

УДК 622.83:622.272.3:622.268.6

doi: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-58-71>

С.Г. Негрій
Т.О. Негрій
І.О. Єфремов

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОКРЕМО РОЗТАШОВАНИХ ПОРОДНИХ ОПОР З КОМПЕНСАЦІЙНИМИ ПОРОЖНИНАМИ

Мета: визначення параметрів окремо розташованих породних опор з компенсаційними порожнинами.

Методика: Аналіз технологій охорони підготовчих виробок, що ґрунтуються на управлінні напружено-деформованим станом порід навколо гірничих виробок, фізичне моделювання з використанням еквівалентних матеріалів, чисельне моделювання методом скінчених елементів, методи будівельної механіки.

Результати: в умовах слабких порід підповерх обґрунтовано доцільність застосування засобів охорони, заснованих на управлінні напружено-деформованим станом у навіколишньому масиві та переспрямуванні видавлюючих зусиль від виробки. На основі аналізу існуючих заходів охорони виробок позаду лав доведена перспективність використання технологій охорони зі спорудженням окремо розташованих породних опор з обмежуючими поверхнями, між якими залишаються компенсаційні порожнини. Для визначення параметрів таких опор та порожнин між ними в умовах слабких порід підповерх виконано комплекс лабораторних та чисельних досліджень. За їх результатами встановлено, що для забезпечення переспрямування видавлюючих зусиль від виробки необхідно споруджувати породні опори з обмежуючими поверхнями у формах: прямокутних паралелепіпедів з орієнтацією їх більшою стороною основи перпендикулярно поздовжній осі виробки та трапецієподібних призм з орієнтацією їх вузькою бічною гранню до виробки. Сформульовано рекомендації щодо параметрів даних споруд та компенсаційних порожнин між ними в умовах слабких порід підповерх.

Наукова новизна: на основі чисельного моделювання досліджено закономірності розподілу напружень в породах під окремо розташованими породними опорами різної форми, що дозволило обґрунтувати параметри останніх та компенсаційних порожнин між ними для забезпечення стійкості виробок в умовах слабких порід підповерх.

Практичне значення: доведена доцільність застосування в умовах слабких порід підповерх технологій охорони підготовчих виробок позаду лав окремо розташованими породними опорами з обмежуючими поверхнями, між якими залишаються компенсаційні порожнини, визначено їх параметри.

Ключові слова: засіб охорони, видавлювання порід підповерх, породні опори з обмежуючими поверхнями, компенсаційні порожнини, моделювання, параметри технологій.

Вступ.

Вугільна промисловість України впродовж багатьох десятиків років залишається однією з ключових галузей економіки, оскільки вугілля є стабільною основою для виробництва електроенергії, палива, продукції хімічної галузі, виплавки металу тощо. Крім того, дана галузь є містоутворюючою для багатьох монофункціональних міст вуглевидобувних басейнів тощо [1]. Незважаючи на те, що останнім часом прослідковується тенденція до зменшення обсягів споживання вугілля та переходом до альтернативних джерел енергії, вугілля не втратить свою актуальність і має для України стратегічне значення. Зупинка його видобутку матиме складні, майже неподолані на певних територіях, наслідки економічного, соціального та екологічного характеру [2]. Вугільна галузь має великі перспективи розвитку за умови зростання величини видобутого вугілля та збільшення ефективності вугільної промисловості [3].

Зростання обсягів видобутку вугілля з очисних вибоїв пов'язане з необхідністю ведення гірничих робіт на великих глибинах у складних гірничо-геологічних умовах і безперерійною роботою комплексно-механізованих вибоїв. В таких умовах стійка робота лав багато в чому залежить від експлуатаційного та безаварійного стану підготовчих виробок.

У 90-ті роки зі збільшенням глибини розробки стійко знижувалась частка стовпової системи розробки (68 % на глибині 600 м та 39% на глибині понад 1000 м), а суцільної зростала з 13 до 37 % [4], при цьому питома вага комбінованої системи залишалася на рівні 19-20%. За останні 20 років ситуація майже не змінилася. Причому для діючих шахт українського Донбасу частка стовпової системи розробки складає 56 %, а суцільної та комбінованих – відповідно, 8 та 36 %. Тобто частка систем розробки з підтриманням виробок позаду лави поступово збільшується. Треба відзначити,

що перехід на варіанти комбінованої системи розробки обумовлений необхідністю повторного використання виробок для зменшення обсягів проведення виробок. Наприклад, в умовах ТОВ «ДТЕК ЕНЕРГО» у період з 2010 по 2017 р. частка виробок з повторним використанням збільшилася з 29 до 77 %, а обсяги проведення виробок зменшилися з 6 до 4,1 м/тис. т [5].

Таким чином, з огляду на тенденцію до збільшення частки систем розробки, які передбачають підтримання підготовчих виробок позаду лав, і необхідністю повторного використання проблема підтримання таких виробок має першорядне значення. У таких умовах важливим є застосування на межі з виробленим простором засобів охорони, які при слабких породах підшви здебільшого неефективні, оскільки працюють як штампи, з-під яких породи видавлюються у виробки. У таких умовах є актуальним управління напружено-деформованим станом у навколишньому масиві та переспрямування видавлюючих зусиль від виробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На цей час існує великий обсяг досліджень напружено-деформованого стану навколишнього масиву та запропоновано велику кількість заходів щодо забезпечення експлуатаційного стану підготовчих виробок, заснованих на управлінні напружено-деформованим станом. Наприклад, до таких можна віднести дослідження з розробки засобів охорони, що передбачають переспрямування видавлюючих зусиль від робочих просторів або забезпечення стійкості навколишнього масиву за рахунок створення вантажонесучої конструкції у системі «засіб охорони-бічні породи».

Відомий спосіб охорони виробок бутівими смугами з попередніми розпором і розвантаженням крайової зони вугільного пласта від напружень за допомогою щілин змінної жорсткості [6, 7].

Запропоновано спосіб охорони з використанням смуг змінної жорсткості для створення склепіння рівноваги [8-10]. Його сутність полягає в тому, що з обох боків від виробки, яка знаходиться позаду лави між

вугільним масивом і виробленим простором, виконується комплекс заходів зі зміцнення засобу охорони та розвантаження вугільного масиву. Це дозволяє створити над виробкою склепіння природної рівноваги.

Запропоновано компенсаційні системи для охорони гірничих виробок [11, 12], в яких з метою підвищення стійкості виробки готуються компенсаційні порожнини з боків виробки на всю потужність пласта з розміщенням ціликів між виробкою та порожнинами. Застосування цих систем передбачає часткове деформування ціликів, перенесення максимальних напружень у недоторканий масив за межі порожнин. Відмінність верхньої системи від нижньої буде в тому, що деформація ціликів регулюється за допомогою натягу анкерів, які встановлюються в ціликах на глибину, що перевищує половину їх ширини. Ці системи вимагають проведення додаткових порожнин у вугільному масиві, що випереджають очисний вибій. Це стримує швидкість посування лави.

Відомий досвід охорони підготовчих виробок технологічними вугільними ціликами у формі призм [13, 14], які в основі мають трикутник або трапецію. Застосуванням цих споруд забезпечуються технологічні процеси, але порожнини між ними не можна вважати за компенсаційні, оскільки більша частка видавлюючих зусиль реалізується у виробку, яка охороняється. Про це свідчать значні зміщення порід підшви, які мали місце при впровадженні цих технологій [15]. Якщо б ці зміщення реалізовувались не у бік виробки, а навпаки – у вироблений простір, то дані технології мали б ширшу область застосування.

Дану технологію було вдосконалено. Запропоноване тимчасове залишення технологічних ціликів із закладанням порожнин з обмежуючими поверхнями та подальшим вийманням ціликів [16]. Після виймання ціликів охоронні споруди з рядової породи та обмежуючих поверхонь будуть схожі на трапецієподібні призми та будуть орієнтовані меншою гранню до виробки, що необхідно для зменшення зсувів порід підшви виробки та виключення подальших підривок при її експлуатації. У якості обмежуючих поверхонь мають використовуватись

конструкції з пошарово укладеними перегородками з сітчастого матеріалу (рис.

