

© Є.Є. Павлов<sup>1</sup>, Е.В. Фесенко<sup>1</sup>, А.І. Новак<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ТОВ "Технічний університет "Метінвест Політехніка", Маріуполь, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ШЛЯХОМ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ НА РАМНЕ КРІПЛЕННЯ

© Ye. Pavlov<sup>1</sup>, E. Fesenko<sup>1</sup>, A. Novak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Metinvest Polytechnic Technical University LLC, Mariupol, Ukraine

## INCREASING THE STABILITY OF MINING PRODUCTS BY REDISTRIBUTING THE LOAD ON THE FRAME SUPPORT

**Мета.** Оцінити підвищення несучої здатності рамного кріплення способом вибухового розвантаження порід покрівлі за рахунок створення різних схем розподілу зовнішнього навантаження на раму.

**Методи дослідження.** Виконані чисельні дослідження методом кінцевих елементів несучої здатності рамного кріплення за допомогою програмного комплексу «Ліра».

**Результати.** Методом кінцевих елементів вивчені закономірності зміни несучої здатності рамного кріплення гірничої виробки залежно від зміни виду навантаження. Шляхом порівняння різних схем навантаження на кріплення, розроблено рекомендації щодо розміщення розвантажувальних шпурів навколо виробки та доведено доцільність і достатність схеми розвантаження порід покрівлі виробки від напружень двома зарядами розпушення, які розміщують над вузлами піддатливості. Розроблено рекомендації щодо підвищення стійкості гірничої виробки за рахунок перерозподілу навантаження на рамне кріплення вибуховим розвантаженням порід покрівлі.

**Наукова новизна.** Встановленні залежності стійкості гірничої виробки й несучої здатності рамного кріплення під час вибухового розвантаження порід покрівлі від законів розподілу зовнішнього навантаження, що прикладене до рамного кріплення з боку масиву. Доведено, що найбільше навантаження рамне кріплення витримує при використанні способу вибухового розвантаження двома зарядами розпушування над стійками рамного кріплення, що забезпечує трикутний розподіл навантаження, коли максимальне навантаження приходить на стійки кріплення.

**Практичне значення** полягає в визначенні параметрів забезпечення стійкості гірничих виробок вибуховим розвантаженням порід покрівлі в залежності від різних схем навантаження на рамне кріплення і розробці рекомендацій щодо підвищення стійкості гірничих виробок, проведених у різних гірничо-геологічних умовах. При використанні вибухового розвантаження порід покрівлі двома зарядами розпушування, що забезпечує трикутну схему навантаження на рамне кріплення, можна зменшити щільність установки кріплення мінімум в два рази для аркового і трапецієподібного рамного кріплення.

**Ключові слова:** підготовча виробка, рамне кріплення, працездатність рами, вибухове розвантаження, заряд рихлення, вигинальний момент, моделювання методом кінцевих елементів.

**Вступ.** Ефективність розробки вугільних родовищ значною мірою пов'язана з проблемою забезпечення стійкості підготовчих виробок. В даний час їх експлу-

атаційний стан на шахтах Донбасу значно погіршився, що обумовлено збільшенням глибини розробки, інтенсивним проявом гірського тиску, а також, в значній мірі, низькою якістю спорудження (великі пустоти закріпного простору, відсутність або погана якість забутовки, нерівний контур виробки тощо), що розкрито в роботі [1,2]. Незадовільний стан виробок і необхідність їх ремонту призводять до різкого зростання трудових і матеріальних витрат, уповільнення гірничо-підготовчих і очисних роботи, зниження техніко-економічних показників шахти.

При будівництві шахт і горизонтів, від загального обсягу споруди виробок, виробки з бетонним кріпленням складають 14%, з металобетону - 10%, з кріплення із анкерів і залізобетону - 2,4%, з металевим піддатливим кріпленням - 72% [3] (рис . 1).

