

А.О. Остапчук, аспірант  
І.Д. Литвинчук, аспірант  
О.О. Фролов, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## Дослідження впливу параметрів виймання на стійкість гірських масивів при розробці прибортових запасів на кар'єрах

*Представлені результати наукових досліджень щодо можливості виймання прибортових запасів на кар'єрах, які розробляють пластові та лінзоподібні родовища.*

*Відповідно до проведеного аналізу наукових публікацій встановлено, що відроблення прибортових запасів є найбільш ефективним при застосуванні технології виймання з відкритого простору кар'єру. В якості виймального обладнання рекомендуються використовувати комплекси Highwall або аналогічні їм, в основі яких закладено принцип руйнування та послідовного виймання гірських порід буровим або ріжучим виконавчим органами.*

*Для умов Семенівського родовища бурого вугілля визначена максимальна ширина міжкамерного цілика, при якій повинна забезпечуватися стійкість пройдених гірничих виробок. Виконано моделювання поведінки борта кар'єру під час виймання прибортових запасів комплексом Highwall зі шнековим виконавчим органом і виконавчим органом безперервної дії, при застосуванні якого утворюється прямокутна форма перерізу виробки. Для встановлення стійкості підробленого борту кар'єру розраховані значення осідань поверхні. Моделювання виконано у програмному комплексі PLAXIS 3D Tunnel методом кінцевих елементів із застосуванням критерію Мора-Кулона.*

*Доведено, що під час проходження виймальних виробок за допомогою шнекового виконавчого органу їх стійкість і стійкість гірського масиву забезпечується повною мірою. Вертикальне осідання земної поверхні у місці підробки не перевищує критичної межі ( $15 \cdot 10^{-3}$  м) при досліджуваних інтервалах відстаней між виробками. При вийманні прибортових запасів комплексом Highwall з безперервним виконавчим органом відбувається обрушення утворюваних виробок на початкових стадіях відробки дії, тобто стійкість гірничих виробок прямокутної форми не забезпечується.*

**Ключові слова:** борт кар'єру; прибортові запаси; корисна копалина; виймальний комплекс; гірський масив; вертикальне осідання; виробка.

**Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями.** Одним з головних завдань при видобуванні корисних копалин є найбільш повне їх виймання з надр. Тому традиційні технології та технологічні схеми відробки родовищ дуже часто потребують доповнень та змін залежно від умов розробки. На вибір технологічної схеми розробки головним чином впливає геологічна будова родовища, зокрема, фізико-механічні властивості корисних копалин і вміщуючих порід, форма залягання, присутність геологічних порушень, кут падіння тіла корисної копалини тощо. Від правильності вибору технологічної схеми відробки, перш за все, залежить ступінь вилучення корисних копалин на кар'єрі.

Відкритий спосіб розробки родовищ характеризується високою продуктивністю праці і відносно низькою собівартістю видобутку корисних копалин. Однак, як свідчать наукові джерела, після відробки родовищ в бортах кар'єрів може залишатися від 20 до 45 % корисних копалин, які зазвичай зараховують до нормативних втрат [1]. Отже, розробка прибортових запасів корисних копалин дозволяє збільшити ступінь їх виймання та підвищити ефективність відробки кар'єрів.

Найбільш перспективним напрямком з відробки прибортових запасів до проектних контурів кар'єрів в межах ліцензійних площ є застосування комбінованої технології відробки. Вона є ефективною для діючих кар'єрів і розрізів з метою підвищення їх рентабельності та повноти виймання корисних копалин. Перехід від відкритої розробки до підземної не потребує високих матеріальних і фінансових витрат при відпрацюванні прибортових запасів. Однак, аналіз розробки родовищ відкритим способом показує, що лише до 18 % гірничих підприємств здійснюють розробку прибортових запасів [1]. Інші підприємства переводять ці запаси в категорію забалансових та списують. Тому виймання прибортових запасів у межах проектних контурів кар'єрів є актуальним науково-технічним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових публікацій з відпрацювання родовищ відкритим способом у межах відведених ліцензійних площ показує, що в бортах кар'єрів залишається значна кількість запасів корисних копалин. Корисні копалини в бортах кар'єрів можуть бути розміщені

безпосередньо біля укосу або на певній відстані від нього. Глибина залягання прибортових запасів залежить від кінцевої глибини кар'єру та може досягати значних значень [2].

