АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ВІДКАТНИХ ШТРЕКІВ КРУТИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ ПРИ ОХОРОНІ ЦІЛИКАМИ ВУГІЛЛЯ

І. В. Іорданов¹, О. П. Когтева², Ю. І. Сімонова², В. Ю. Довгаль³, Г. Е. Бойченко⁴,
М. О. Григорєць², І. І. Булега¹

¹ТОВ «Виробнича компанія ЕЛТЕКО», ²ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,
³Фонд державного майна України, ⁴ТОВ «Шахта «Свято-Покровская № 3»

*E-mail для листування: olha.kohtieva@donntu.edu.ua

Отримано: 08 лютого 2021; Прийнято: 25 лютого 2021

Цитувати як: Іорданов, І., Когтева, О., Сімонова, Ю., Довгаль, В., Бойченко, Г., Григорєць, М., Булега, І. Аналіз стійкості відкатних штреків крутих вугільних пластів при охороні ціликами вугілля (2021). *Проблеми охорони праці в Україні*, 37(1), 16–27.

Мета роботи – вивчення стійкості відкатних штреків крутих вугільних пластів при способі охорони ціликами вугілля. В якості методів дослідження використано комплексний підхід, що включає: натурний експеримент, аналітичні дослідження, інтерпретацію отриманих результатів. Для оцінки стійкості гірничих виробок були проведені натурні експерименти з вивчення проявів гірничого тиску у відкатних штреках при способі охорони ціликами вугілля, коли встановлювалась величина зміни площі поперечного перерізу й конвергенції бічних порід на контурі підготовчої виробки по довжині виїмкової ділянки. Зафіксовано, що при максимальній відносній деформації вугільних ціликів ($\varepsilon \approx 0,7$), втрати площі поперечного перерізу відкатних штреків на відстані $l \geq 60$ м позаду очисного забою складають більше 50 %, що не відповідає експлуатаційному стану виробок. При вивченні деформаційних властивостей охоронних споруд встановлено, що після їх деформування на 10–20 % починається наростання конвергенції бічних порід у відкатних штреках, спотворення форми та втрата несучої здатності вугільних ціликів. Спотворення форми охоронних споруд сприяє інтенсифікації зміщень покрівлі на контурі та супроводжується погіршенням стійкості відкатних штреків на виїмкових ділянках вугільної шахти. Доведено, що на крутому падінні при способі охорони відкатних штреків ціликами вугілля, зміна площі поперечного перерізу виробки відбувається за лінійною залежністю зі збільшенням довжини виїмкової ділянки за рахунок спотворення форми та втрати несучої здатності охоронних споруд. Для підвищення безпеки праці гірників на виїмкових ділянках вугільних шахт, що розробляють вугільні пласти крутого падіння, рекомендується відмовитися від способу охорони відкатних штреків ціликами вугілля. Щоб уникнути аварійних ситуацій, пов'язаних з обваленням покрівлі, представляється доцільним застосування безціликових способів охорони – податливих конструкцій або закладки виробленого простору.

Ключові слова: відкатний штрек, цілики вугілля, бічні породи, зміщення покрівлі, площа поперечного перерізу, виїмкова ділянка.

ANALYSIS OF MAINGATES STABILITY IN STEP COAL SEAMS DURING PROTECTION BY COAL PILLARS

І. Iordanov¹, O. Kohtieva², Yu. Simonova², V. Dovgal³, H. Boichenko,
M. Hryhorets², I. Buleha¹

Limited Liability Company Manufacturing Company ELTEKO,

²State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University»,

³State Property Fund of Ukraine, ⁴«Svyato-Pokrovskaya №3» MINE" LLC

*E-mail for correspondence: olha.kohtieva@donntu.edu.ua

Отримано: 08 лютого 2021; Прийнято: 25 лютого 2021

Cite as: Iordanov, I., Kohtieva, O., Simonova, Yu., Dovgal, V., Boichenko, H., Hryhorets, M., Buleha, I. (2021). Analysis of maingates stability in step coal seams during protection by coal pillars. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 37 (1), 16–27.

The purpose of the work. Studying the stability of haulage drifts of steep coal seams with the method of protecting coal by pillars. An integrated approach was used as research methods, including: a full-scale experiment, analytical studies, interpretation of the results obtained. To assess the durability of mine workings, full-scale experiments were carried out to study the manifestations of rock pressure in the haulage drifts with the method of protecting coal by pillars, when the magnitude of the change in the cross-sectional area and the convergence of side rocks on the contour of the development workings along the length of the excavation section was established. It is fixed that at the maximum relative deformation of coal pillars ($\varepsilon \approx 0,7$), the loss of the cross-sectional area of the haulage drifts at a distance of $l \geq 60$ m behind the working face is more than 50 %, which does not correspond to the operational state of the workings. When studying the deformation properties of protective structures, it was found that after their deformation by 10–20 %, an increase in the convergence of side rocks in the haulage drifts begins, a distortion of the shape and loss of the bearing capacity of coal pillars. The distortion of the shape of the security structures contributes to the intensification of the displacements of the roof on the contour and is accompanied by a deterioration in the durability of the haulage drifts in the excavation areas of the coal mine. It has been proved that on a steep drop, with the method of protecting the haulage drifts with coal pillars, the change in the cross-sectional area of the excavation occurs along a linear relationship with an increase in the length of the excavation section due to the distortion of the shape and loss of the bearing capacity of the security structures. To improve the safety of miners in the excavation areas of coal mines developed steeply falling coal seams, it is recommended to abandon the method of protecting the haulage drifts with coal pillars. To avoid emergencies associated with the collapse of the roof, it seems advisable to use purposeless methods of protection – flexible structures or backfilling of the goaf.

Key words: steep coal seam, coal pillars, lateral rocks, roof displacement, cross-sectional area, excavation area.

1. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні багато вугільних шахт, що розробляють пласти крутого падіння, відмовилися від використання

безцілікової технології відпрацювання виїмкових дільниць. Для забезпечення високих показників вуглевидобутку почали застосовувати спосіб охорони відкатних штреків ціликами вугілля. Однак практикований спосіб охорони відкатних штреків не завжди забезпечує надійний захист виробок від небезпечних проявів гірничого тиску через зміну міцностних і деформаційних властивостей вугільних ціликів. Причини, що лежать в основі ситуації яка склалася, пов'язані також із погіршенням гірничо-геологічних умов та інтенсифікацією небезпечних проявів гірничого тиску у вуглепородному масиві, що вміщує виробки.

При веденні гірничих робіт кріплення відкатних штреків деформується, а їх стан стає незадовільним. У низці шахт доводиться щорічно ремонтувати до 40 % загальної протяжності відкатних штреків. Незадовільний стан підготовчих виробок погіршує умови провітрювання виїмкової дільниці та знижує рівень безпеки гірничих робіт.