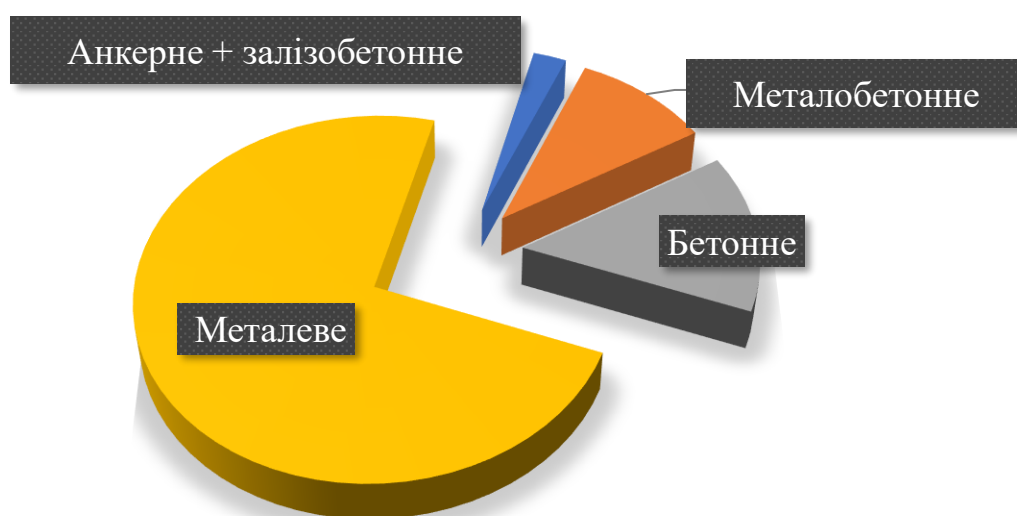


Рис. 1. Процентний розподіл застосування шахтного кріплення

Для виробок приствольних дворів глибоких шахт застосовують, в основному, металобетонне замкнуте кріплення. У провідних вуглевидобувних країнах Європи - Німеччині, Франції, Бельгії, Великобританії, Польщі - основним видом кріплення є металева, де нею кріплять як протяжні гірничі виробки, так і камери різного призначення, сполучення гірничих виробок, в т.ч. і зі стволами [4].

Експлуатаційний стан металевих піддатливих кріплень забезпечують різними способами:

1. Застосуванням раціональних способів охорони гірничих виробок (проведення з запасом на осідання, розвантаження щілинами і з допомогою БВР і ін.);
2. Підвищенням несучої здатності конструкції кріплення (збільшення перетину профілю, збільшена жорсткість вузлів піддатливості т.п.);
3. Усуненням пошкодження кріплення від буропідричних робіт;
4. Ремонтами і перекріпленням деформованого кріплення в експлуатованих виробках.

Однак ці способи підвищення стійкості виробок вичерпали свої можливості і не дають необхідного ефекту, тому обсяг ремонту деформованих виробок з кожним роком збільшується.

**Постановка проблеми.** Відповідно до технічних умов проведення гірничої виробки несуча здатність кріплення оцінюють виходячи з ідеалізованих передумов: контур виробки достатньо гладкий, порожнечі за кріпленням відсутні, а при їх наявності вони заповнені дрібною породою, навантаження на рамне кріплення рівномірне з усіх боків і т.д. Однак в реальних умовах спорудження більшості гірничих виробок технічні умови [5, 6] не виконуються:

1. Порожнечі закріпного простору перевищують нормативні при буровибуховому способі в 1,7 рази, а при комбайновому вийманні в 2 рази.

2. Закріпний простір не заповнений забутовкою.

3. При комбайновому вийманні середня ширина пустот закріпного простору перевищує ширину пустот у виробці, пройденій буровибуховим способом, в 1,15 рази.

Це призводить до деформації рамного кріплення, зменшенню її несучої здатності в 2 ... 5 разів, і, в кінцевому підсумку, перекріплення і частим ремонтам.

Одним з перспективних способів підвищення стійкості виробки і стану кріплення є перерозподіл навантаження на рамне кріплення за допомогою вибухового розвантаження масиву від напружень в покрівлі гірничої виробки. Так, під час вибуху трьох зарядів розпушування [3], можна домогтися рівномірно розподіленого навантаження на кріплення, проте при подальшій експлуатації виробки в міру зростання зсувів порід покрівлі максимальне навантаження  $q_{\max}$  зміщується до центру верхняка, де і виникає максимальний згинальний момент, що небажано.