1) або стінками з мішків по периметру споруди (рис. 2). Це дозволить досягти

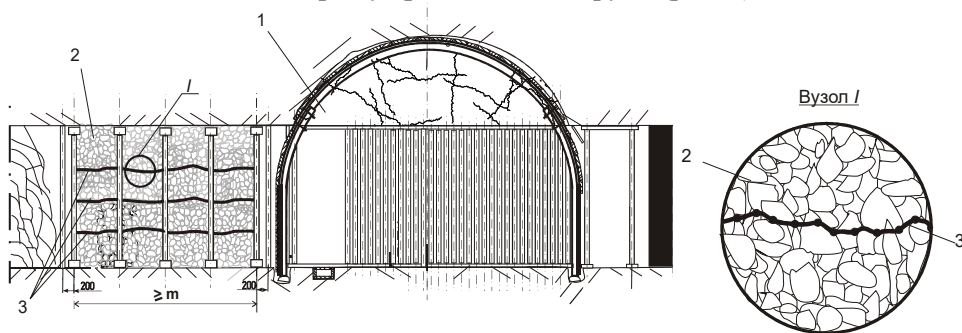
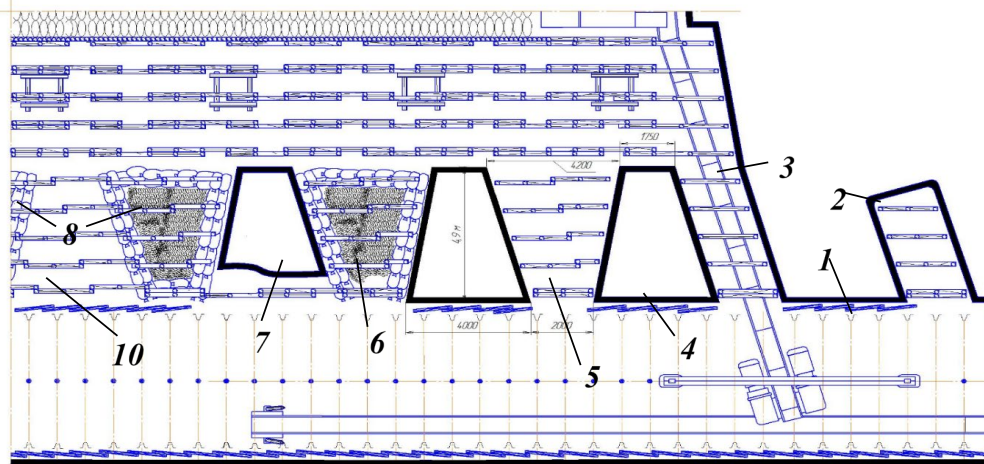


Рис. 1. Загальний вигляд засобу охорони, що зводиться з рядової породи та конструкцій з сітчастого матеріалу (1- виробка, 2- рядова порода, 3- перегородки з сітчастого матеріалу)

а)



б)

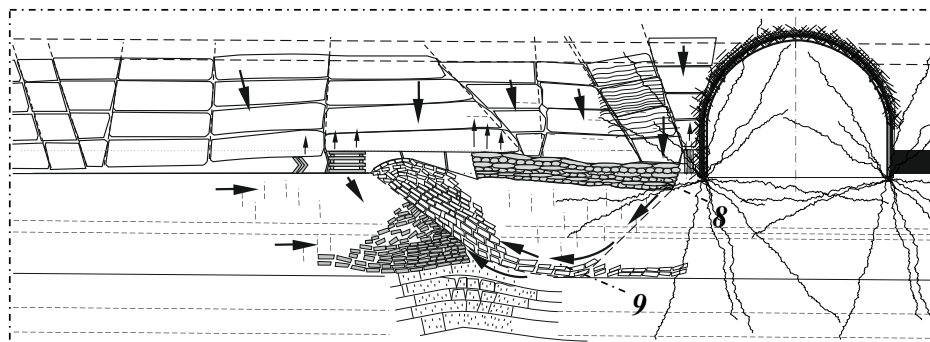


Рис. 2. Технологічна схема охорони підготовчої виробки спорудами з рядової породи та мішків (а) і картина зсувів порід підшви під охороною спорудою, яка у формі трапецієподібної призми з орієнтацією меншою бічною гранню до виробки (б) (1- гірничя виробка, 2- просік, 3- скребковий конвеєр, 4- цілик, 5- порожнини між ціликами, 6- штучна охоронна споруда, що викладається, 7- цілик вугілля, що виймається, 8- охоронна споруда у формі трапецієподібної призми, 9- породи підшви під охоронною спорудою).

обмеженої піддатливості та забезпечити стійкі форми. З метою компенсації видавлюючих зусиль у порожнинах між охоронними конструкціями було розроблено та запатентовано спосіб охорони гірничих виробок [17], що включає установку охоронних споруджень вздовж гірничих виробок, які мають форму

прямокутних паралелепіпедів, з залишенням між ними компенсаційних порожнин (рис. 3).

Область застосування пропонованого способу поширюється для умов розробки вугільних пластів з породами підшви будь-якої стійкості, у тому числі, схильними до здимання. При слабких породах підшви не

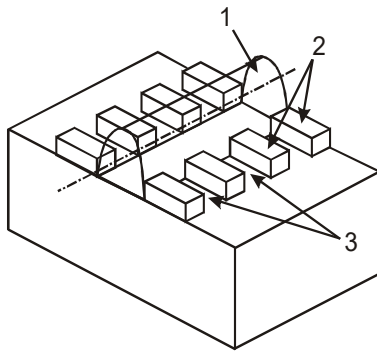


Рис. 3. Схема розміщення охоронних споруд 2 у формі прямокутних паралелепіпедів перпендикулярно повздовжній осі виробки 1 з залишенням між ними компенсаційних порожнин 3

виключається вдавлювання охоронних споруд, яке провокується здимання порід підосви у компенсаційні порожнини з метою відведення від виробки сил, що видавлюють.

При застосуванні даного способу забезпечується стійкість пластових виробок, розширюється область застосування жорстких охоронних споруд і підвищується ефективність охорони виробок від негативного впливу гірського тиску. Ефективність способу була підтверджена лабораторними дослідженнями та результатами дослідно-промислових випробувань опор з породно-цементних напівблоків у шахтних умовах [18]. Спосіб потребує спорудження стійких відокремлених опор, які мають обмежені геометричні розміри, та використання рядової породи без її попередньої переробки не розглядалося. За аналогією зі створенням опор, які схожі на трапецієподібні призми, опори подібні прямокутним паралелепіпедам також можуть бути споруджені з рядової породи та обмежуючих поверхонь.

Таким чином, способи охорони, спрямовані на управління напружено-деформованим станом порід навколо гірничих виробок для забезпечення їх експлуатаційного стану в умовах слабких порід, можна вважати перспективними. Їх можна віднести до ресурсозберігаючих, якщо у конструкції передбачається використання недорогих матеріалів. Тобто технології охорони зі спорудженням окремо розташованих породних опор з обмежуючими поверхнями, між якими залишаються компенсаційні порожнини,

заслужують на увагу. Встановленню ефективності даних технологій присвячено серію досліджень [16, 19-22], але параметри таких опор та порожнин між ними в умовах слабких порід підосви залишаються невизначеними.

Мета дослідження.

Метою статті є визначення параметрів окремо розташованих породних опор з компенсаційними порожнинами.

Методи дослідження.

Аналіз технологій охорони підготовчих виробок, що ґрунтуються на управлінні напружено-деформованим станом порід навколо гірничих виробок, фізичне моделювання з використанням еквівалентних матеріалів, чисельне моделювання методом скінчених елементів, методи будівельної механіки.

Виклад основного матеріалу.