Очевидним є те, що стан підготовчих виробок на виїмкових дільницях визначає не тільки об'єм ремонтних робіт, а певною мірою впливає на роботу очисних вибоїв та підземного транспорту, а також рівень безпеки праці гірників. Тому забезпечення стійкості відкатних штреків на виїмкових дільницях вугільних шахт, що розробляють пласти крутого падіння, є однією з основних проблем підвищення техніко-економічної ефективності підземного вуглевидобутку і техніки безпеки. Використання надійних засобів і способів підтримки виробок на виїмкових дільницях, які забезпечують експлуатаційний стан відкатних штреків протягом усього терміну експлуатації, є основним завданням виробництва, вирішення якого дозволить підвищити вуглевидобуток і рівень безпеки гірничих робіт.

Досвід роботи глибоких шахт показує, що зі збільшенням глибини розробки у вуглепородному масиві починає проявлятися негативний фактор – розшарування бічних порід, що впливає на стан виробок і призводить до зростання ризику травмування гірничоробочих у результаті обвалів та обрушень [1–3]. Тому забезпечення стійкості відкатних штреків на виїмкових дільницях вугільної шахти є однією з умов гарантії високих показників вуглевидобутку та підвищення безпеки праці гірників. При поверховому способі підготовки крутих вугільних пластів та управління гірничим тиском повним обваленням покрівлі, у вуглепородному масиві, що вміщає вироблення, відбувається послідовне відділення шарів від вищерозміщеної товщі, поділ її на блоки, які хаотично переміщуються у виробленому просторі. В результаті такої взаємодії породних блоків, що утворилися, відбувається погіршення стійкості відкатних штреків [4–7].

Слід зазначити, що в умовах утворення породних блоків, обвалення можуть поширюватися на привибійний простір лави або відбуватися у виробленому просторі, створюючи динамічні навантаження на кріплення у відкатному штреку. Такий стан може сприяти завалам відкатних штреків на виїмкових дільницях та збільшенню травматизму гірників на довжині виробок.

Для того, щоб забезпечити збереження відкатних штреків в експлуатаційному стані, деякі дослідники [8] пропонують для охорони виробок використовувати цілики вугілля висотою 8 м за повстанням пласта. З переходом гірничих робіт на глибокі горизонти, пропонується збільшувати розмір надштрекових ціликів до 10–15 м [5, 9–10]. Однак це призводить до втрат вугілля на виїмкових дільницях. Більш того,

використання для охорони виробок ціликів вугілля таких розмірів підвищує концентрацію напружень у бічних породах і розширює зону їх шкідливого впливу. Раніше було встановлено [5, 11, 12], що напруження в покрівлі та підшві вугільного пласта за наявності ціликів вугілля, концентруються навколо розміщення охоронних споруд. Очевидним є те, що руйнування бічних порід завжди інтенсивніше з боку цілика.

При розробці крутих пластів, вуглепородний масив, що вміщає виробки, являє собою шари глинистого, піщано-глинистого та інших сланців, що чергуються. В таких умовах спадний порядок відпрацювання поверхів обумовлює різну схильність бічних порід до обвалення по довжині лави. На стан відкатних штреків, головним чином, впливають зрушення та зсуви бічних порід. Протистояти зсувам порід на контурі відкатного штреку в процесі підтримки, особливо в зоні впливу очисних робіт, тільки за допомогою охоронних вугільних ціликів не є можливим. Тому вивчення процесу зсувів бічних порід на контурі виробок і при цьому правильне розуміння геомеханічних процесів, які відбуваються в вуглепородному масиві, дозволить обґрунтувати вибір раціонального способу охорони виробок на виїмкових дільницях вугільної шахти.

Врахувати все різноманіття чинників, які впливають на стійкість відкатних штреків при їх охороні ціликами вугілля, практично неможливо. У цьому дослідженні, умови підтримки виробок при охороні ціликами вугілля пропонується оцінювати за зміною площі їх поперечного перерізу за довжиною виїмкової дільниці та деформаційними властивостями охоронних споруд.

2. Постановка завдання та його вирішення

Для визначення умов стійкості відкатних штреків крутих вугільних пластів необхідно виконати такі завдання досліджень:

- виконати експериментальні дослідження з вивчення проявів гірничого тиску у відкатних штреках крутих вугільних пластів при способі охорони ціликами вугілля;
- дослідити деформаційні властивості надштрекових вугільних ціликів і встановити їх вплив на стійкість відкатних штреків за довжиною виїмкової дільниці.

Матеріали і методи досліджень з вивчення стійкості відкатних штреків

Для вивчення умов підтримки відкатних штреків крутих вугільних пластів і визначення основних факторів, що впливають на їх стійкість, були проведені натурні дослідження в умовах шахти «Центральна «ДП «Торецьквугілля»¹.

Експериментальні дослідження проводилися на горизонті 1146 м у відкатних штреках пластів l_5 і l_6 при способі охорони ціликами вугілля. Для цього, на експериментальних дільницях (рис. 1) було обладнано вимірювальні станції (рисунок 2), на яких виконувалися виміри висоти та ширини виробок і зближення реперів на контурі за допомогою маркшейдерської рулетки (похибка вимірів становила ± 2 мм).

Прояви гірничого тиску у відкатних штреках у міру просування очисного вибою, вивчалися на підставі експериментальних даних, коли на замірній станції визначалася ширина B (м) і висота H (м) відкатного штреку (рисунок 2,а).

Після виконання таких вимірів, фіксувалася зміна площі поперечного перерізу відкатного штреку S (м²) (рисунок 2,а).

Дослідження деформаційних властивостей вугільних ціликів і встановлення їх впливу на стійкість штреків за

¹У проведенні експериментальних досліджень та обробці результатів брали участь: аспіранти Король А.В., Каюн О.П., Подкопаєв Є.С.)

за довжиною виїмкової ділянки здійснювалось на спеціально обладнаних станціях, на яких за контуром виробки з боку покрівлі та підшви були встановлені

Рисунок 1 – Схема експериментальної ділянки для визначення зміни площі поперечного перерізу і зсувів порід покрівлі та підшви на контурі відкатного штреку: 1 – відкатний штрек; 2 – цілики вугілля; h_c – висота цілика вугілля (м); l_c – ширина цілика вугілля, (м); ЗС – замірні станції

Гірничо-геологічні та гірничо-технічні умови експериментальних ділянок представлені в таблиці 1. Охоронні вугільні цілики мали такі розміри: висота $h_c = 8$ м; ширина $l_c = 5$ м.

Відомо [12, 13], що міцнісні та деформаційні властивості вугільних ціликів визначаються наявністю в них дефектів і їх характеристиками. Вугільні цілики є крихким тілом і класичним об'єктом лінійної механіки руйнування, коли зменшення несучої здатності слід розглядати з позиції механізму накопичення пошкоджень і поширення тріщин [13, 14].