**Мета досліджень** – оцінити підвищення несучої здатності рамного кріплення способом вибухового розвантаження порід покрівлі за рахунок створення різних видів розподілу зовнішнього навантаження на раму. **Завданнями** дослідження було встановлення закономірностей зміни працездатності рамного кріплення при формуванні різних видів навантаження з покрівлі виробки. **Об'єкт дослідження** – несуча здатність рамного кріплення, а **суб'єкт** – закономірності управління навантаженням на кріплення.

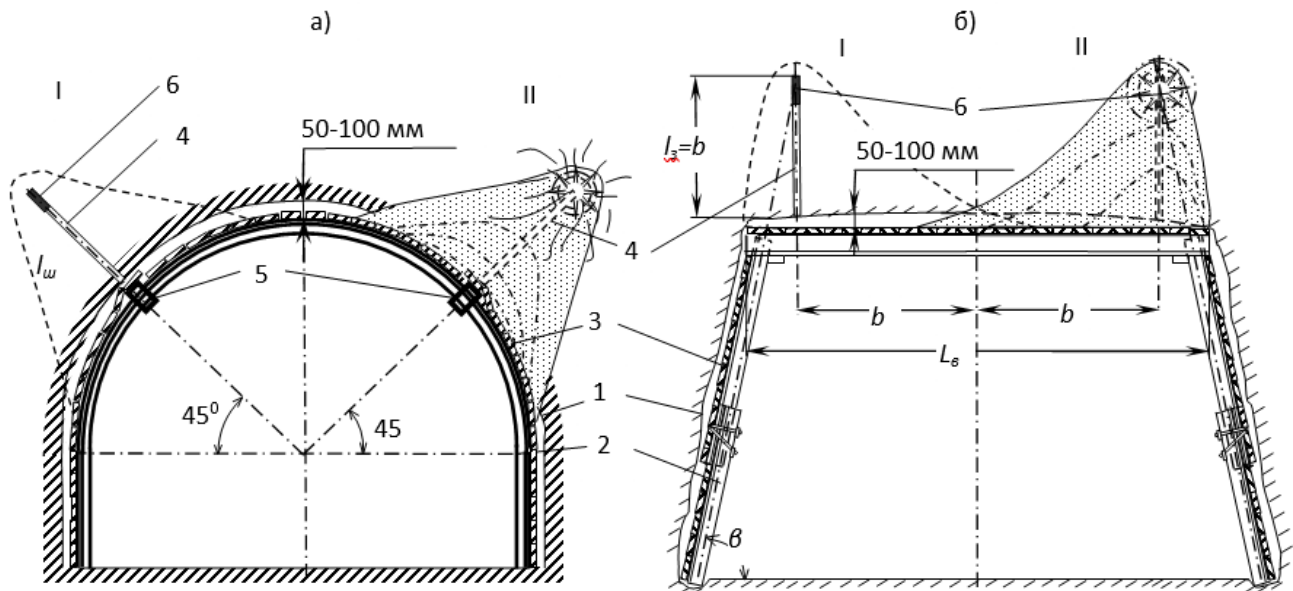
**Основний матеріал.** Сутність вибухового способу створення різного розподілу навантаження на рамне кріплення полягає в тому, що за рахунок буріння розвантажувальних шпурів і підривання в них зарядів вибухової речовини (ВВ) навколо виробки створюють різні види розподілу навантаження на рамне кріплення (рівномірну, параболічну, згідно із законом трикутника і ін.) [3].

Запропонований спосіб для аркового кріплення (рис.2 а) виконують у такий спосіб [7].