Запропоновані рішення щодо спорудження трапецієподібних призм або прямокутних паралелепіпедів перпендикулярно повздовжній осі виробки з залишенням між ними порожнин дозволяє переспрямувати частку зусиль від виробки. Для цього використовувались жорсткі конструкції, відповідно, з трапецією або прямокутником в основі. З породи та обмежуючих поверхонь також можна створити відокремлені опори, але їх форма не буде схожа на трикутник, трапецію або прямокутник, оскільки їх форму визначають несучі ядра, які за формою схожі на коло або еліпс. Та не можна вважати догмою, що форми споруд мають бути кутастої форми, оскільки, навпаки, кути та виступи можуть бути концентраторами напружень та провокувати завчасні порушення стійкості підстиляючих порід. Для доведення цього ствердження проведені чисельні та лабораторні дослідження щодо вивчення впливу форми охоронної споруди на зміщення порід, які її підстиляють [23, 24]. Було встановлено, що: ущільнені ядра під охоронними спорудами, в основі яких був правильний багатокутник, мали форми пірамід, якщо в основі був прямокутник ядро мало форму усіченої трикутної призми, а при колі – конус (рис. 4); для штампів з правильними фігурами та колом

в основі відстані контурів деформування поверхні від опор були приблизно

однаковим у всіх напрямках, а форма

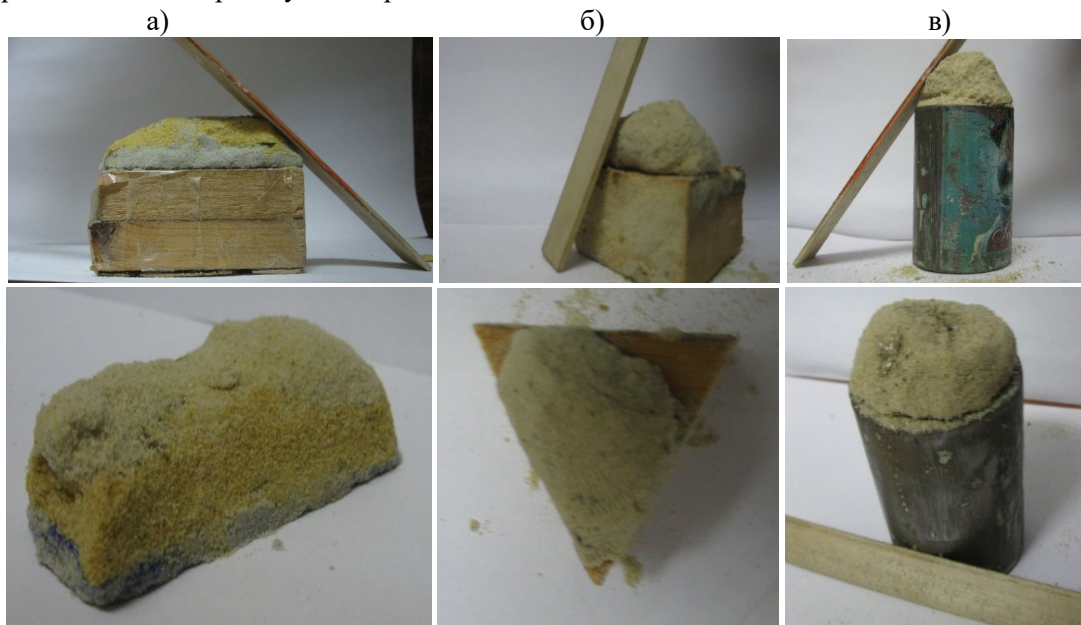


Рис. 4. Загальний вигляд штампів з вилученими з моделей ущільненими ядрами, які утворилися при навантаженні (а, б та в – відповідно, для прямокутного, трикутного та круглого штампів)

контур нагадувала коло, для прямокутних опор контур був подібний до еліпсу, у якого менша вісь була перпендикулярна меншій стороні основи, а велика – більшій; застосування опор квадратної та круглої форми в основі не принесло ефекту щодо спрямування видавлюючих зусиль від виробки; при трикутній формі більш ефективною була орієнтація, коли вершина основи з найменшим кутом була біля виробки (при рівнобедреному трикутнику); опори у формі прямокутних паралелепіпедів можуть бути ефективними, але для цього їх необхідно розташовувати більшою стороною основи перпендикулярно поздовжній осі виробки.

Для встановлення параметрів опор в формі паралелепіпедів і компенсаційних порожнин між ними та встановлення ефективності їх застосування у порівнянні зі стрічковим розміщенням були проведені лабораторні дослідження на моделях з використанням еквівалентних матеріалів, в яких розглядалися різні схеми розміщення опор (рис. 5).

У моделі, яка зображена на рисунку 5, з одного боку були стрічкові смуги, а з іншого – опори, які були орієнтовані довшою стороною в основі перпендикулярно поздовжній осі виробки. В таких моделях ширина окремо розташованої опори дорівнювала ширині

смуги з іншого боку моделі. Довжина опор була в 2 рази більшою ніж ширина, а ширина компенсаційної порожнини дорівнювала ширині опор, між якими вона залишалася. Довжина смуг дорівнювала товщині моделі (0,16 м), що у масштабі моделювання 1:100 для натурі складало 16 м. Кількість опор по ширині моделі складала 4, а їх розміри були 0,015×0,03 м (в натурі 1,5×3 м). Сумарна площа вісьмох таких опор з одного боку моделі дорівнювала площі двох смуг, які встановлювались з іншого боку. Взагалі моделювався масив розмірами 75×16×16 м. При навантаженні моделей пневмобалонами з тиском $q=40$ кПа, при традиційному (стрічковому) розташуванні охоронних споруд, сталося руйнування підстилаючих порід, після чого вони попрямували у бік виробки й їх підняття склало 90% від висоти охоронних конструкцій (рис. 6). При окремо розташованих опорах підстилаючі породи зберегли свою цілісність, а величина їх підняття з боку менших бічних граней опор (в умовну виробку) склала 18% від їх висоти, а з боку більшої бічної грані (у компенсаційні порожнини) – 35 % від висоти опор (рис. 6). Руйнування порід в умовній виробці при охороні опорами відбулося при навантаженні 68 кПа, а в компенсаційних порожнинах – при 22 кПа.

Таким чином, в результаті моделювання було встановлено, що



Рис. 5. Фотографії моделі з опорами для встановлення ефективності використання відокремлених опор

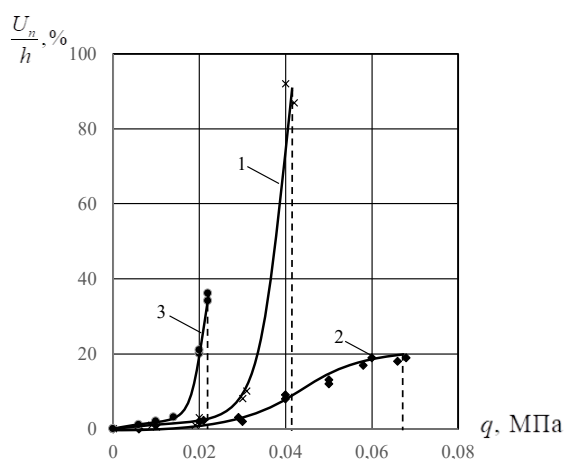


Рис. 6. Графіки залежності відносної величини підняття підстилаючих порід з-під охоронних споруд U_n/h від величини навантаження на них q (1, 2 – зміщення в умовних виробках, відповідно, поряд зі стрічковими смугами та з окремо розташованими опорами; 3 – зміщення в порожнинах)

застосування опор у вигляді паралелепіпедів, орієнтованих перпендикулярно осі виробки, дозволяє переспрямувати основну частину видавлюючих зусиль від виробки у компенсаційні порожнини.

Збільшення несучої здатності підстилаючих порід при використанні опор та обмеження зміщень в порожнини та виробку пояснюється арковим ефектом між

ними, який прийнятий при будівництві переривчастих фундаментів (рис. 7) [25]. Тобто між сусідніми опорами створюються розвантажувальні склепіння, що спираються на бічні грані ядр під опорами. Тоді має значення ширина порожнин між опорами. При цьому не виключаються переміщення у порожнини між опорами, але вони обмежені й відбуваються до моменту закінчення формування розвантажувальних склепінь. Суттєвий вплив на стійкість підстилаючих порід має співвідношення довжин сторін їх основ, що доведено результатами експериментів щодо вдавлення прямокутних та квадратних штампів у піщану основу [26].

Для встановлення параметрів опор та порожнин були відпрацьовані моделі, які були поділені на 3 сектори з різними співвідношеннями ширин опор та порожнин (рис. 8). Моделювалися умови, коли породи підосви були представлені піщаним сланцем міцністю на одновісний стиск 40 МПа. Навантаження на опори здійснювалося пневмобалонами, тиск у яких досягав 0,12 МПа.