Руйнування вугільних ціликів залежить від різних факторів, багато з яких мають випадковий характер і не завжди вивчені. У розв'язуваній задачі, в першому наближенні, руйнування вугільного цілика розглядається на основі моделі лінійно-пружного тіла [15]. В основу розрахункової схеми такої моделі покладено співвідношення між напруженнями і деформаціями [6, 14].

Для лінійно-пружного матеріалу в положенні рівноваги потенціал напруження $U_n \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right)$ чисельно дорівнює потенціалу деформацій $U_d \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right)$ і між ними існує співвідношення [12–14]

$$U_n = U_d \cdot \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} = \left(\frac{E \cdot \epsilon^2}{2} \right) \cdot \quad (1)$$

Питому потенційну енергію надштрекових вугільних ціликів при стисненні в результаті розвантаження вуглепородного масиву від напруження можна розділити на енергію зміни об'єму та енергію зміни форми. Для

репери (рисунок 2,б). За зміною відстані a-b (м) між реперами визначали конвергенцію бічних порід у відкатному штреку по довжині виїмкової ділянки.

Рисунок 2. Схема вимірювальної станції для визначення: а) зміни площі поперечного перерізу S (м^2) підготовчої виробки і б) зсувів покрівлі та підшви на контурі відкатного штреку u (мм) по довжині виїмкової ділянки l (м); H – висота виробки, м; B – ширина виробки, м; a , b – репери, $a-b$ – зсув репера b в напрямку репера a , м.

одновісного стиснення, енергія зміни об'єму $U_o \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right)$ визначається за виразом [10, 15–18]:

$$U_n = \sigma_1^2 \left(\frac{1-2 \cdot \nu}{6 \cdot E} \right) \quad (2)$$

а енергія зміни форми $U_\phi \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right)$ – за виразом [11, 12, 16]:

$$U_\phi = \sigma_1^2 \left(\frac{1+\nu}{3 \cdot E} \right) \quad (3)$$

де E – модуль пружності, МПа; ν – коефіцієнт Пуассона.

У наданих розрахунках допускається положення про те, що вугільні цілики знаходяться в стані повного зчеплення з покрівлею та підшвою вугільного пласта і руйнуються за конічною схемою. Ризик втрати несучої здатності охоронних споруд оцінювали можливістю появи магістральних тріщин у вугільних ціликах, для чого використовували поняття геометричної ймовірності [19–22]. В останній стадії руйнації, поширенню магістральних тріщин у ціликах перешкоджають торцеві конічні зони [6, 13]. Наявність таких зон обумовлює модель руйнування охоронних споруд.

Вугільний цілик досліджувався у вигляді паралелепіпеда, в об'ємі V (м^3) якого виділяли приторцеві конічні зони V_{k1} (м^3) і V_{k2} (м^3) (рис. 3). Об'єм приторцевих конічних зон у загальному об'ємі цілика визначали за виразом:

$$V_k = V_{k1} + V_{k2} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot U_{a-b}, \quad (4)$$

де S – площа поперечного перерізу цілика, м^2 ; U_{a-b} – конвергенція покрівлі та підшви на контурі відкатного штреку, м.

Таблиця 1 – Гірничо-геологічні та гірничо-технічні умови експериментальних ділень

Індекс пласта	Кут падіння α , град	Потужність, м	Бічні породи				S , м ²	Тип кріплення у штреку	Відстань між реперами	Спосіб проведення штреку	Швидкість, м/міс		Спосіб управління гірським тиском
			покрівля		грунт						Проведення штреку	Очисних робіт	
			безпосередня	основна	безпосередня	основна							
I ₅	59	0.6	Глинистий сланець	Глинистий сланець	Глинистий сланець	Пісковик, потужністю m=10 м	АП-3	0.8	БВР	14	11	Повне зрушення	
			потужністю до m=1,7–2,5 м	потужністю до m=10 м	потужністю до m=2,0 м								
I ₆	59	0.62	Глинистий сланець	Глинистий сланець	Глинистий сланець	Глинистий сланець	АП-3	0.8	БВР	12	8	Повне зрушення	
			потужністю до m=1,1 м	потужністю до m=8–10 м	потужністю до m=0,8–2,5 м	потужністю до m=2,5–4,4 м

Рисунок 3 – Розрахункова схема до визначення геометричної ймовірності $P(C)$ появи магістральних тріщин у вугільному цілику:

Ω – область, що відповідає об'єму цілика; C – область руйнування,
 V_{k1}, V_{k2} – об'єм конічних зон, m^3 ; U_{a-b} – конвергенція бічних порід, м.

Геометричну ймовірність $P(C)$ появи магістральних тріщин у цілику оцінювали таким чином. Припускали рівноможливе потрапляння випадкової точки в будь-яке місце області Ω . Виходячи з цього, ймовірність попадання в задану безліч C , відповідала відношенню об'ємів

$$P(C) = \frac{V(C)}{V(\Omega)} \quad (5)$$

Причому, об'єм заданої множини $V(C)$ визначався як

$$V(C) = V(\Omega) - V_k, \quad (6)$$

ймовірність появи магістральних тріщин у вугільному цілику визначалася за виразом

$$P(C) = 1 - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

де ε – відносна деформація цілика при стисненні, м.

Відносна деформація охоронного вугільного цілика визначалася за виразом [13]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h},$$

де Δh – зміна товщини цілика, м; h – первісна товщина цілика, м.

Слід зазначити, що параметр $h(m)$ відповідає потужності вугільного пласта, що розроблюється, а величина Δh (м) дорівнює переміщенню репера b відносно репера a , тобто значенню $U_{(a-b)}$ (м).

Вважається [6, 19], що пружна енергія прямо пропорційна об'єму вугільного цілика, а значить, встановлене значення $P(C)$ показує частину енергії, яка витрачається на руйнування охоронної споруди і появу магістральних тріщин, тобто

$$U_{\partial} = \frac{E \cdot s^2}{2} P(C). \quad (8)$$

Як показовий індикатор при аналізі стійкості відкатних штреків, з урахуванням зсувів порід і деформаційних властивостей ціликів вугілля, використовувалася величина приросту зсувів покрівлі ΔU (м) на контурі відкатних штреків у міру віддалення від

очисного вибою на відстань l (м). Величина приросту зсувів покрівлі ΔU (м) визначалася як

$$\Delta U = U_{(a-b)i} - U_{(a-b)i-1}. \quad (9)$$

Для згладжування короткострокових коливань і виявлення характерних тенденцій в змінах розглянутого параметра, застосовувався метод простої ковзної середньої [17, 24, 25] з періодом усереднення 2, тобто

$$\overline{\Delta U} = \frac{\Delta U_i - \Delta U_{i-1}}{2}. \quad (10)$$

Охоронні вугільні цілики, які призначені для підтримки бічних порід позаду очисного забою на виїмкових дільницях вугільної шахти, являють собою специфічні об'єкти. Деформаційні характеристики таких об'єктів залежать від багатьох факторів і впливають на стійкість виробок. Для того, щоб виконати аналіз стійкості відкатних штреків при охороні ціликами вугілля, необхідно сумісно розглядати питання стійкості виробок, коли фіксується зміна площі їх поперечного перерізу і працездатності охоронних споруд.