При проведенні вироблення 1 після зведення рамного кріплення 2 і установки зтяжки 3 по контуру рами одночасно зі шпурами по вибію бурять в покрівлі два бокових розвантажувальних шпурів 4 в районі вузлів піддатливості 5 рамного кріплення 2 на глибину  $l_u$  таким чином, щоб заряди 6 ВВ в розвантажувальних шпурах 4 розташовувалися в площині рами кріплення. Розвантажувальні

шпури 4 заряджають камуфлетними зарядами 6 ВР і підривають їх одночасно з підриванням шпурів по вибію, створюючи розвантажену зону в покрівлі виробки.

Для трапецієподібного (рис.2 б) кріплення спосіб управління навантаженням на рамне кріплення гірничої виробки виконують наступним чином [8].



I – до вибухового розвантаження; II – після вибухового розвантаження  
Рис. 2. Спосіб управління на рамне кріплення гірничої виробки двома зарядами ВВ для аркового (а) і трапецієподібного (б) кріплення

При проведенні виробки 1 після зведення рамного кріплення 2 і монтажу затяжки 3 по контуру виробки, бурять в покрівлі два розвантажувальних шпурів 4 на відстані між зарядом вибухівки та вертикальною віссю виробки  $b$  на глибину  $l_3$  таким чином, щоб заряди 5 ВР в розвантажувальних шпурах 4 розташовувалися в площині рами кріплення і на продовженні лінії стійки рамного кріплення на глибині, яка дорівнює відстані від заряду до вертикальної осі виробки, а при зміні глибини заряду, відстань до вертикальної осі виробки визначають за формулою:

$$\frac{L_{с}}{4} \leq l_3 = b \leq \frac{L_{с} \cdot \operatorname{tg} \beta}{2(1 + \operatorname{tg} \beta)}, \quad (1)$$

де  $L_{с}$  – довжина верхняка рамного кріплення;  $b$  – відстань від вертикальної осі виробки до заряду;  $\beta$  – кут нахилу стійки рамного кріплення до горизонту;  $l_3$  – глибина розташування заряду.

Для визначення несучої здатності кріплення скористаємося методом кінцевих елементів за допомогою програмного комплексу «Ліра» [9]. Для моделювання слід вибрати досить простий профіль, еквівалентний по несучій здатності стандартному спеціальному взаємозамінному профілю (СВП) для рамного кріплення. Замість стандартного профіля (рис.3 а) приймемо квадратний профіль з

однаковими згинальними моментами (рис. 3 б). Прийємо для розрахунку спец-профіль СВІ №27 ( $W_x = 100,2 \text{ см}^3$ ) [5], причому коефіцієнт подібності для моменту опору  $W$  повинен задовольняти умові:

$$\alpha_w = \frac{W_K}{W_x} = 1; \quad (2)$$

де  $W_K$  – момент опору для моделі кріплення з профілем квадратного перетину,  $\text{см}^3$ ;  $W_x$  – момент опору профілю СВІ №27 по осі  $x$ ,  $\text{см}^3$ .

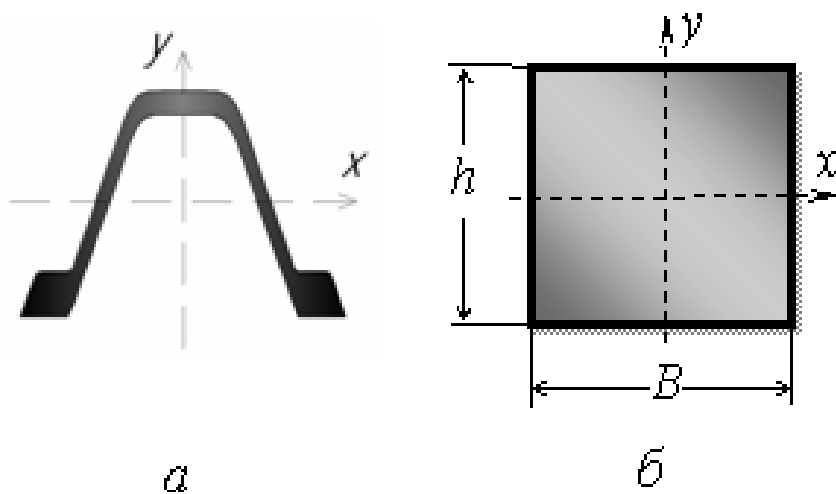


Рис. 3. Схема профілей кріплення

Момент опору еквівалентного профілю прямокутного перерізу по осі  $x$  визначається за формулою [10]:

$$W_K = \frac{J}{z_{\max}} = \frac{2J}{h} = \frac{B \cdot h^2}{6}, \text{ см}^3, \quad (3)$$