Особливість відпрацювання прибортових запасів полягає в тому, що змінюються геомеханічні властивості гірського масиву в бортах кар'єру. Проведення гірничих виробок у бортах кар'єру змінює напружено-деформований стан масиву. Це негативно впливає на стійкість укосів та сприяє утворенню поверхонь ковзання, що може спричинити обвалення порід. У зв'язку з цим, відпрацювання корисних копалин у бортах кар'єрів треба здійснювати лише після приведення укосів у гарантовано стійкий стан. Тому встановлення параметрів бортів кар'єрів має важливе значення. При постановці бортів у кінцеве положення необхідно враховувати фізико-механічні властивості гірських масивів, гідрогеологічні та інженерно-геологічні умови розробки родовища, кути укосів бортів кар'єру, розміщення корисних копалин у бортах та його кількість [3].

Для відпрацювання корисних копалин в неробочих бортах кар'єрів застосовували, головним чином, підземні гірничі технології, а саме: залишення ціликів і проведення гірничих робіт [4]. До недоліків цього способу варто зарахувати низьку ефективність виконання гірничих робіт, незначний коефіцієнт вилучення корисних копалин, висока небезпечність праці тощо. Тому останнім часом для відпрацювання запасів у бортах кар'єру почали застосовувати безлюдні технології виймання корисних копалин з відкритих виробок кар'єру. В основу процесу виймання закладено принципи руйнування корисних копалин агрегатами з буровим або ріжучим виконавчим органом, зокрема комплекси типу Highwall. Такі комплекси широко розповсюджені в Австралії, Індонезії, США та інших країнах, оскільки вони є безпечними і забезпечують економічну доцільність такого способу вилучення корисних копалин. Найбільш доцільним є відпрацювання прибортових запасів, які мають форми залягання пластів та лінз.

Як зазначено авторами роботи [5], багато пластів корисних копалин, що економічно або технічно непридатні для звичайних методів розробки, можуть бути відпрацьовані за допомогою комплексу Highwall. Цей гірничий комплекс має у своєму складі комбайн безперервної дії або шнекову машину, які використовуються для виймання вугілля або інших корисних копалин з неробочих бортів кар'єру.

На рисунку 1 наведена класифікація гірничих комплексів Highwall [4]. Система Miner є безперервною і поділяється на два типи: перший являє собою систему Add-car, а другий – систему ArchVeyor (скребковий конвеєр). Add-car складається з комбайну безперервної дії (рис. 2), нарощувальної установки, укладальника конвеєру та навантажувачів. У систему ArchVeyor входять комбайн безперервної дії, ланцюговий конвеєр та споряджений автомобіль.

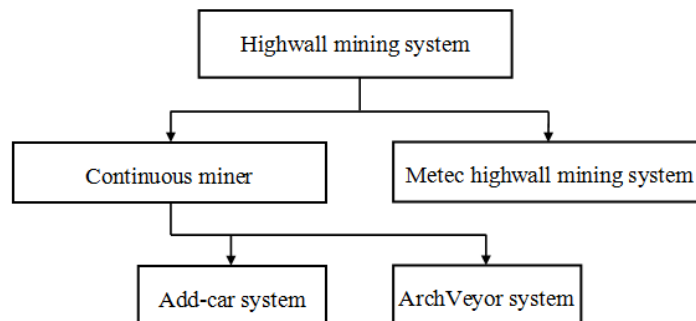


Рис. 1. Класифікація виймальних комплексів Highwall [2]



Рис. 2. Комбайн безперервної дії комплексу Highwall [2]

Система комплексу Highwall здатна робити отвори в гірському масиві прямокутної форми довжиною до 350 м. Параметри отвору залежать від характеристик комплексу. Комплекс здатний розробляти гірські породи міцністю  $f=3,8...7$  за шкалою Протод'яконова. При видобутку корисних копалин здійснюється повний автоматизований контроль роботи комплексу та гірського масиву. Видобувний комплекс Highwall Miner дозволяє відробляти пласти потужністю від 1,1 м до 4,8 м з максимальним кутом падіння до  $25^\circ$  та пласти потужністю від 4,5 м з кутами падіння  $50-90^\circ$  [4].