Результати досліджень прояву гірничого тиску у відкатних штреках

Результати досліджень представлені у вигляді графіків зміни площі поперечного перерізу S (m^2) відкатних штреків по довжині l (м) експериментальних дільниць (рисунок 4).

Із представлених графіків видно, що перетин відкатного штреку пласта l_5 змінюється з $S = 8,5 m^2$ на сполученні очисного забою з підготовчою виробкою до $S = 3,9 m^2$ на відстані $l = 100$ м позаду очисного забою (рисунок 4, а). Перетин відкатного штреку пласта l_6 змінюється за такою ж залежністю і на відстані $l = 100$ м становить $S = 4,1 m^2$ (рисунок 4, б).

У таблиці 2 представлені дані експериментальних замірів зміни площі поперечного перерізу відкатних штреків на виїмкових дільницях вугільної шахти.

У результаті виконаних замірів висоти H (м) і ширини B (м) виробки по довжині l (м) виїмкової дільниці було встановлено, що кріплення у відкатному штреку мало характерні вигини і деформувалося з боку покрівлі. У всіх випадках фіксувалося зменшення площі поперечного

перерізу до $S = 3,9\text{--}4,1 \text{ м}^2$, що становило втрату близько 55 %.

а)

б)

Рисунок 4 – Графіки зміни площі поперечного перерізу $S \text{ (м}^2\text{)}$ відкатного штреку по довжині експериментальної ділянки $l \text{ (м)}$ при способі охорони ціликами вугілля:

а) штрек по пласту l_5 ; б) штрек по пласту l_6 .

Таблиця 2 – Експериментальні дані вимірів зміни площі поперечного перерізу відкатних штреків

Експериментальна діляниця	Площа поперечного перерізу відкатного штреку S(м ²)		% втрат площі поперечного перерізу позаду очисного забою		
	на сполученні l = 0	Позаду очисного забою на відстані l(м)		на відстані l(м)	
		50 м	100 м	50 м	100 м
Відкатний штрек пласта l ₅	8.5	7.9	3.9	8	55
Відкатний штрек пласта l ₆	8.5	7.0	4.1	18	52

Встановимо зв'язок між довжиною підтримуваної виробки і площею поперечного перерізу $S \text{ (м}^2\text{)}$ відкатного штреку пласта l_5 на експериментальній ділянці. Відзначимо, що кореляційну залежність будемо визначати окремо для ділянок від 0 до 50 метрів і від 60 до

100 метрів. Отже на кожному з проміжків буде встановлено характеристичний коефіцієнт кореляції та побудовано відповідне рівняння регресії.

Експериментальні дані, що необхідні для розрахунків зведено в таблицю 3.

Таблиця 3 – Експериментальні дані для визначення коефіцієнта кореляції при зміні площі поперечного перерізу відкатного штреку пласта l_5

$x \text{ (l, м)}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$y \text{ (S, м}^2\text{)}$	8,5	8,4	8,2	8	7,9	7,8	6,8	6	5,9	4,1	3,9

Для розрахунку коефіцієнта кореляції застосуємо формулу [18, 21]:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{S_x \cdot S_y},$$

де $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, $\overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i$,

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\bar{x})^2}, \quad S_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\bar{y})^2}.$$

У результаті розрахунків встановлено, що коефіцієнт кореляції на відрізку від 0 до 50 м приймає значення $r = 0,99$. Так як значення r близьке до одиниці, то між експериментальними даними має місце сильна

кореляційна залежність, яка є практично лінійною. Отже розглянутий зв'язок може бути апроксимований прямою лінією регресії, яка отримана за допомогою методу найменших квадратів [20, 25]. Рівняння регресійного зв'язку має вигляд

$$y = -0.0149 \cdot x + 8.5048.$$

Застосовуючи аналогічні судження, отримаємо рівняння лінійної регресії на проміжку від 60 до 100 метрів (рисунок 5а).

Аналогічно, отримаємо залежність між довжиною експериментальної ділянки $l \text{ (м)}$ і площею поперечного перерізу $S \text{ (м}^2\text{)}$ відкатного штреку пласта l_6 при охороні ціликами вугілля. Дані експериментальних досліджень представлені в таблиці 4.

Після обробки експериментальних даних (таблиця 4) рівняння регресії приймають вигляд:

- для проміжків 0–20 м

$$y = -0.06 \cdot x + 8.6 \text{ при } r = 0.96;$$

- для проміжків 20–50 м

$$y = -0.01 \cdot x + 7.5 \text{ при } r = 1.0;$$

- для проміжків 60–100 м

$$y = -0.047 \cdot x + 9.02 \text{ при } r = 0.97.$$

Таблиця 4 – Експериментальні дані для визначення коефіцієнта кореляції при зміні площі поперечного перерізу відкатного штреку пласта l_6

$x (l, \text{м})$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$y (S, \text{м}^2)$	8,5	8,2	7,3	7,2	7,1	7	6,1	5,9	5,1	5	4,2

На рисунку 5 представлені графіки, що відображають регресійний зв'язок між довжиною l (м) відкатного штреку

і зміною площі поперечного перерізу S (м²).

Рисунок 5 – Графіки, що відображають регресійний зв'язок між довжиною l (м) відкатного штреку і зміною площі поперечного перерізу S (м²):

а) експериментальної ділянки за пластом l_5 ;

б) експериментальної ділянки за пластом l_6 ;

I, II, III – інтервали по довжині виїмкової ділянки, на яких спостерігається лінійна кореляція;

1, 2 – точки, в яких відбувається втрата стійкості ціликів

Із графіків (рисунок 5) видно, що зміна площі поперечного перерізу відкатного штреку пласта l_5 відбувається за лінійною залежністю на ділянках I = 0–50 м, II = 50–10 м (рисунок 5,а); для відкатного штреку пласта l_6 зміна площі поперечного перерізу відбувається за лінійною залежністю на ділянках I = 0–20 м, II = 20–50 м, III = 50–100 м. На цих ділянках зафіксовано спотворення форми ціликів. В т.1, 2 відбувається втрата несучої здатності охоронних споруд.