де:  $z_{\max} = \frac{h}{2}$  – відстань від нейтральної осі до найбільш віддалених від неї точок,  $\text{см}$ ;  $h$  – висота профілю,  $\text{см}$ ;  $B$  – ширина профілю,  $\text{см}$ ;  $J$  – момент інерції,  $J = \frac{B \cdot h^2}{12}$ ,  $\text{см}^4$ .

Для еквівалентного квадратного профілю при  $B=h$  і знаходимо ширину сторін за формулою:

$$h = \sqrt[3]{6W_K} = \sqrt[3]{6 \cdot 100,2} = 8,42 \text{ см}. \quad (4)$$

З типових перетинів в ПК ЛІРА приймаємо сталь гарячекатану квадратну з профілем 85x85 мм по ДЕСТ 2591-88. Звідси знаходимо уточнений момент опору профілю прямокутного перерізу по осі  $x$ :

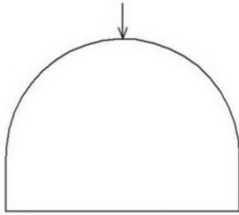
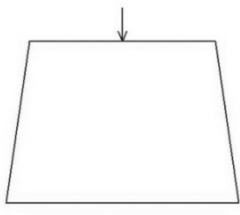
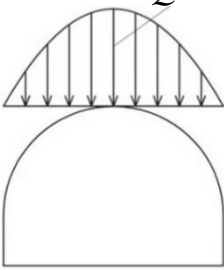
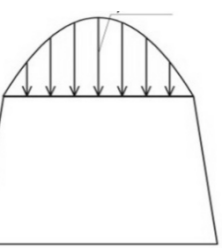
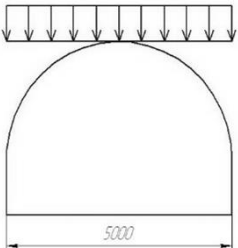
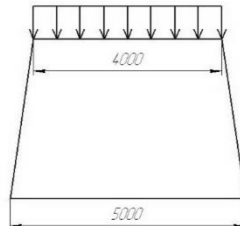
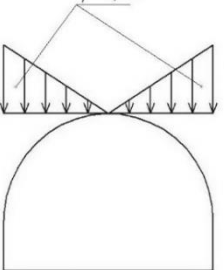
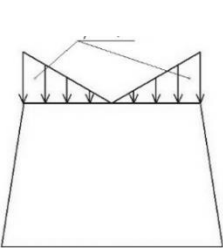
$$W_k = \frac{8,5^2}{6} = 102,3 \text{ см}^3. \quad (5)$$

Похибка використання квадратного профілю замість спецпрофіля СВП №27 склала 2%, що цілком допустимо для подальших розрахунків.

Досліджуємо працездатність цих кріплень при різних видах розподілу навантаження, кожна з яких відповідає сумарному навантаженню на кріплення  $Q=50 \text{ кН}$ , що для рівномірного навантаження дає  $q=10 \text{ кН/м}$  (табл. 1). Для моделювання задаємося геометричними параметрами арочною і трапецієподібного кріплення, відповідні типовим перетинам гірничих виробок.

При виборі типу кріплення і щільності її установки в гірничій виробці за нормами [5] розраховують несучу здатність кріплення з параболічним навантаженням. Однак, як правило, через погану якість забутовки закріпного простору або її відсутності, навантаження на верхняк кріплення ближче до зосередженої сили, внаслідок чого працездатність кріплення зменшується в 1,5 ... 2,5 рази.

