Roztashuvannia, okhorona ta pidtrymannia hirnychych vyrobok pid chas vidpratsiuvannia vuhilnykh plastiv na shakhti*, metodychni rekomendatsii (1998), UkrNIMI, 149 p.

13. Ministerstvo enerhetyky Ukrainy (2022), *Instruktsiia z zabezpechennia stiikosti dilnychnykh vyrobok dlia povtornoho vykorystannia na vuhilnykh shakhtakh*, Nakaz vid 10.11.2022 roku, No. 378, [Online], available at: <https://ips.ligazakon.net/document/RE39001?an=20/>
14. *Vkazivky z upravlinnia hirnychym tyskom v ochysnykh vyboiakh v ochysnykh vyboiakh pid (nad) tsilykamy i kraiovymy chastyname pid chas rozroblennia svyty vuhilnykh plastiv potuzhnistiu do 3,5 m z kutom padinnia do 35°* (1984), L., 62 p.
15. Burtan, Z., Zorychta, A., Ciešlik, J. and Chlebowski, D. (2014), «Influence of mining operating conditions on fault behavior», *Arch. Min. Sci.*, No. 59, pp. 691–704, doi: 10.2478/amsc-2014-0048.
16. Skrzypkowski, K., Zagórski, K., Zagórska, A. et al. (2022), «Choice of the Arch Yielding Support for the Preparatory Roadway Located near the Fault», *Energies*, No. 15, doi: 10.3390/en15103774.
17. Yang, W., Lin, B., Qu, Y. et al. (2011), «Stress Evolution with Time and Space During Mining of a Coal Seam», *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, No. 48, pp. 1145–1152, doi: 10.1016/j.ijrmmms.2011.07.006.
18. Kuchin, O., Brui, H. and Yankin, O. (2023), «Modeliuvannia Prostorovoho Zmishchennia Tochok Zemnoi Poverkhni za Rezultaty Heodezychnykh Sposterezen», *Prostorovy rozvytok*, naukovy zbirnyk, KNUBA, No. 3, pp. 122–131, doi: 10.32347/2786-7269.2023.3.122-133.
19. Kuchin, O., Brui, H., Yankin, O. and Ishutina, H. (2023), «The relationship between lowering the Earth's surface and bearing pressure above the advancing longwall face», *JGD*, Vol. 1, No. 34, pp. 28–36, doi: 10.23939/jgd2023.01.028.
20. Bazaluk, O., Kuchyn, O., Saik, P. et al. (2023), «Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline», *Scientific Reports*, No. 13, doi: 10.1038/s41598-023-46814-5.
21. Bubnova, O. (2024), «Regularities of subsidence development during multiple underworking of the earth's surface in the Lviv-Volyn coal basin conditions», *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, Vol. 1348, doi: 10.1088/1755-1315/1348/1/012065.
22. Yasitli, N. and Unver, B. (2005), «3D Numerical Modeling of Longwall Mining with Top-coal Caving», *Int J Rock Mech Min Sci.*, Vol. 42, Issue 2, pp. 219–235, doi: 10.1016/j.ijrmmms.2004.08.007.
23. Unver, B. and Yasitli, N. (2006), «Modelling of Strata Movement with a Special Reference to Caving Mechanism in Thick Seam Coal Mining», *Int J Coal Geol*, Vol. 66, Issue 4, pp. 227–252, doi: 10.1016/j.coal.2005.05.008.

Назаренко Валентин Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничої справи Технічного університету «Метінвест політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-7704-9270>.

Наукові інтереси:

- зрушення та деформації гірського масиву;
- маркшейдерські прилади та технології;
- маркшейдерський супровід геобудівництва.

Бруй Ганна Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої справи Технічного університету «Метінвест політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-9527-8889>.

Наукові інтереси:

- геометризація родовищ корисних копалин;
- стійкість гірничих виробок;
- сучасні методи виконання знімальних робіт.

Кучин Олександр Сергійович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри геодезії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-4031-164X>.

Наукові інтереси:

- зрушення та деформації гірського масиву;
- маркшейдерські прилади та технології;
- стійкість гірничих виробок.

Криворучко Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-3332-2631>.

Наукові інтереси:

- геометрія надр;
- видобування блочного каменю;
- геолого-економічна оцінка рудних та нерудних родовищ корисних копалин;
- захист населення в умовах надзвичайних ситуацій.

E-mail: km_ka@ztu.edu.ua.

Іськов Сергій Станіславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-9618-489X>.

Наукові інтереси:

- проектування гірничих підприємств;
- геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин;
- маркшейдерська справа.

E-mail: serga.iskov@ztu.edu.ua.

Nazarenko V.O., Brui H.V., Kuchin O.S., Kryvoruchko A.O., Iskov S.S.

Surveying monitoring of mine workings in the conditions of development of nearby coal seams, as an important element of ensuring occupational safety and protection of miners

Increasing the profitability of mining enterprises and ensuring the safety of mining works largely depend on the choice of rational and economically viable option of mining works. The search for such options, their comparison and justification have their own peculiarities in the mining of reservoir deposits. Namely, it is necessary to take into account the difference in the geometric dimensions of mine workings and the thickness of the worked seam, the influence of pillars and edge parts of adjacent seams, the presence of tectonic disturbances. These features for effective mining works require a quantitative assessment of the stressed state of the rock massif.

The purpose of this work is to study the behavior of the massif in the zones of increased mining pressure, to evaluate its stress-strain state for justification of the optimal parameters of pillars, which is a very urgent scientific task in the conditions of the adjacent seams of the Western Donbass.

Modeling of the stress-strain state of the rock massif was performed by the finite element method in Solid Works software. Tensions in the rock massif were determined at different pillar parameters from 25 to 40 meters with an interval of 2 meters.

It was found that at the pillar size of 37 meters, the stresses along the contour of the preparatory workings will be comparable to the tension from the influence of the moving face only. At the pillar size of 25 meters, equal to the size of the actually pillar, the tension is 4 times higher than in the absence of the longwall face influence. The tension is critical for the sections of preparatory drifts that fall into the zone of increased mining pressure, which will inevitably lead to significant deformations of preparatory workings and the need to reinforce them.

The work contains the results of monitoring the condition of mine workings as the longwall is approaching up to its stoppage. The analysis of conformity of modeling results with surveyor measurements of mine workings convergence and analysis of actual mine workings condition is performed.

Keywords: mine surveyor's measurement; mine workings; pillar; zone of increased rock pressure; stress-strain state; monitoring of workings.

Стаття надійшла до редакції 09.10.2024.