Результати досліджень деформаційних властивостей вугільних ціликів

За результатами натурних досліджень були побудовані графіки зсувів U_{a-b} (м) бічних порід на контурі відкатних штреків за довжиною l (м) виїмкової ділянки (рисунок 6).

При проведенні натурних вимірювань основна увага приділялася конвергенції бічних порід на контурі виробок у міру посування очисного вибою.

Із рисунку 6,а видно, що зміщення реперів а-б (м) на контурі відкатного штреку пласта l_5 ростуть у міру збільшення довжини l (м) експериментальної ділянки.

Зафіксовано, що на відстані $l = 100$ м позаду очисного забою, зближення реперів складо $U_{a-b} = 420$ мм. На контурі відкатного штреку пласта l_6 , зближення реперів на відстані $l = 100$ м складо $U_{a-b} = 460$ мм (рисунок 6,б).

У таблиці 5 наведено значення геометричної імовірності $P(C)$ появи магістральних тріщин у вуглепородному цілику від величини ϵ відносної деформації при стисненні для відкатних штреків пластів l_5 і l_6 .

Із таблиці 5 випливає, що для відкатного штреку пласта l_5 при відносній деформації $\epsilon = 0,08$ надштрекового вугільного цілика, імовірність появи магістральних тріщин дорівнює $P(C) = 0,98$.

Для відкатного штреку пласта l_6 , імовірність появи магістральних тріщин в цілику при $\epsilon = 0,13$ становить $P(C) = 0,96$ (таблиця 3).

На рисунку 7 представлені графіки зміни питомих потенційних енергій вугільних ціликів, які використовуються для охорони відкатних штреків пласта l_5 і l_6 за довжиною виїмкової ділянки.

Із наведених залежностей видно, що питома потенційна енергія вугільних ціликів зростає в міру збільшення довжини відкатного штреку. При цьому, кількість питомої потенційної енергії, яка йде на зміну об'єму цілика значно менша, ніж на зміну форми (рисунок

7 а, б). Безумовно, що для охоронних вугільних ціликів відкатних штреків пласта l_5 і l_6 , від загальної кількості питомої потенційної енергії при стисненні, 17 % припадає на зміну об'єму і 83 % – на зміну форми охоронних споруд (рисунок 7 а, б).

Рисунок 6 – Графіки зсувів порід покрівлі U (мм) на контурі відкатного штреку при способі охорони ціликами вугілля за довжиною експериментальної ділянки l (м): а) штрек за пластом l_5 ; б) штрек за пластом l_6 .

Таблиця 5 – Значення геометричної імовірності $P(C)$ появи магістральних тріщин у надштрековому вугільному цілику від величини ε його відносної деформації при стисненні

Пласта l_5										
ε	0,08	0,15	0,2	0,32	0,35	0,48	0,52	0,58	0,66	0,73
$P(C)$	0,98	0,95	0,93	0,9	0,88	0,83	0,82	0,8	0,77	0,75
Пласта l_6										
ε	0,13	0,14	0,17	0,24	0,35	0,45	0,61	0,63	0,66	0,79
$P(C)$	0,96	0,95	0,94	0,92	0,88	0,85	0,8	0,79	0,78	0,72

Рисунок 7 – Графіки змін питомих потенційних енергій надштрекових вугільних ціликів при зміні їх об'єму $U_o(\frac{Дж}{м^3})$ і форми $U_\phi(\frac{Дж}{м^3})$ за довжиною відкатних штреків:

а) за пластом l_5 ; б) за пластом l_6 ; 1 – $U_o(\frac{Дж}{м^3})$; 2 – $U_\phi(\frac{Дж}{м^3})$

У таблиці 6 наведено дані моделювання стійкості вугільних ціликів, що враховують зміну величини питомих потенційних енергій напруження і деформацій за довжиною відкатного штреху.

Із таблиці 6 видно, що різниця між величиною питомої потенційної енергії напруження $U_H(\frac{Дж}{м^3})$ і деформацій

$U_D(\frac{Дж}{м^3})$ у моделі складає 4 % при $l = 10$ м і збільшується до 25 % при $l = 100$ м. Різницю між цими величинами можна віднести до дисипації енергії при руйнуванні вугільних ціликів.

Таблиця 6 – Дані моделювання стійкості вугільних ціликів з урахуванням зміни величини питомих потенційних енергій напруження $U_H(\frac{Дж}{м^3})$ і деформацій $U_D(\frac{Дж}{м^3})$ за довжиною відкатного штреху

Пласт	Відстань від очисного забою l , м	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
l_5	$U_H \cdot 10^6, \frac{Дж}{м^3}$	0	10,6	37,1	53,5	112	202	349	413	517	719	832
	$U_D \cdot 10^6, \frac{Дж}{м^3}$	0	10,2	35,3	50,3	102	178	293	342	419	561	632
l_6	$U_H \cdot 10^6, \frac{Дж}{м^3}$	0	12,6	30,4	44,8	130	169	248	403	452	696	804
	$U_D \cdot 10^6, \frac{Дж}{м^3}$	0	12,2	28,9	42,1	117	150	213	335	371	536	611

На рисунку 8 представлені графіки зміни приросту зсувів ΔU (м) покрівлі на контурі відкатних штрехів від відносної деформації ϵ надштрехових ціликів вугілля.

Із наведених графіків видно, що вугільні цілики деформуються в міру розвантаження вуглепородного масиву, коли відстань між реперами а-б зменшується. На початковому етапі деформування (ділянка АВ, рисунок 8), охоронні споруди працюють в режимі опору, що наростає. Величина приросту зсувів покрівлі при цьому

зменшується з $\Delta U = 0,045$ м до $\Delta U = 0,028$ м у діапазоні $\epsilon = 0,15-0,18$ для вугільного цілика пласта l_5 (рисунок 8, а) і з $\Delta U = 0,044$ м до $\Delta U = 0,03$ м при $\epsilon = 0,14-0,17$ для вугільного цілика пласта l_6 (рисунок 8, б). У міру розвитку процесу утворення тріщин, цілики починають втрачати несучу здатність, що при збільшенні конвергенції бічних порід, характеризується збільшенням приросту зсувів ΔU (ділянка В-С на рисунку 8 а, б).

а)

б)

Рисунок 8 – Графіки зміни приросту зсувів ΔU (м) на контурі відкатних штрехів від відносної деформації ϵ надштрехових ціликів вугілля:

а) відкатний штрех пласта l_5 ; б) відкатний штрех пласта l_6 ;

1 – зміна приросту зсувів ΔU покрівлі на контурі відкатного штреху; 2 – змінна ковзна середня

При максимальних значеннях відносної деформації ϵ вугільних ціликів, значення приросту зсувів покрівлі на контурі виробок складають $\Delta U = 0,06$ м, коли $\epsilon = 0,71$ для відкатного штреху пласта l_5 (рисунок 8,а) і $\Delta U = 0,043$ м при $\epsilon = 0,72$, для відкатного штреху пласта l_6 (рисунок 8,б). Подальше деформування ціликів призводить до їх повного руйнування і часткового висипання з втратою

несучої здатності і опору зсувам бічних порід на контурі виробки.