Таблиця 1

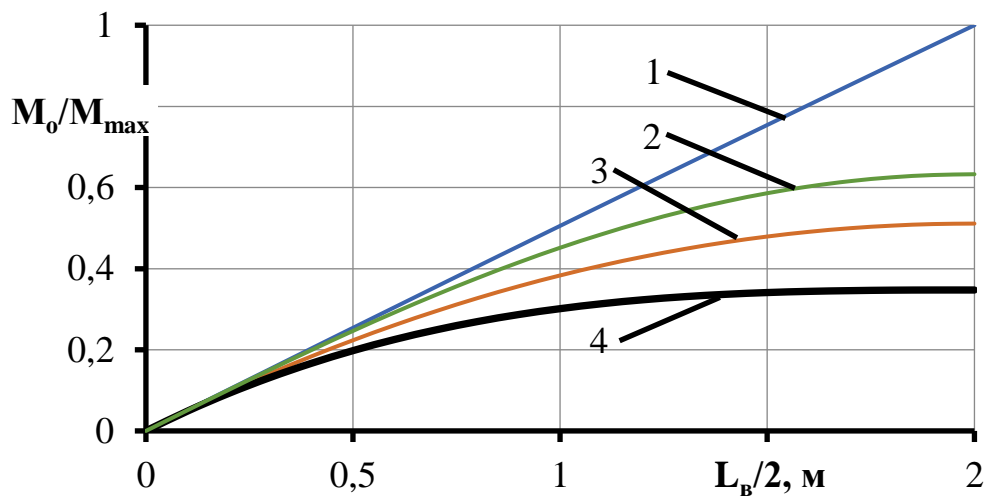
Види навантаження на арочне і трапецієподібне рамне кріплення			
Зосереджена $Q = 50 \text{ кН}$		Параболічна $Q = 50 \text{ кН}$	
			
Рівномірно-розподілене $q = 10 \text{ кН/м}$ $q = 12,5 \text{ кН/м}$		Згідно із законом трикутника $Q = 25 \text{ кН}$ $Q = 25 \text{ кН}$	
			

При виконанні всіх технічних умов по проведенню виробок, несуча здатність кріплення в податливому режимі обмежується жорсткістю замків піддатливості, так наприклад, у арочною піддатливого кріплення КМП-А3 з профілем СВП №27 та замками ЗПК, несуча здатність становить 250 кН, а в жорсткому режимі - 406 кН [5]. Підвищення несучої здатності кріплення в піддатливому режимі вельми проблематично, тому що пов'язане з необхідністю підвищення опору вузла піддатливості, а ось підвищення несучої здатності рамного кріп-

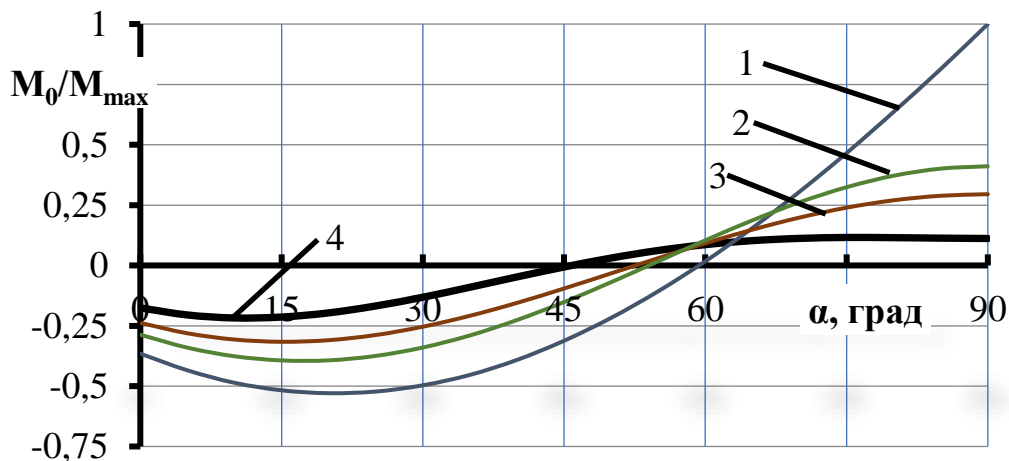
лення в жорсткому режимі, коли кріплення досягла своєї максимальної піддатливості, можливо шляхом перерозподілу більшої частини навантаження на стійки кріплення.