Система Highwall зі шнековим виконавчим органом (Metec highwall mining system) є більш простою і може утворювати круглі отвори довжиною понад 100 м і діаметром 0,5 м та більше в пластах неробочих бортів (рис. 3). Ця система більш маневрена, ніж Highwall Miner, однак міцність розроблюваних порід не повинна перевищувати  $f=3$ . Область її застосування обмежена умовами залягання пластів, їх параметрами і властивостями, а саме кутом падіння, тріщинуватістю, наявністю розломів і вигинів [5, 6].



Рис. 3. Шнековий виконавчий орган [2]

Досвід застосування комплексів типу Highwall на кар'єрах, наукові дослідження та чисельне моделювання показали, що шнекові гірничовидобувні системи забезпечують високу стабільність гірничих виробок та стійкість підробленого борта кар'єру [6–8].

В Україні є значна кількість родовищ корисних копалин, після відробки яких, можлива їх доробка шляхом виймання прибортових запасів. Зокрема, це родовища кам'яного та бурого вугілля, марганцевих руд, графітів, фосфоритів, гіпсу, вапняку, горючих сланців, каоліну тощо. При досягненні на таких кар'єрах граничного коефіцієнта розкриття, тобто, коли продовження розробки родовища відкритим способом стає не вигідним, в бортах залишаються значні обсяги корисних копалин. Тому застосування технологій безлюдного видобутку корисних копалин, в основі яких закладені принципи застосування бурових агрегатів різної конструкції, є одним з напрямків продовження виймання запасів.

**Мета дослідження.** На підставі виконаного аналізу наукових досліджень і публікацій сформульовано мету роботи, яка полягає в обґрунтуванні можливості застосування технології розробки прибортових запасів на кар'єрах та дослідженні впливу параметрів виймання на стійкість гірських масивів на прикладі Семенівського родовища бурого вугілля Олександрійського вугільного промислового району України.

**Викладення основного матеріалу.** До основних параметрів, що визначають безпечність і економічність застосування технології виймання прибортових запасів корисних копалин на кар'єрах, належать [9]:

- ширина покрівлі камер виймання, що забезпечує її стійкість;
- ширина міжкамерних ціликів;
- ширина міжблокових ціликів;
- відстань між міжблоковими ціликами.

Дослідженнями вчених встановлено, що безпечні параметри міжкамерних ціликів залежать від ширини виймкових камер, а також від їх довжин.

Ширину міжкамерних ціликів необхідно приймати такою, щоб виключити передчасне руйнування цих ціликів. Вони повинні руйнуватися лише після закінчення проведення наступної від цілика виймкової камери [2]. У такому разі при проведенні наступної виймальної камери, попередня камера повинна знаходитися у стійкому стані, а міжкамерний цілик не повинен бути зруйнований. При виконанні таких умов буде забезпечена безпечність виймальних гірничих робіт.

Розрахунок ціликів рекомендовано здійснювати на основі методів, що використовуються при розрахунку параметрів камерної системи розробки пластів. Ширину міжкамерних ціликів рекомендовано

приймати 1/3 або 1/2 від потужності пласта. При цьому, як показує досвід, необхідно, щоб мінімальна ширина міжкамерного цілика не перевищувала 1 м [2].