Обговорення результатів досліджень стійкості відкатних штрехів

У результаті проведених досліджень виконано аналіз стійкості відкатних штрехів крутих вугільних пластів при

охороні ціликами вугілля. Встановлено, що в реальних умовах розробки крутих вугільних пластів, вугільні цілики обмежених розмірів ($h_y = 8$ м, $l_y = 5$ м) не здатні запобігти негативним наслідкам гірничого тиску, які проявляються у відкатних штреках за довжиною виїмкової дільниці.

При проведенні шахтних вимірів на експериментальних дільницях (рисунок 1), коли фіксувалася зміна висоти і ширини виробок (рисунок 2,а) зафіксовано, що втрата площі поперечного перерізу відкатних штреків на відстані $l \geq 60$ м становила близько 50 % (рисунок 4 а, б). Перетин штреків на відстані $l = 100$ м позаду очисного забою зменшився до $S = 3,9-4,1$ м² (таблиця 2). Кріплення у відкатних штреках деформувалися в основному з боку покрівлі та мали характерні вигини. Після обробки експериментальних даних зміни площі поперечного перерізу відкатних штреків за довжиною виробки (рисунок 4 а, б) було встановлено регресійний зв'язок з високим коефіцієнтом кореляції $r = 0,96-0,97$ між довжиною і площею поперечного перерізу (рисунок 5).

Для дослідження деформаційних властивостей вугільних ціликів використовували результати вимірів конвергенції бічних порід за довжиною виробок (рисунок 2,б). Цілики розглядали у вигляді моделі лінійно-пружного тіла (рисунок 3). У такій моделі граничний стан рівноваги надштрекових охоронних споруд забезпечувався за однакової кількості питомих потенціалів напруження і деформацій (вир. 1). При визначенні величини зсувів бічних порід на контурі відкатних штреків (рисунок 6) було визначено, що зміна об'єму (вир. 2) і форми (вир. 3) вугільних ціликів, є причиною наростання конвергенції бічних порід по довжині штреків. Після обробки експериментальних даних по довжині виїмкової дільниці були встановлені точки (1, 2, 3), в яких відбувалась втрата несучої здатності вугільних ціликів (рисунок 5а,б).

Для аналізу стійкості відкатних штреків використовували залежності, що відображають зміну приросту зсувів покрівлі від відносної деформації охоронних споруд (вир. 9, 10, рисунок 8). Аналіз таких залежностей вказує на те, що після деформування охоронних ціликів на 10–20 % відбувається втрата їх стійкості. Лінійне зростання зсувів покрівлі та зменшення опору ціликів зафіксували на відстані $l \geq 30$ м позаду очисного забою (рисунок 6). При деформації ціликів на 50–60 %, відбувається остаточна втрата їх несучої здатності і останні припиняють підтримувати бічні породи у виробленому просторі. Через конвергенцію бічних порід і появи в цілику магістральних тріщин, відбувається зміна об'єму і форми охоронних споруд. Імовірність появи магістральних тріщин становить $P(C) = 0,95-0,97$ при відході очисного забою від вимірювальної станції на 5–10 м в сторону виробленого простору (таблиця 5). Вираз (7) дозволяє встановити

імовірність появи магістральних тріщин руйнування в ціликах в період експлуатації виробок.

Таким чином, на підставі виконаних досліджень можна зробити висновок, що охорона відкатних штреків ціликами вугілля, тобто жорсткими і одночасно крихкими охоронними спорудами при розробці крутих вугільних пластів на великих глибинах, малоефективна. Забезпечити стійкість виробок на виїмкових дільницях можливо в тому випадку, коли обмежуються переміщення бічних порід над штреком деяким допустимим значенням зміщень вуглепородного масиву. У цьому випадку забезпечується розвантаження бічних порід від напруження. Щоб уникнути аварійних ситуацій, пов'язаних з обваленням і обрушенням бічних порід, представляється доцільним використання безціликових способів охорони. До таких способів слід відносити використання податливих конструкцій або закладки виробленого простору породою.

Висновки

1. При вивченні проявів гірського тиску у відкатних штреках при їх охороні ціликами вугілля встановлено, що зменшення площі поперечного перерізу виробок відбувається за лінійною залежністю зі збільшенням довжини виїмкової дільниці. В зоні впливу очисних робіт на відстані $l \geq 60$ м позаду очисного забою, зменшення площі поперечного перерізу відкатного штреку на 50 % і більше від початкового значення, відбувається за рахунок спотворення форми та втрати несучої здатності вугільного цілика. В таких умовах не забезпечується експлуатаційний стан виробок та знижується рівень безпеки гірничих робіт.

2. При вивченні деформаційних особливостей надштрекових вугільних ціликів встановлено, що після їх деформування на 10–20 % починається зростання конвергенції бічних порід на контурі виробки. Причому зближення покрівлі та ґрунту відбувається за лінійною залежністю і призводить до спотворення форми і втрати несучої здатності вугільного цілика. За відсутності обмеження зміщень бічних порід над штреком, зберегти експлуатаційний стан виробок неможливо. Забезпечити експлуатаційний стан відкатних штреків і безпечність робіт на виїмковій дільниці можна за наявності стійких і податливих охоронних споруджень, що розміщені над виробкою у виробленому просторі.

Подяка авторів

Автори висловлюють подяку адміністрації та фахівцям організацій, які вони представляють, за надання можливості та сприяння у проведенні досліджень.

Конфлікт інтересів

У авторського колективу немає конфліктів інтересів, пов'язаних з цим дослідженням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Николин, В. И., Подкопаев, С. В., Агафонов, А. В., Малеев, Н. В. (2005). Снижение травматизма от проявлений горного давления. Донецк : Норд-Пресс, 332 с.
2. Левкин, Н. Б. (2002). Предупреждение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины. Донецк: Донбасс, 396 с.
3. Левкин, Н. Б., Кузьменко, Н. С. (2003). Особенности обвалов и обрушений в очистных забоях. *Геотехническая механика*: Межвед. сб. научн. тр. Вып. 41 / ИГТМ НАН Украины. Днепрпетровск, 31–35.
4. Podkopaiev, S., Gogo, V., Yefremov, I., Kipko, O., Iordanov, I., Simonova, Yu. (2019). PHENOMENA OF STABILITY OF THE COAL SEAM ROOF WITH A YIELDING SUPPORT. *Mining of Mineral Deposits*. Vol. 13 Issue 4, 28–41, <https://doi.org/10.33271/mining13.04.028>
5. Селезень, А. Л., Томасов, А. Г., Андрушко, В. Ф. (1977). Поддержание подготовительных выработок при разработке крутых пластов. Москва : Недра, 205 с.