Розглянемо графіки зміни згинальних моментів верхняка трапецієподібного і аркового кріплення при різних видах навантаження, отримані шляхом моделювання методом кінцевих елементів.

Графіки на рис. 4 а показано зміну відношення  $M/M_{max}$  згинального моменту  $M$  в верхняку трапецієподібного кріплення в міру віддалення від краю верхняка до його центру до максимального моменту  $M_{max}$  створюваному при зосередженому навантаженні.



а)



б)

- 1 – зосереджене навантаження; 2 – параболічне навантаження;
- 3 – рівномірно-розподілене навантаження;
- 4 – навантаження, розподілене за законом трикутника

Рис. 4. Графіки згинальних моментів рамного трапецієвидного (а) і аркового (б) кріплення

З графіків видно, що найменший згинальний момент при однаковому  $Q$  має рама з навантаженням, розподіленим за законом трикутника (4), що менше в 3 рази моменту від зосередженого навантаження (1), в 2 рази менше моменту від параболічного (2) і в 1,5 рази від рівномірно розподіленого навантаження (3).

Отже, щільність установки трапецієподібного кріплення після вибухового розвантаження порід можна зменшити в два рази.

Проаналізуємо графіки зміни показника  $M/M_{max}$  по колу рамного кріплення  $\alpha$  (де  $90^0$  – центр верхняка),

З графіків видно, що прикладене навантаження по закону трикутника на рамне арочне кріплення має найменший згинальний момент, і в 2 рази менший момент в порівнянні з моментом від навантаження по параболічному закону. Отже, несуча здатність аркового кріплення КМП-А3 з профілем СВП №27 буде дорівнювати  $Q = 406 * 2 = 812$  кН.

### Висновки.

1. При виконанні вибухового розвантаження порід в покрівлі виробки можна забезпечити різні схеми розподілу навантаження:

– параболічне – при підриванні одного заряду розпушування по центру верхняка;

– рівномірно-розподілене – при підриванні трьох зарядів розпушування в покрівлі виробки;

– згідно із законом трикутника при підриванні двох зарядів розпушування над стійками рамного кріплення;

2. Показник зміни згинальних моментів в обох конструкціях рамного кріплення значно зменшується у міру переходу від зосередженої до інших видів розподілу навантажень (параболічного, рівномірно-розподіленого і трикутної);

3. При використанні способу вибухового розвантаження двома зарядами розпушування над стійками рамного кріплення, що забезпечує трикутний розподіл навантаження, щільність установки кріплення можна зменшити в два рази для аркового і трапецієподібного рамного кріплення;

4. Спосіб вибухового розвантаження порід дозволяє істотно підвищити стійкість гірничих виробок, що особливо актуально для ведення гірничих робіт на великих глибинах при інтенсивному прояві гірського тиску.

### Перелік посилань

1. Павлов, Є.Є., & Фесенко, Е.В. (2021). Аналіз стану стійкості гірничих виробок та шляхи розвитку гірничої галузі України. *Actual trends of modern scientific research. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference*. MDPC Publishing. Munich, Germany. 229-235.
2. Литвинский, Г.Г., & Павлов, Е.Е. (2008). Исследование геомеханических параметров взрывной разгрузки пород в кровле выработки. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*, 27, 5-15.
3. Павлов, Е.Е. (2009). Анализ негативных последствий переборков при проходке горных выработок. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. Алчевск, 28, 125-133.
4. Литвинский, Г.Г. Гайко, Г.И., & Кулдыркаев, Н.И. (1999). *Стальные рамные крепи горных выработок*. Киев: Техника.



5. *СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони : [чинний від 2008-04-01]* (2007). Київ: Мінвуглепром України.
6. *Справочник по креплению горных выработок.* (1976). (Изд. 2, перераб. и доп.) М., «Недра».
7. Павлов, Є.Є., & Литвинський, Г.Г. (2010). *Патент України 48196.* Київ: Державне патентне відомство України.
8. Павлов, Є.Є., & Литвинський, Г.Г. (2008). *Патент України 29057.* Київ: Державне патентне відомство України.
9. *Програмний комплекс ПК ЛІРА.* (2002). Київ: НИИАСС.
10. Беляев, Н.М. (1976). *Сопротивление материалов.* Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука».

### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Оценить повышение несущей способности рамной крепи способом взрывной разгрузки пород кровли за счет создания различных схем распределения внешней нагрузки на раму.

**Методы исследования.** Выполнены многочисленные исследования методом конечных элементов несущей способности рамной крепи с помощью программного комплекса «Ли́ра».

**Результаты.** Методом конечных элементов изучены закономерности изменения несущей способности рамной крепи горной выработки в зависимости от изменения вида нагрузки. Путем сравнения различных схем нагрузки на крепь, разработаны рекомендации по размещению разгрузочных шпуров вокруг выработки и доказана целесообразность и достаточность схемы разгрузки пород кровли выработки от напряжений двумя зарядами разрыхления, которые размещают над узлами податливости. Разработаны рекомендации по повышению устойчивости горной выработки за счет перераспределения нагрузки на рамную крепь взрывной разгрузкой пород кровли.

**Научная новизна.** Установлена зависимость устойчивости горной выработки и несущей способности рамной крепи во время взрывной разгрузки пород кровли от законов распределения внешней нагрузки, приложенной к рамной крепи со стороны массива. Доказано, что наибольшую нагрузку рамная крепь выдерживает при использовании треугольного распределения нагрузки, когда максимальная нагрузка приходит на стойки крепи, что можно обеспечить с помощью способа взрывной разгрузки двумя зарядами рыхления в кровле выработки.

**Практическое значение** заключается в определении параметров обеспечения устойчивости горных выработок с помощью взрывной разгрузкой пород кровли в зависимости от разных схем нагрузки на рамную крепь и разработке рекомендаций по повышению устойчивости горных выработок, проведенных в различных горно-геологических условиях. Треугольная схема нагружения на рамную крепь обеспечивается при использовании взрывной разгрузки пород кровли двумя зарядами рыхления, при этом можно уменьшить плотность установки крепи минимум в два раза для арочной и трапециевидной рамной крепи.

**Ключевые слова:** *подготовительная выработка, рамная крепь, работоспособность рамы, взрывная разгрузка, заряд рыхления, изгибающий момент, моделирование методом конечных элементов.*

### ABSTRACT

**Objective.** To assess the increase in the bearing capacity of the frame support by the method of explosive unloading of roof rocks by creating various schemes for distributing the external load on the frame.

**Research methods.** Numerous studies were carried out by the method of finite elements of the bearing capacity of frame support using the "Lira" software package.

**Findings.** The finite element method was used to study the regularities of changes in the bearing capacity of the frame support of a mine working depending on the change in the type of load. By comparing various schemes of load on the support, recommendations were developed for the placement of unloading holes around the working and the expediency and sufficiency of the scheme for unloading the roof of the working from stresses by two loosening charges, which are placed above the yielding nodes, were proved. Recommendations have been developed to improve the stability of mine workings by redistributing the load on the frame support by explosive unloading of the roof rocks.

**The originality.** The dependence of the stability of the mine workings and the bearing capacity of the frame support during the explosive unloading of the roof rocks on the distribution laws of the external load applied to the frame support from the massif side has been established. It has been proven that the frame support can withstand the greatest load when using a triangular load distribution, when the maximum load comes on the support struts, which can be achieved using the method of explosive unloading with two loosening charges in the roof of the mine.

**Practical implications** consist in determining the parameters of ensuring the stability of mine workings using explosive unloading of roof rocks, depending on different load schemes on the frame support and the development of recommendations for increasing the stability of mine workings carried out in various mining and geological conditions. The triangular scheme of loading on the frame support is provided when using the explosive unloading of roof rocks with two loosening charges, while the density of the support installation can be reduced by at least two times for arched and trapezoidal frame support.

**Keywords:** *development workings, frame support, frame performance, explosive unloading, loosening charge, bending moment, finite element modeling.*