Опори в моделях встановлювалися на всю їх товщину (0,16 м). Довжина опор складала $2,5h$ (де h – висота опор). Ширини опор у секторах кожної моделі складали $0,5h$, $1,0h$ та $2,0h$, а ширина компенсаційних

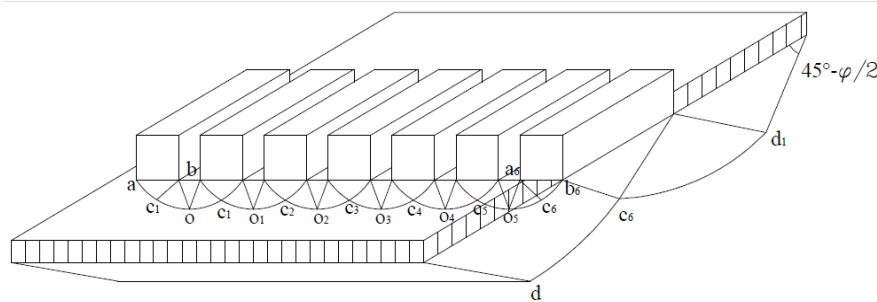


Рис. 7. Діаметрична схема граничного напружено-деформованого стану ґрунту основи за умови утворення аркового ефекту [25]

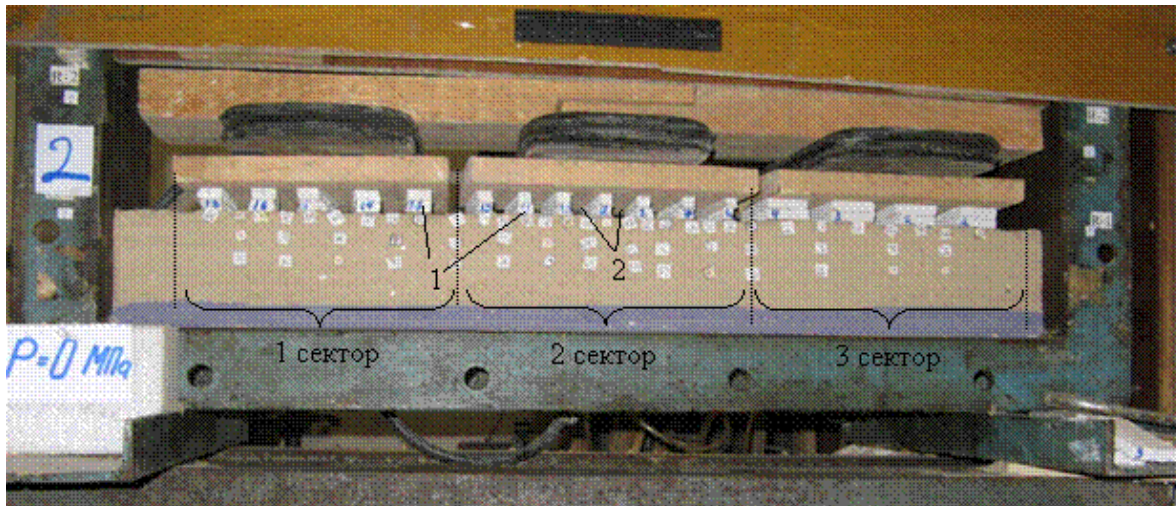


Рис. 8. Загальний вигляд моделі з різною шириною опор перед початком їх відпрацювання (1- охоронні опори різної ширини, 2- компенсаційні порожнини)

порожнин у всіх секторах була прийнята $1,0h$. Таким чином, співвідношення поперечних розмірів охоронних конструкцій і компенсаційних порожнин складало, відповідно, 1:2, 1:1 та 2:1.

Відпрацювання моделей дозволило визначити оптимальне співвідношення ширини опор і порожнин, при яких зсуви підстилаючих порід в порожнинах були найбільшими та коли досягається найефективніше переспрямування зусиль і зменшення зміщень у виробці. На рисунку 9 представлені графіки залежності зміщень підстилаючих порід підшви в компенсаційні порожнини від величини навантаження на опори при різних співвідношеннях розмірів опор і порожнин. З них випливає, що при ширині опори менше ширини порожнини $a < b$ (співвідношення 1:2), зсуви досягають величини 28% від висоти опори, після чого відбувається проколювання підшви; при $a > b$ (співвідношення 2:1) – зміщень майже не спостерігається, а при $a = b$ (співвідношення 1:1) – спостерігалися найбільші зсуви, які досягли 35 % від висоти опор. Оскільки

розглядалась різна ширина опор при незмінній довжині, то були встановлені їх оптимальні співвідношення. Отримані результати дозволили обґрунтувати параметри нового запатентованого способу [17], а саме: опори у формі прямокутних паралелепіпедів, які своєю найбільшою бічною гранню орієнтовані перпендикулярно осі виробки, мають бути зі співвідношенням довжини до ширини основи не менш ніж 2:1, а ширина компенсаційної порожнини має дорівнювати $0,54 \div 2,0$ ширини основи паралелепіпеда, при цьому оптимальним є співвідношення ширини опори до ширини порожнини 1:1. При таких умовах може бути забезпечене підвищення ефективності охорони гірничих виробок від негативного впливу гірського тиску.

Ширина опори в даних умовах b визначається стійкістю даної конструкції та залежить від її висоти h . Для таких конструкцій це питання було досліджене при проектуванні смуг з швидкотвердіючих розчинів та газобетонних блоків. Для смуг з швидкотвердіючих розчинів критичним є

співвідношення $b/h=0,7$ [27], а для смуг з газобетону – $b/h=0,8$ [28]. Також встановлено, що несуча здатність газобетонних конструкцій в позамежній області складає 70...80 % від діючого навантаження при співвідношеннях $b/h=1,0...1,5$ [28]. Тому для спорудження охоронних споруд у формі прямокутних паралелепіпедів доцільним є співвідношення $b/h=1,0$.

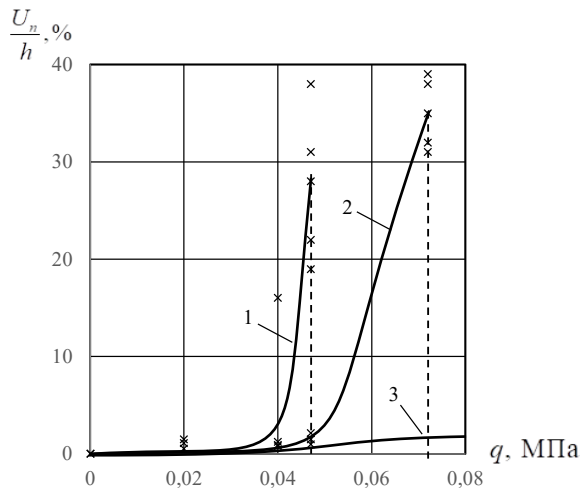


Рис. 9. Графіки залежності відносних зміщень порід в компенсційні порожнини U/h (де U – величина видавлювання порід підосви, h – висота опор) від величини навантаження на опори q при різному співвідношенні розмірів опор і компенсційних порожнин (1, 2 та 3 – відповідно, при співвідношенні 1:2, 1:1 та 2:1)

Для породних опор з обмежувачими поверхнями, між якими залишаються порожнини, складно забезпечити задані розміри на форму опор і порожнин, внаслідок того, що вони схильні до обмеженого розширення у плані. Тому для таких конструкцій доцільне встановлення параметрів у допустимих діапазонах.

Згідно результатів проведених досліджень, технічними рішеннями щодо створення відокремлених породних конструкцій з обмеженою піддатливістю можуть бути: бутові опори з горизонтальними перегородками, опори з мішків із пороною, комбіновані породні конструкції з армуванням або без нього. Але основною принциповою відмінністю даних рішень від розглянутого способу [17], є неможливість створення прямокутника в основі. Наприклад, при армованих бутових опорах на підстилаючі породи здійснюється навантаження на

майданчик, який витягнутий в одному напрямку та нагадує за формою еліпс [19]. В інших породних конструкціях основи будуть з округлими формами, витягнутими в одному напрямку. Якщо при даних формах буде забезпечено переспрямування видавлюючих зусиль у компенсаційні порожнини та зменшення зміщень у виробку, що охороняється, то ці рішення можна вважати альтернативними способу з жорсткими опорами у формі паралелепіпедів. Але для цього необхідно довести, що найбільша частка переміщень з-під опор припадає на компенсаційні порожнини.