Максимальна ширина міжкамерного цілика  $B_{\text{мкц}}$ , м, залежить від міцності порід, глибини відпрацювання пласта, його потужності та визначається з умови забезпечення стійкості:

$$B_{\text{мкц}} = \frac{\gamma \cdot H_{\text{сер}} - a \cdot \sigma_{\text{пл}} + \left[ (\gamma \cdot H_{\text{сер}} - a \cdot \sigma_{\text{пл}})^2 + 4c \cdot B_{\text{к}} \cdot \sigma_{\text{пл}} \cdot \gamma \cdot \frac{H_{\text{сер}}}{m_{\text{пл}}} \right]^{0,5}}{2c \frac{\sigma_{\text{пл}}}{m_{\text{пл}}}}, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – об'ємна вага вугілля, МН/м<sup>3</sup>;  $H_{\text{сер}}$  – середня глибина відпрацювання, м;  $\sigma_{\text{пл}}$  – опір пласта вугілля на одноосьове стиснення, МПа;  $a, c$  – емпіричні коефіцієнти, які дорівнюють, відповідно 0,4 та 0,6;  $B_{\text{к}}$  – ширина виймальної камери, м;  $m_{\text{пл}}$  – потужність пласта, м.

За результатами аналізу геологічної будови Олександрійського вугільного промислового району було встановлено, що покриваючими породами пласту бурого вугілля є піски київської, полтавської та харківської свит, глинисті піски та глини, середньою потужністю розкрити 50–65 м. Середня потужність пласта бурового вугілля складає 3–4 м [10].

Для умов Семенівського родовища бурого вугілля визначена максимальна ширина міжкамерного цілика  $B_{\text{мкц}}$  при відпрацюванні його комплексом Highwall. Вихідні дані прийняті наступними:  $\gamma=0,012$  МН/м<sup>3</sup>;  $H_{\text{сер}}=60$  м;  $\sigma_{\text{пл}}=1,573$  МПа;  $B_{\text{к}}=3,5$  м;  $m_{\text{пл}}=3,0$  м. Таким чином, розрахункова максимальна ширина міжкамерного цілика склала  $B_{\text{мкц}}=3,0$  м.

Для дослідження геомеханічної поведінки борта кар'єру в процесі виймання прибортових запасів корисних копалин комплексом Highwall та після виймання, виконаємо чисельне моделювання борта в PLAXIS 3D Tunnel з використанням критерію міцності Мора-Кулона [11, 12]. Критерій Мора-Кулона представляє собою лінійну залежність дотичного напруження породи від значення нормального напруження, яке прикладене до породи:

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg}\varphi + C, \quad (2)$$

де  $\tau$  – величина дотичного напруження, МПа;  $\sigma$  – величина нормального напруження, МПа;  $C$  – зчеплення, МПа;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя, град.

Гірський масив у борті кар'єру поділимо на елементарні об'єми, в кожному з яких визначається стійкість до руйнування. В основі процесу розрахунку стійкості закладено чисельний метод сіток. У PLAXIS 3D Tunnel для вирішення таких задач запропоновано використовувати кроково-ітераційний алгоритм, в основі якого закладені методи інтегрування по параметру, тобто коли на кожному наступному кроці використовується результат розв'язання задачі попереднього кроку [2, 13].

Для дослідження обрано тривимірну модель з наступними параметрами: висота моделі – 73 м; ширина – 20 м, глибина – 40 м [2]. Товщина вугільного пласта становить 3,0 м. Пласт залягає в пісках, потужність яких над покрівлею становить 60 м, під подошвою – 10 м. Фізико-механічні властивості досліджуваних гірських порід наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості досліджуваних гірських порід

Назва породи	Щільність, кН/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, кН/м <sup>2</sup>	Коефіцієнт Пуасона	Кут внутрішнього тертя, град	Щеплення, кН/м <sup>2</sup>
Пісок	13,72	39000	0,3	36	8
Буре вугілля	11,96	1,8·10 <sup>7</sup>	0,43	30	5·10 <sup>3</sup>

Моделювання виймання пласта вугілля системою Highwall виконано для двох варіантів:

– шнекового виконавчого органу (Metec highwall mining system) діаметром 2,0 м, що пройдений на глибину 40 м (рис. 4, а);

– виконавчого органу безперервної дії, що утворює камери прямокутної форми перерізу шириною 3,5 м, висотою 2,0 м та глибиною 40 м (рис. 4, б).

Відстань між виймальними виробками в борту змінювалась від 4,0 до 0,5 м з інтервалом 0,5 м.

Значення зміни осідань поверхні борту кар'єру залежно від відстані між пройденими виробками для зазначених вище варіантів моделювання наведено в таблиці 2 [2].