6. Викторов, С. Д., Гончаров, С. А., Иофис, М. А., Закалинский, В. М. (2019). Механика сдвижения и разрушения горных пород. Ин-т проблем компл. освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова. РАН. Москва: РАН, 360 с. ISBN 978-5-907036-13-0. URL: <http://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=96c79def-d4aa-4145-9116-53f6ac414ebc>
7. Жуков, В. Е. (2001). Об одной стратегической ошибке в разрешении проблемы разработки крутых пластов. *Уголь Украины*. №7. 6–10.
8. Liashok, Ya., Iordanov, I., Chepiga, D., Podkopaiev, S. (2018). Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*. Vol. 12, Issue 4, 9–19. doi: 10.1547// mining 12.04.009. URL: http://mining.in.ua/2018vol12_4_2.htm
9. Власенко, Д. С., Родичев, А. С. (2014). Определение интенсивности горного давления при охране выработок целиками шириной менее 15 м. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. № 3, 135–139. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-intensivnosti-gornogo-davleniya-pri-ohrane-vyrabotok-tselikami-shirinoy-menee-15-m/viewer>
10. Iordanov, I., Novikova, Yu., Simonova, Yu., Korol, A., Podkopaiev, Ye., Kayun, O., Dovgal, V., Boychenko, H., Hryhorets, M. (2020). Determining stability conditions for haulage drifts protected by coal pillars. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 6/1 (108). 72–81. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216530
11. Hartman, H. L. (1987). Introductory Mining Engineering. Wiley, Interscience Publication., 622 p.
12. Кошелев, К. В., Петренко, Ю. А., Новиков, А. О. (1990). Охрана и ремонт горных выработок. Москва: Недра, 256 с.
13. Шашенко, А. Н., Пустовойтенко, В. П., Сдвижкова, Е. А. (2016). Геомеханика. Киев: Новый друк, 528 с. ISBN 978-617-635-088-0
14. Черняев, В. И. (1987). Расчет напряжений и смещений пород при разработке свиты пластов. Киев: Техника, 148 с.
15. Стуржанов, В. В., Бурмашева, Н. В. (2019). Теория упругости: основание положения. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 204 с. ISBN 978-5-7996-2541-2. URL : <http://elar.urfu.ru/handle/10995/68501>
16. Мешков, Ю. Я. (2001). Концепция критической плотности энергии в моделях разрушения твердых тел. *Успехи физ. мет./ Usp.Fiz.Met.*, т. 2., 7–50. URL: <https://ufm.imp.kiev.ua/ru/abstract/v02/i01/007.html>
17. Кочергаров, Г. Г. (2007). Энергия и механизм квазимикрoplastической деформации твердых тел. *Письма в ЖТФ*, том 26, Вып.11, 41–46.
18. Sadd, M. H. (2014). Elasticity: Theory, Applications, and Numerics. 3rd Ed. Academic Press, Elsevier. ISBN: 978-0-12-408136-9. URL: <https://www.twirpx.com/file/1362060/>
19. Семенов, В. А. (2013). Теория вероятности и математическая статистика. Санкт-Петербург: Питер, 192 с. ISBN 978-5-496-00120-5. URL: https://www.studmed.ru/semenov-v-a-teoriya-veroyatnostey-i-matematicheskaya-statistika_11044b029e5.html
20. Свешников, А. (2012). Прикладные методы теории вероятности. Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 480 с. ISBN 978-5-8114-1219-8. URL: <https://e.lanbook.com/book/3184>
21. Ahn, H. (Ed.) (2017). Probability and Statistics for Science and Engineering with Examples in R. USA: Cognella Inc. 337 p. ISBN 1496374959. URL: <https://www.twirpx.com/file/2661680/>
22. Akanbay, N. (2020). Probability theory and mathematical statistics. Book 1. Almaty: Qazaq University, 359 p. ISBN 978-601-04-4563-5. URL: <https://www.twirpx.com/file/3332504/>
23. Taboga, M. (2017). Lectures on Probability Theory and Mathematical Statistics - 3rd Edition. CreateSpace Independent Publishing Platform, p. 670. URL: <https://www.amazon.com/Lectures-Probability-Theory-Mathematical-Statistics/dp/1981369198>
24. Полянский, А. Д., Зайцев, В. Ф. (2018). Справочник по нелинейным уравнениям математической физики. Москва: Физматлит, 688 с. ISBN 978-5-457-96-5904. URL: <https://www.twirpx.com/file/114870/>
25. Боровков, А. (2010). Математическая статистика. Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 704 с. ISBN 978-5-8114-1013-2. URL: <https://e.lanbook.com/book/3810>

REFERENCES

1. Nikolin, V. I., Podkopaiev, S. V., Agafonov, A. V., Maleev, N. V. (2005). Snizhenie travmtizma ot proyavleniy gornogo davleniya. Donetsk : Nord-Press, 332 с.
2. Levkin, N. B. (2002). Preduprezhdenie avariy i travmatizma v ugovnyih shahtah Ukrainyi. Donetsk: Donbass, 396 с.
3. Levkin, N. B., Kuzmenko, N. S. (2003). Osobennosti obvalov i obrusheniy v ochistnyih zaboyah. Geotekhnicheskaya mehanika: Mezhd. sb. nauchn. tr. Vyip. 41 / IGTM NAN Ukrainyi. Dnepropetrovsk, 31–35.
4. Podkopaiev, S., Gogo, V., Yefremov, I., Kipko1, O., Iordanov, I., Simonova, Yu. (2019). PHENOMENA OF STABILITY OF THE COAL SEAM ROOF WITH A YIELDING SUPPORT. *Mining of Mineral Deposits*. Vol. 13 Issue 4, 28–41, <https://doi.org/10.33271/mining13.04.028>
5. Selezen, A. L., Tomasov, A. G., Andrushko, V. F. (1977). Podderzhanie podgotovitelnyih vyirabotok pri razrabotke krutyih plastov. Moskva : Nedra, 205 s.
6. Viktorov, S. D., Goncharov, S. A., Iofis, M. A., Zakalinskiy, V. M. (2019). Mehanika sdvizheniya i razrusheniya gorniyh porod. In-t problem kompl. osvoeniya neдр im. akad. N. V. Melnikova. RAN. Moskva: RAN, 360 с. ISBN 978-5-907036-13-0. URL: <http://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=96c79def-d4aa-4145-9116-53f6ac414ebc>
7. Zhukov, V. E. (2001). Ob odnoy strategicheskoy oshibke v razreshenii problemy razrabotki krutyih plastov. Ugol Ukrainyi. № 7. 6–10.
8. Liashok, Ya., Iordanov, I., Chepiga, D., Podkopaiev, S. (2018). Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*. Vol. 12, Issue 4, 9–19. doi: 10.1547// mining 12.04.009. URL: http://mining.in.ua/2018vol12_4_2.html
9. Vlasenko, D. S., Rodichev, A. S. (2014). Opredelenie intensivnosti gornogo davleniya pri ohrane vyirabotok tselikami shirinoy menee 15 m. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. № 3, 135–139. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-intensivnosti-gornogo-davleniya-pri-ohrane-vyrabotok-tselikami-shirinoy-menee-15-m/viewer>