Для підтвердження доцільності відходу від кутових форм опор до округлих було проведено чисельне моделювання, при якому досліджувався вплив опор різної форми (рис. 10). У скінчено-елементних моделях розглядалися опори у формі трикутної, квадратної, п'ятикутної призми і циліндра, у яких основи мали однакові площі. Було побудовано дві моделі, які відрізнялися одна від одної тим, що в першій моделі були кутові опори, а в другій – округлі. У моделях на всі опори одночасно прикладалися однакові навантаження.

У результаті відробки моделей було встановлено, що у кутих фігурах максимальні напруження виникали на контакті ребр і основи та вони у 2 рази перевищували напруження, що виникали в аналогічних місцях в округлених фігурах (рис. 11). Тобто при округлих формах пікові навантаження на підстилаючі породи були істотно меншими, оскільки в них були відсутні кути та виступи, під якими зосереджуються концентратори зсувних напружень. Але ці особливості не мали істотного впливу на підстилаючі породи, оскільки під опорами напруження розподілялися однаково й ізобари під ними були у формі напівеліпсоїдів (рис. 12). При застосуванні опор у формі паралелепіпедів ізобари мали форму витягнутих напівеліпсоїдів [24], що було обумовлено прямокутною формою основ. Отримані результати дають право стверджувати, що під породними опорами з обмежувачими поверхнями, які в плані матимуть витягнуту форму, характер розташування ізобар буде таким, як і у паралелепіпеда.

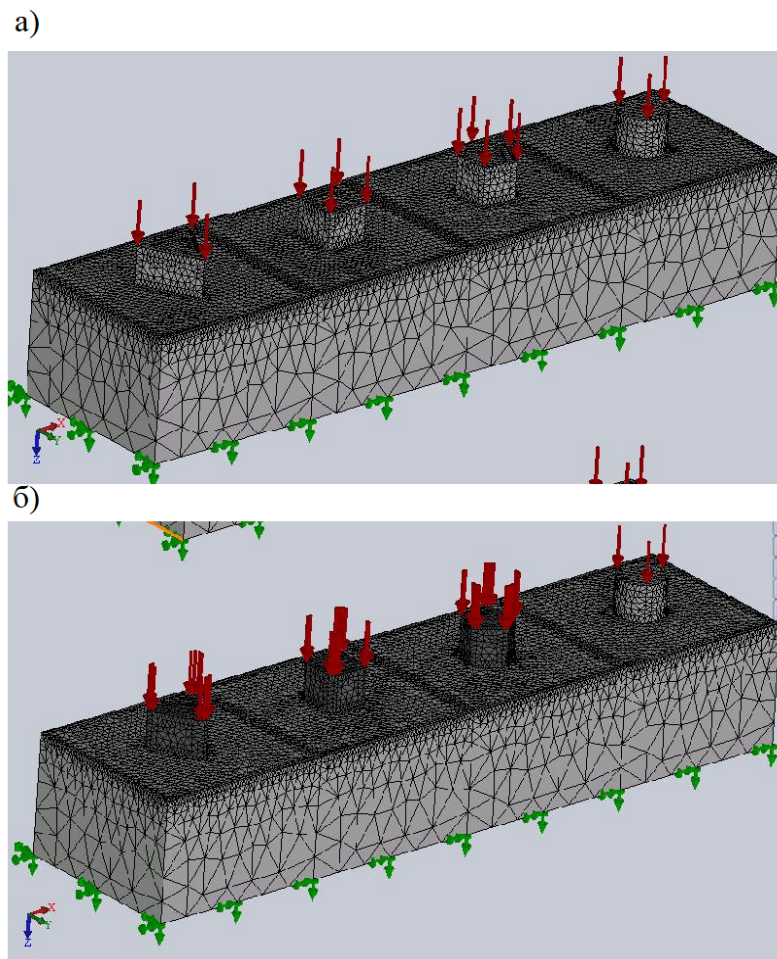


Рис. 10. Загальний вигляд чисельних моделей з кутовими (а) й округлими (б) опорами

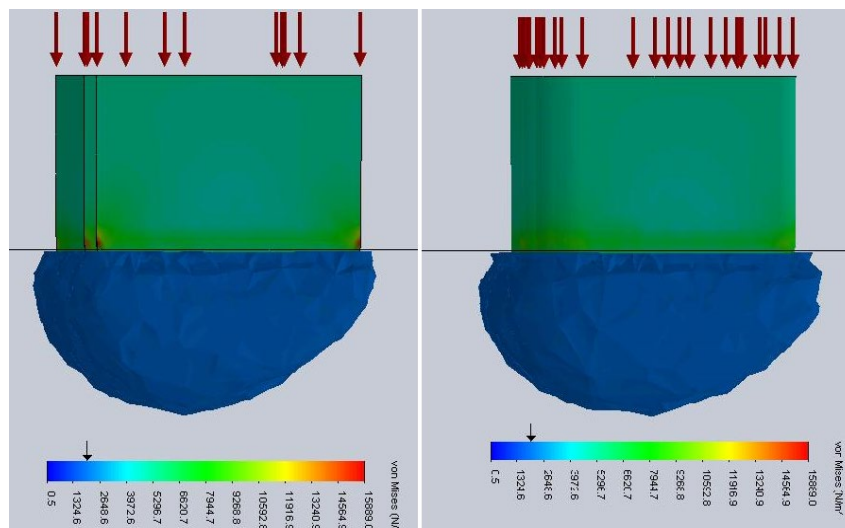


Рис. 11. Розподіл напружень у підстиляючих породах та трикутних опорах з кутовими та округлими ребрами

Для визначення ширини породних опор з обмеженою піддатливістю та порожнин між ними скористаємося методом, коли напівсклепіння несучого склепіння розглядаються як криволінійні підпирні стінки, які під дією граничних

навантажень визивають у підстиляючих породах граничний напружено-деформований стан [25]. Тоді ширина порожнини $b_{пор.}$ може бути визначена з виразу [25]

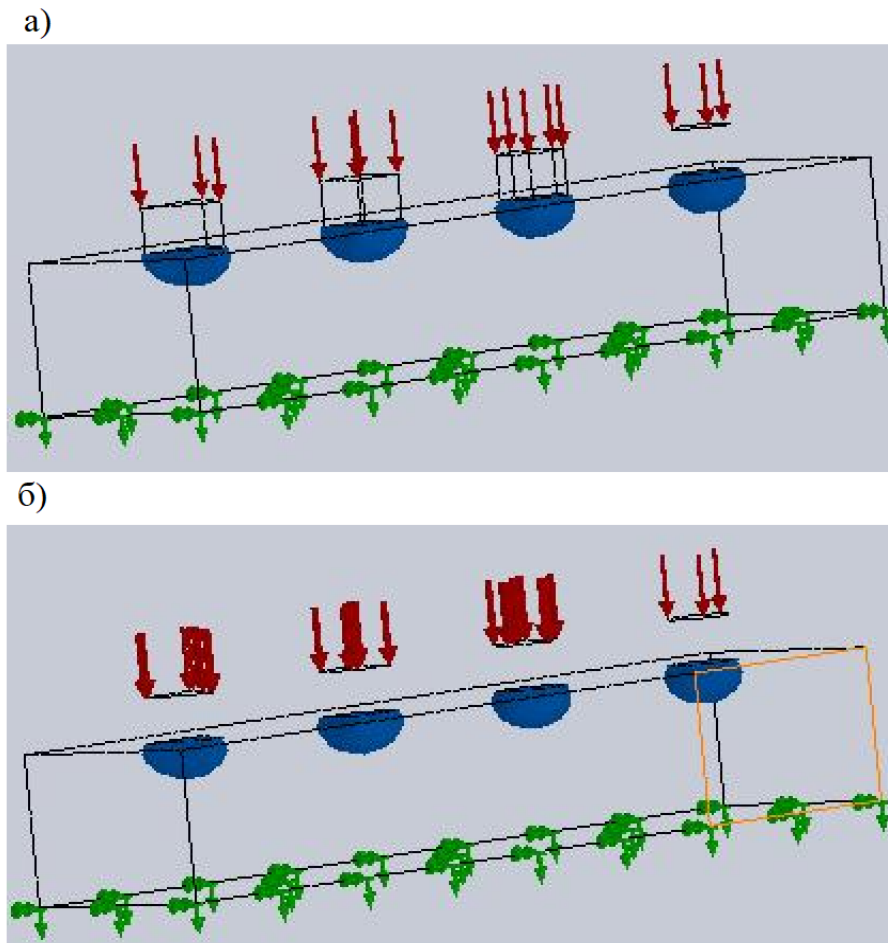


Рис. 12. Загальний вигляд ізобар під кутовими (а) й округлими (б) опорами в чисельних моделях

$$b_{\text{пор.}} = b_n \frac{8 \left(\operatorname{tg} \rho + \frac{C}{\sigma} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \rho}{4} \right)}{\left[2 - \left(\operatorname{tg} \rho + \frac{C}{\sigma} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \rho}{4} \right) \right]^2}, \quad (1)$$

де b_n – ширина опори, м; σ – тиск на засіб охорони з боку порід покрівлі, МПа; C – питоме зчеплення підстиляючих порід, МПа; ρ – кут внутрішнього тертя підстиляючих порід, град.