Таблиця 2

Зміна осідань, 10<sup>-6</sup> м, поверхні у місці розробки прибортових запасів при різній відстані між виробками

Форма перерізу	Відстань між виробками в борту кар'єру, м							
	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5
Кругла	4,77	4,77	5,57	5,96	7,30	8,03	8,54	11,89
Прямокутна	обвал	обвал	обвал	обвал	обвал	обвал	обвал	обвал

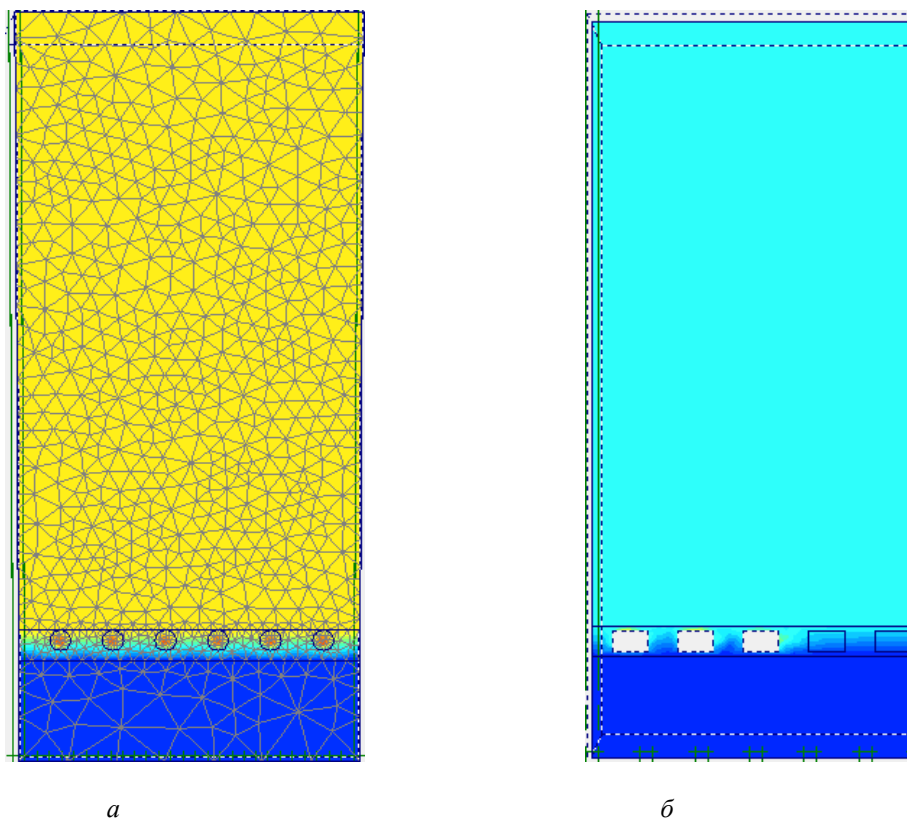


Рис. 4. Моделювання борту кар'єру після виймання прибортових запасів виробками на відстані 3,0 м одна від одної: а – шнековим виконавчим органом; б – безперервним виконавчим органом

Залежність зміни осідань поверхні борта від відстані між виробками з достатньою точністю можна описати поліномом 3-го порядку:

$$\eta = 14,508 - 0,197d^3 + 1,873d^2 - 6,825d, \quad (3)$$

де  $\eta$  – вертикальне осідання поверхні борту,  $10^{-6}$  м;  $d$  – відстань між гірничими виробками, пройденими в борту кар'єру, м.

Величина достовірності апроксимації становить  $R^2=0,968$ .