10. Iordanov, I., Novikova, Yu., Simonova, Yu., Korol, A., Podkopyayev, Ye., Kayun, O., Dovgal, V., Boychenko, H., Hryhorets, M. (2020). Determining stability conditions for haulage drifts protected by coal pillars. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 6/1 (108). 72–81. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216530
11. Hartman, H. L. (1987). *Introductory Mining Engineering*. Wiley, Interscience Publication., 622 p.
12. Koshelev, K. V., Petrenko, Yu. A., Novikov, A. O. (1990). *Ohrana i remont gorniyh vyirabotok*. Moskva: Nedra, 256 s.
13. Shashenko, A. N., Pustovoytenko, V. P., Sdvizhikova, E. A. (2016). *Geomehanika*. Kiev: Novyyi druk, 528 s. ISBN 978-617-635-088-0
14. Chernyaev, V. I. (1987). *Raschet napryazheniy i smescheniy porod pri razrabotke svityi plastov*. Kiev: Tehnika, 148 s.
15. Sturzhanov, V. V., Burmasheva, N. V. (2019). *Teoriya uprugosti: osnovanie polozheniya*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 204 s. ISBN 978-5-7996-2541-2. URL : <http://elar.urfu.ru/handle/10995/68501>
16. Meshkov, Yu. Ya. (2001). Kontseptsiya kriticheskoy plotnosti energii v modelyah razrusheniya tverdyih tel. *Uspehi fiz. met./ Usp.Fiz.Met.*, t. 2., 7–50. URL: <https://ufm.imp.kiev.ua/ru/abstract/v02/i01/007.html>
17. Kochergarov, G. G. (2007). Energiya i mehanizm kvazimikroplasticheskoy deformatsii tverdyih tel. *Pisma v ZhTF*, tom 26, Vyip.11, 41–46.
18. Sadd, M. H. (2014). *Elasticity: Theory, Applications, and Numerics*. 3rd Ed. Academic Press, Elsevier. ISBN: 978-0-12-408136-9. URL: <https://www.twirpx.com/file/1362060/>
19. Semenov, V. A. (2013). *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika*. Sankt-Peterburg: Piter, 192 s. ISBN 978-5-496-00120-5. URL: https://www.studmed.ru/semenov-v-a-teoriya-veroyatnostey-i-matematicheskaya-statistika_11044b029e5.html
20. Sveshnikov, A. (2012). *Prikladnyie metodyi teorii veroyatnosti*. Sankt-Peterburg: Izd-vo Lan, 480 s. ISBN 978-5-8114-1219-8. URL: <https://e.lanbook.com/book/3184>
21. Ahn, H. (Ed.) (2017). *Probability and Statistics for Science and Engineering with Examples in R*. USA: Cognella Inc. 337 p. ISBN 1496374959. URL: <https://www.twirpx.com/file/2661680/>
22. Akanbay, N. (2020). *Probability theory and mathematical statistics. Book 1*. Almaty: Qazaq University, 359 p. ISBN 978-601-04-4563-5. URL: <https://www.twirpx.com/file/3332504/>
23. Taboga, M. (2017). *Lectures on Probability Theory and Mathematical Statistics - 3rd Edition*. CreateSpace Independent Publishing Platform, p. 670. URL: <https://www.amazon.com/Lectures-Probability-Theory-Mathematical-Statistics/dp/1981369198>
24. Polyanskiy, A. D., Zaytsev, V. F. (2018). *Spravochnik po nelineynim uravneniyam matematicheskoy fiziki*. Moskva: Fizmatlit, 688 s. ISBN 978-5-457-96-5904. URL: <https://www.twirpx.com/file/114870/>
25. Borovkov, A. (2010). *Matematicheskaya statistika*. Sankt-Peterburg: Izd-vo Lan, 704 s. ISBN 978-5-8114-1013-2. URL: <https://e.lanbook.com/book/3810>

И. Иорданов, О. Когтева, Ю.Симонова, В. Довгаль, Г. Бойченко, М. Григорец, И. Булега

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКАТОЧНЫХ ШТРЕКОВ КРУТЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПРИ ОХРАНЕ ЦЕЛИКАМИ УГЛЯ

Цель работы. Изучение устойчивости откаточных штреков крутых угольных пластов при способе охраны целиками угля. Методы. В качестве методов изучения использован комплексный подход, включающий: натурный эксперимент, аналитические исследования, интерпретация полученных результатов. Результаты. Для оценки стойкости горных выработок были проведены натурные эксперименты по изучению проявлений горного давления в откаточных штреках при способе охраны целиками угля, когда устанавливалась величина изменения площади поперечного сечения и конвергенции боковых пород на контуре подготовительной выработки по длине выемочного участка. Зафиксировано, что при максимальной относительной деформации угольных целиков ($\varepsilon \approx 0,7$), потери площади поперечного сечения откаточных штреков на расстоянии $l \geq 60$ м позади очистного забоя составляют более 50 %, что не соответствует эксплуатационному состоянию выработок. При изучении деформационных свойств охранных сооружений установлено, что после их деформирования на 10–20 % начинается нарастание конвергенции боковых пород в откаточных штреках, искажение формы и потеря несущей способности угольных целиков. Искажение формы охранных сооружений способствует интенсификации смещений кровли на контуре и сопровождается ухудшением стойкости откаточных штреков на выемочных участках угольной шахты. Новизна. Доказано, что на крутом падении при способе охраны откаточных штреков целиками угля, изменение площади поперечного сечения выработки происходит по линейной зависимости с увеличением длины выемочного участка за счет искажения формы и потери несущей способности охранных сооружений. Практическая значимость. Для повышения безопасности труда горняков на выемочных участках угольных шахт, разрабатываемых угольные пласты крутого падения, рекомендуется отказаться от способа охраны откаточных штреков угольными целиками. Чтобы избежать аварийных ситуаций, связанных с обрушением кровли, представляется целесообразным использование бесцеликовых способов охраны – податливых конструкций или закладки выработанного пространства.

Ключевые слова: откаточный штрек, целики угля, боковые породы, смещение кровли, площадь поперечного сечения, выемочный участок.