Якщо прийняти, що навколо виробки зона зруйнованих порід представлена незв'язаним сипким середовищем, то вираз може бути представлений, як

$$b_{\text{пор.}} = b_n \frac{8 \operatorname{tg} \rho \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \rho}{4} \right)}{\left[2 - \operatorname{tg} \rho \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \rho}{4} \right) \right]^2}. \quad (2)$$

У відповідності з виразом (2) отримаємо залежність співвідношення ширини порожнин до ширини породних опор від кута внутрішнього тертя

підстиляючих порід, яка представлена на рисунку 13.

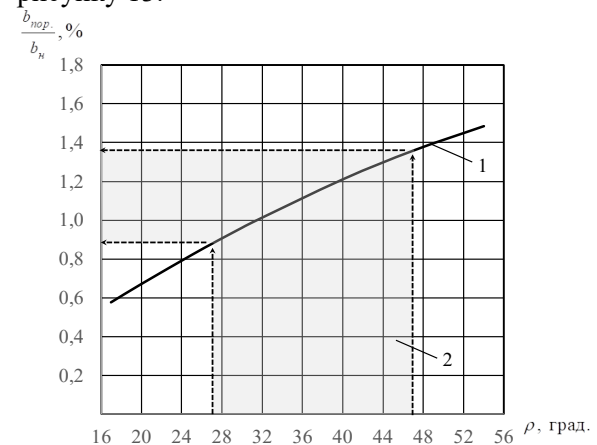


Рис. 13. Графік залежності співвідношення ширини порожнин до ширини породних опор $b_{\text{пор.}} / b_n$ від кута внутрішнього тертя підстиляючих порід ρ (1) та область визначення параметра $b_{\text{пор.}} / b_n$ для умов перспективних районів Донбасу (2)

Для умов перспективних вугленосних районів Донбасу, де кути внутрішнього тертя порід змінюється від 27 до 47° [29] співвідношення параметру $b_{пор.}$ до b_n змінюється від $0,88$ до $1,36$ одиниць. Отримана залежність показала прийнятну розбіжність з результатами моделювання жорстких опор (рис. 6), яка дорівнює 4% (при $\rho=30^\circ$ $b_{пор.}/b_n = 0,96$ та $1,0$, відповідно, розрахункове та експериментальне).

Окрім розмірів порожнини важливе значення має співвідношення розмірів основи охоронної споруди. В роботі [24] доведено, що максимальні розтягуючі напруження у підшві компенсаційних порожнин та мінімальні в підшвах виробок будуть при співвідношеннях сторін основ жорстких споруд у формі прямокутних паралелепіпедів не менше, ніж $1:2$. Але ж глибина опори від виробки до виробленого простору має бути обмеженою, оскільки при перевищенні граничного співвідношення ($1:7$ - для фундаментів) їх відносять до стрічкових споруд, що може бути малоефективним та є причиною інтенсивних зсувів порід в напрямку виробки.

Враховуючи результати польових та лоткових випробувань штампів [26], за якими було встановлено, що питомі значення граничного навантаження на основу збільшується від стрічкових штампів до квадратних (тобто максимальна стійкість основи під штампами забезпечується при співвідношенні сторін $1:1$), бажано в основі штампам надавати форму близьку до квадрату. Але опори мають бути витягнуті перпендикулярно осі виробки для забезпечення перерозподілу видавлюючих зусиль у порожнини. Тобто висновки авторів робіт [24] та [26] дають контрарні результати, але їх поєднання може бути корисним при визначенні оптимальних розмірів охоронних споруд з компенсаційними порожнинами.

За результатами випробувань, наданими у роботі [26], нами встановлено залежність показника зменшення граничного навантаження на основу від співвідношення розмірів штампів (рис. 14), з якої випливає, що при зміні співвідношення сторін штампів з $1:1$ до $1:6$ несуча здатність основи зменшується в середньому на 24% ,

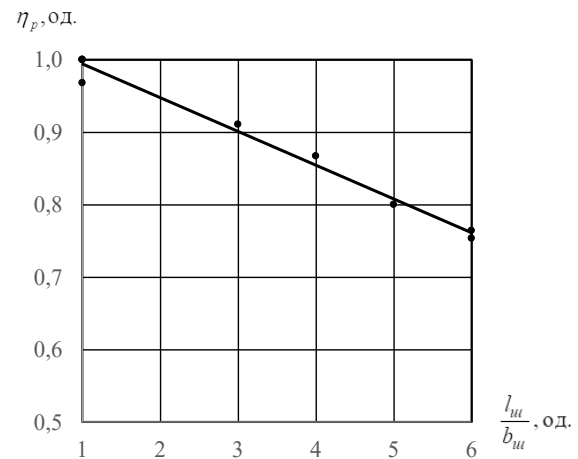


Рис. 14. Графік залежності показника зменшення граничного навантаження на основу η_p від співвідношення розмірів штампів $l_{ш}/b_{ш}$

а при його зміні з $1:1$ до $1:3$ – на 10% . Якщо припустити 10 -ти відсоткове зменшення несучої здатності основи, яке необхідне для ініціювання видавлювання порід у порожнини, співвідношення сторін штампів мають бути у діапазоні від $1:1$ до $1:3$.

Ширина опори має визначати її стійкість при заданій висоті. Оскільки стійкість породної опори визначає довжина її найменшої сторони в основі, а для опор у формі прямокутних паралелепіпедів співвідношення ширини опори до ширини порожнини має дорівнювати $1,0$, то для окремо розташованих опор з мішками з породою стійкість буде забезпечена при ширині не меншій за висоту, тобто $b/h \geq 1$.

Висновок.

За результатами досліджень було сформульовано рекомендації щодо параметрів породних охоронних споруд з компенсаційними порожнинами, а саме: для забезпечення стійкості підготовчих виробок в умовах слабких порід підшви доцільними є співвідношення ширини основи охоронних споруд до їх довжини у діапазоні від $1:2$ до $1:3$, при цьому їх ширина має бути не менше за висоту, а ширина порожнини – має визначатися в залежності від кута внутрішнього тертя підстилаючих порід та ширини опор. Такі параметри доцільні при спорудженні опор, які початково у плані мають форму прямокутника.

При спорудженні опор, що подібні трапецієподібним призмам, їх розміри

мають визначатися шириною вузької бічної грані, яка знаходиться поряд з виробкою і має дорівнювати, або бути більшою за висоту опори. Ширина порожнини у найвузшому місці має дорівнювати або дещо перевищувати ширину вузької грані, а її глибина – перевищувати ширину цієї грані у 2...3 рази.

Вдячність.

Дослідження проведено в рамках науково-дослідної роботи «Розробка і впровадження нетрадиційних ресурсозберігаючих технологій управління напружено-деформованим станом гірського масиву навколо виробок» (державна реєстрація 0110U001053).

Список літератури

- 1.Олексюк Г.В., Самотій Н.С. Тенденції та проблеми розвитку вугільної промисловості України (на прикладі державного підприємства «Львіввугілля»). *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2019. №1 (135). С. 3-9.
- 2.Касаткіна М.В., Калюжна В.С., Красюк В.О. Вугільна промисловість Луганської області: проблеми та перспективи розвитку. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Дала*. 2018. №4 (245). С. 55-60.
- 3.Сак Т.В., Шепелюк Н.П. Кон'юнктурні дослідження ринку кам'яного вугілля в контексті забезпечення енергетичної безпеки України. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2019. 4(21). С. 123-128.
- 4.Морозов И.Т., Пономаренко П.И. Перспективы применения сплошной системы разработки в Донбассе. *Уголь Украины*. 1997. №12. С. 8-10.
- 5.Барабаш М. Стратегия развития угледобычи на шахтах ДТЭК Энерго как основа энергетической безопасности Украины: доклад. URL: <https://dtek.com/content/files/barabash.pdf> (дата обращения 21.09.2020).
- 6.Литвинский Г.Г., Бабиюк Г.В. Охрана подготовительных выработок бутовыми полосами с разгрузкой краевой части пласта. *Уголь*. 1976. №9. С. 39.
7. Литвинский Г.Г., Волошин В.Б., Горбунов И.А. Управление устойчивостью подготовительной выработки взрывной бутовой полосой. *Уголь Украины*. 1989. №2. С. 19-21.
- 8.Колоколов О.В., Табаченко М.М., Медяник В.Ю., Пронько Ю.В., Медяник Ю.О., Новіков Ю.І. Спосіб охорони підготовчої виробки: пат. 36714 Україна: МПК(2006) E21D13/02, E21D11/00, E21C41/18. № 2000020523; заявл. 01.02.2000; опубл. 16.04.2001, бюл. № 3/2001.
- 9.Медяник В.Ю. Формування склепіння рівноваги над підготовчою виробкою за допомогою смуг змінної жорсткості – як спосіб її охорони і безремонтної підтримки. *Геотехническая механика*. 2009. Вип. 81. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/32838> (дата звернення 02.05.2019).
10. Медяник В.Ю., Ткачук І.В. Технологія зведення охоронних смуг змінної жорсткості при комбінованій системі розробки пологих вугільних пластів на глибоких горизонтах. *Науковий вісник НГУ*. 2010. №1. С.12–16.
11. А.с. 1495437 СССР, А1, E21D11/00, E21D13/02. Компенсационная система для охраны горных выработок / В.Н. Рева, Л.К. Нейман, О.И. Мельников, А.В. Шмиголь, В.Я. Кириченко, С.М. Бучатский. № 4275691/23-03; заявл. 02.07.87, опубл. 23.07.89, бюл. №27.
12. Аверін Г.О. Компенсаційна система для охорони гірничих виробок: пат. 4582 Україна, E21D11/00, E21D13/00. № 94230282, заявл. 14.06.91, опубл. 28.12.94, бюл. №7-1.
13. Борзых А.Ф., Скрыпник К.Е., Трофимов Е.В., Посохов Е.В. Охрана выемочных выработок с помощью технологических целиков. *Уголь Украины*. 2015. №5. С. 3-11.
14. Курченко И.П. Надежность работы комплексно-механизированного забоя в сложных горно-геологических условиях. *Уголь Украины*. 1980. №4. С. 18-19.
15. Тупицын А.В., Негрей С.Г., Курдюмов Д.Н., Негрей Т.А. Проблемы поддержания подготовительных выработок в условиях шахты «Комсомолец Донбасса». *Проблемы недропользования: междунар. форум-конкурс молод. ученых*. Сб. науч. трудов. Санкт Петербург: СПГУ, 2014. Ч.1. С. 177-179.
16. Негрій С.Г., Негрій Т.О. Умови застосування трапецієподібних охоронних споруд. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2017. №2(41). С. 7-18 DOI:<https://doi.org/10.31474/1999-981x-2017-2-7-18>.
17. Касьян М.М., Негрій С.Г., Мокрієнко В.М., Хазіпов І.В. Спосіб охорони гірничих виробок: пат. 94327 Україна, МПК(2011.01) E21D 11/00 (2006.01), E21C 41/18 (2006.01), № a200911242; заявл. 05.11.2009, опубл. 26.04.2011, бюл. № 8.
18. Касьян Н.Н., Мокриенко В.Н., Сахно И.Г. Опытнo-промышленная проверка способа охраны выработки жесткими сооружениями с компенсационными полостями в условиях шахты «Щегловская-Глубокая». *Науковий вісник НГУ*. 2012. №6. С. 30-36.
19. Негрей С.Г. О возможности создания устойчивых породных опор для обеспечения эксплуатационного состояния подготовительных выработок. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2017. Вип. 33. Р. С. 21-30. DOI:<http://doi.org/10.20535/2079-5688.0.33.98824>.
20. Негрей С.Г. О возможности увеличения несущей способности бутовых полос. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2011. №1. С. 179-184.
21. Негрей С.Г., Негрей Т.А. Определение параметров породной полосы с ограниченной податливостью. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 1/2017(102). С. 50-57.
22. Негрій С.Г. Усовершенствование технологии охраны подготовительных выработок породными стойками. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2014. №1(34)-2(35). С. 181-186.
23. Мокриенко В.Н., Негрей С.Г., Курдюмов Д.Н. Изучение влияния формы охранных

сооружения, возводимого вслед за лавой, на механизм смещений подстилающих его пород. *Записки Горного института*. 2012. Т.199. С. 176-179.

24. Мокриенко В.Н. Обоснование параметров способа охраны выработок жесткими сооружениями с компенсационными полостями: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / ДонНТУ, Донецк. 2013. 149 с.

25. Фидаров М.И. Проектирование и возведение прерывистых фундаментов. Москва: Стройиздат, 1986. 156 с.

26. Королев К.В. Несущая способность оснований в стабилизированном и нестабилизированном состоянии: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.02 / СГУПС. Новосибирск, 2014. 326 с.

27. Гетце В., Бушман Н., Шроер Д. Требования к вяжущим материалам, используемых для упрочнения пород, охраны и крепления горных выработок. Глюкауф. 1984. №2. С. 18-26.

28. Канин В.А. Физико-технические основы охраны выемочных выработок в условиях неустойчивых пород: дисс... д-ра техн. наук: 05.15.02 / УкрНИИ НАН Украины. Донецк, 2010. 364 с.

29. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. Москва: Недра, 1975. 279 с.

References

1. Oleksyuk, H., Samotiy, N. (2019). Trends and problems of development of the coal industry of Ukraine (on the example of the state enterprise «Lvivvugillya»). *Sotsialno-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy*, 1 (135), 3-9. (in Ukrainian)

2. Kasatkina, M. V., Kaliuzhna, V. S., Krasiuk, V. O. (2018). Coal industry of Lugansk region: problems and prospects of development. *Visnyk Shkhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 4 (245), 55-60. (in Ukrainian)

3. Sak, T., Shepelyuk, N. (2019). Rough coal market conjuncture research in the context of ensuring energy security of Ukraine. *Shkhidna Yevropa: ekonomika, biznes ta upravlinnia*, 4(21), 123-128. (in Ukrainian)

4. Morozov, I. T., Ponomarenko, P. I. (1997). Prospects for the application at the longwall advancing on the strike in the Donbass. *Ugol Ukrainy*, 12, 8-10. (in Russian)

5. Barabash, M. (2020). Strategiya rozvitiya ugledobyichi na shahтах DTEK Energo kak osnova energeticheskoy bezopasnosti. Взято з <https://dtek.com/content/files/barabash.pdf>. (in Russian)

6. Litvinskiy, G. G., Babiyuk, G. V. (1976). Ohrana podgotovitelnykh vyirabotok butovymi polosami s razgruzkoy kraevoy chasti plasta. *Ugol*, 9, 39. (in Russian)

7. Litvinskiy, G. G., Voloshin, V. B., Gorbunov, I. A. (1989). Upravlenie ustoychivostyu podgotovitelnoy vyirabotki vzyivnoy butovoy polosoy. *Ugol Ukrainy*, 2, 19-21. (in Russian)

8. Kolokolov, O. V., Tabachenko, M. M., Medianyuk, V. Iu., Pronko, Yu. V., Medianyuk, Yu. O., Novikov, Yu. I. (2006). Patent Ukrainy No 36714 UA: E21D13/02, E21D11/00, E21C41/18. No 2000020523. (in Ukrainian)

9. Medianyuk, V. (2009). The formation of vault equilibrium above working making with the help of stripe construction of variable inflexibility as a method of protection and support without repair. *Geo-Technical Mechanics*, 81. (in Ukrainian)

10. Medianyuk, V. Iu., Tkachuk, I. V. (2010). Tekhnolohiia zvedennia okhoronnykh smuh zminnoi zhorstkosti pry kombinovanii systemi rozrobky polohykh vuhilnykh plastiv na hlybokykh horyzontakh. *Naukovyi visnyk NHU*, 1, 12-16. (in Ukrainian)

11. Reva, V.N., Neyman, L.K., Melnikov, O.I., Shmigol, A.V., Kirichenko, V.Ya., Buchatskiy S.M.. (1989) Kompensatsionnaya sistema dlya ohrany gorniy vyirabotok. Patent No 1495437 USSR, A1, E21D11/00, E21D13/02. № 4275691/23-03. (in Russian)

12. Averin H.O. (1994) Kompensatsiina systema dlia okhorony hirnychykh vyrobok. 4582 UA, E21D11/00, E21D13/00. № 94230282. (in Ukrainian)

13. Borzyih A.F., Skryipnik K.E., Trofimov E.V., Posohov E.V. (2015) Ohrana vyiemochnykh vyirabotok s pomoshchyu tehnologicheskikh tselikov. *Ugol Ukrainy*. No 5. 3-11. (in Russian)

14. Kurchenko I.P. (1980) Nadezhnost raboty kompleksno-mehanizirovannogo zaboya v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyah. *Ugol Ukrainy*. No 4. 18-19. (in Russian)

15. Tupitsyn A.V., Negrey S.G., Kurdyumov D.N., Negrey T.A. (2014) Problemy podderzhaniya podgotovitelnykh vyirabotok v usloviyah shahty «Komsomolets Donbassa». *Problemy nedropolzovaniya*. Vol. 1. 177-179. (in Russian)

16. Nehrii S., Nehrii T. (2017) Conditions of use trapezoidal security installations. *Journal of Donetsk Mining Institute*. No 2(41). 7-18. (in Ukrainian)

17. Kasian M.M., Nehrii S.H., Mokriienko V.M., Khazipov I.V. (2011) Sposib okhorony hirnychykh vyrobok. Patent Ukrainy No 94327 UA. E21D 11/00 (2006.01), E21C 41/18 (2006.01), No a200911242. (in Ukrainian)

18. Kasyan, N. N., Mokriienko, V. N., Sakhno, I. G. (2012). Experimental-industrial verification of maintenance method using rigid constructions with countervailing cavities in the mine "Scheglovskaya-Glubokaya". *Scientific Bulletin of National Mining University*, 6, 30-36. (in Russian)

19. Nehrii, S. (2017). About possibility of creation of stable rock pillars to ensure the operational status of the preparatory workings. *Herald of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series of Mining*, 33, 21-30. (in Russian)

20. Negrey, S. G. (2011). O vozmozhnosti uvelicheniya nesuschey sposobnosti butoviyh polos. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 1, 179-184. (in Russian)

21. Nehrii, S., Nehrii, T. (2017). Determination of parameters of rock bands with limited supleness. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university*, 3 (116), 50-57. (in Russian)

22. Negrey, S. (2014). Enhancement the technology of maintenance mine workings using rocks racks. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 1(34)-2(35), 181-186. (in Russian)

23. Mokriienko, V. N., Negrey, S. G., Kurdyumov, D. N. (2012). Izuchenie vliyaniya formy ohrannogo sooruzheniya, vozvodimogo vsled za lavoy, na mehanizm smescheniy podstilayuschih ego porod. *Zapiski Gornogo instituta*, 199, 176-179. (in Russian)

24. Mokriienko, V. N. (2013). Obosnovanie parametrov sposoba ohrany vyirabotok zhestkimi sooruzheniyami s kompensatsionnymi polostyami: (Dr. Tech. Sci.). DonNTU, Donetsk. (in Russian)

25. Fidarov, M.I. (1986). *Proektirovanie i vozvedenie preryivystykh fundamentov*. Moscow: Stroizdat. (in Russian)

26. Korolev K.V. (2014). *Nesuschaya sposobnost osnovaniy v stabilizirovannom i nestabilizirovannom sostoyanii: (Ph.D.)*, SPBU, Novosibirsk. (in Russian)

27. Gettse, V., Bushman, N., Shroer, D. (1984). *Trebovaniya k vyazhushchim materialam, ispolzuemykh*

dlya uprochneniya porod, ohranyi i krepleniya gornyykh vyirabotok. *Gluckauf*, 2, 18-26. (in Russian)

28. Kanin, V.A. (2011). *Physical and technical basics of excavation workings in conditions of unstable rocks: (Dr. Tech. Sci.)*. UkrNIMI, Donetsk. (in Russian)

29. Melnikov, N.V., Rzhavskiy, V.V., Protodyakonov, M.M. and etc. (1975). *Handbook (cadastre) of physical properties of rocks*. Moscow: Nedra. (in Russian)

Надійшла до редакції 01.12.2020

Рецензент д-р. техн. наук, проф. С. М. Александров

Негрій Сергій Григорович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Розробка родовищ корисних копалин» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна), orcid.org/0000-0002-3195-8401.

E-mail: serhii.nehrii@donntu.edu.ua.

Негрій Тетяна Олександрівна – канд. техн. наук, доцент кафедри «Розробка родовищ корисних копалин» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна), orcid.org/0000-0002-4239-3178.

E-mail: tetiana.nehrii@donntu.edu.ua.

Єфремов Ігор Олексійович – д-р техн. наук, завідувач кафедри «Розробка родовищ корисних копалин» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: ihor.yefremov@donntu.edu.ua

DETERMINATION OF PARAMETERS OF DETACHED ROCK PACKS WITH COMPENSATION VOIDS

Purpose: To determine the parameters of detached rock packs with compensating voids.

Methodology: Analysis of technologies for the protection of development workings, based on the management of the stress-strain state of rocks around the workings, physical modeling using equivalent materials, numerical modeling by the finite element method, and methods of structural mechanics.

Results: In the conditions of soft soil rocks the expediency of application of protection means based on management of a stress-strain condition in a surrounding massif and redirection of extrusion forces from a working has been substantiated. On the basis of analysis of the existing protection measures of the workings behind faces the prospects of use of protection technologies by means of construction of detached rock packs with limiting surfaces between which there are compensatory voids left, have been proved. To determine the parameters of such packs and voids between them in the conditions of soft soil rocks, a set of laboratory and numerical studies has been performed. According to their results, it has been established that to ensure the redirection of extrusion forces from the working it is necessary to build rock packs with limiting surfaces in the form of rectangular parallelepipeds with orientation of their greater side perpendicular to the longitudinal axis of production and trapezoidal prisms with their narrower orientation towards the working. Recommendations on the parameters of these structures and compensatory voids between them in the conditions of soft soil rocks have been formulated.

Scientific novelty: On the basis of numerical modeling the regularities of stress distribution in rocks under detached rock packs of different shapes have been investigated, which allowed substantiating the parameters of the last and compensatory voids between them to ensure the stability of workings in the soft soil rocks.

Practical significance: The expediency of application of technologies of protection of preparatory workings behind faces in the conditions of soft soil rocks by means of rock packs with limiting surfaces between which there are compensatory voids has been proved, and their parameters have been defined.

Keywords: means of protection, extrusion of soil rocks, rock packs with limiting surfaces, compensatory voids, modeling, technology parameters.

Nehrii Serhii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Public higher education institution Donetsk National Technical University (2, Shybankova Ave., Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine), orcid.org/0000-0002-3195-8401.

E-mail: serhii.nehrii@donntu.edu.ua.

Nehrii Tetiana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Public higher education institution Donetsk National Technical University (2, Shybankova Ave., Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine), orcid.org/0000-0002-4239-3178.

E-mail: tetiana.nehrii@donntu.edu.ua.

Yefremov Ihor – Doctor of Technical Sciences, Public higher education institution Donetsk National Technical University (2, Shybankova Ave., Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine).

E-mail: ihor.yefremov@donntu.edu.ua