Аналіз даних таблиці 2 свідчить, що вертикальні осідання поверхні при застосуванні шнекового виконавчого органу є незначними та не перевищують критичної межі при будь-якій відстані між виробками  $i$  (змінюється від  $4,8 \cdot 10^{-6}$  м до  $11,9 \cdot 10^{-6}$  м). При моделюванні відпрацювання прибортових запасів системою Highwall з прямокутними отворами відбувається обрушення порід після проходження декількох виробок (рис. 4, б). Аналіз результатів моделювання показує, що обрушення утворених виробок прямокутного перерізу починається вже на початкових стадіях відпрацювання. Зокрема, при відстанях між виробками 4,0–1,0 м обвалення спостерігається в третій виробці після початку проходки, а при відстані між камерами 0,5 м – в першій виробці.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** За результатами аналізу попередніх наукових досліджень встановлено, що прибортові запаси корисних копалин на кар'єрах можуть становити від 20 до 45 %. Однак, лише 18 % підприємств проводять їх виймання, інші переводять прибортові запаси в категорію забалансових та списують. Тому розробка прибортових запасів дозволить підвищити ступінь виймання корисних копалин та підвищить загальну ефективність роботи кар'єру.

Доведено, що, на даний час, відпрацювання прибортових запасів найбільш ефективно при застосуванні технології виймання з відкритого простору. Запропоновано до використання виймальні комплекси Highwall та їх аналоги, в основі яких закладено принцип руйнування гірських порід буровим або ріжучим виконавчим органами.

Для умов Семенівського родовища бурого вугілля визначена максимальна ширина міжкамерного цілика, при якій повинна забезпечуватися стійкість пройдених камер, вона становить 3,0 м. Виконано моделювання поведінки борту кар'єру під час відпрацювання прибортових запасів комплексом Highwall зі шнековим виконавчим органом (кругла форма перерізу виробки) і виконавчим органом безперервної дії, при якій утворюється прямокутна форма перерізу камер. Розраховані чисельні значення осідань поверхні з метою встановлення стійкості подрібненого борту кар'єру. Чисельне моделювання виконано в програмному комплексі PLAXIS 3D Tunnel методом кінцевих елементів із застосуванням критерію міцності для гірських порід Мора-Кулона.

Встановлено, що стійкість гірничих виробок забезпечується під час проходження їх за допомогою шнекового виконавчого органу. Вертикальне осідання земної поверхні, під якою були пройдені виробки, не перевищує критичної межі ( $15 \cdot 10^{-3}$  м) при будь-якому інтервалі досліджуваних відстаней між виробками. При вийманні прибортових запасів комплексом Highwall з безперервним виконавчим органом відбувається обрушення утворених виробок на початкових стадіях відробки дії, тобто стійкість гірничих виробок прямокутної форми не забезпечується. При відстанях між виробками від 4,0 м до 1,0 м обвалення гірського масиву спостерігається у третій виробці після початку проходки, при відстані між виробками 0,5 м обвалення відбувається вже у першій виробці. Таким чином, навіть при більших відстанях, ніж максимальна припустима ширина міжкамерного цілика, умова стійкості пройдених камер не виконується.

Зважаючи на отримані результати, подальші наукові дослідження будуть спрямовані на вивчення особливостей моделювання процесу безлюдного виймання корисних копалин в бортах кар'єру комплексами, що мають різні виконавчі органи.

#### Список використаної літератури:

1. Гірничий енциклопедичний словник, т.2 / За редакцією В.С. Білецького. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2002. – 632 с.
2. *Стецьків І.В.* Обґрунтування параметрів виймання запасів корисних копалин в бортах кар'єрів при розробці пластових родовищ : магістерська дисертація : 8.05030101 / *І.В. Стецьків*. – К., 2016. – 138 с.
3. *Фролов О.О.* Моделювання пружно-пластичного деформування бортів кар'єру під час виймання прибортових запасів вугілля / *О.О. Фролов, І.К. Бабичев, І.В. Стецьків, О.М. Клеван* // Вісник ЖДТУ: Технічні науки. – 2015. – № 3 (74). – С. 148–154.
4. Application of Highwall Mining System to Recover Residual Coalin End-walls / *H. Shimada, Y. Chen, A. Hamanaka, T. Sasaoka, H. Shimada and K. Matsui* // International Conference on Earth Science and Technology Proceedings. Procedia Earth and Planetary Science. – 2013. – Vol. 6. – P. 311–318.
5. Geotechnical Issues on Application of Highwall Mining System in Indonesia / *T. Sasaoka, H. Shimada, A. Hamanaka, B. Sulistianto, M. Ichinose and K. Matsui*. – Hanoi, Vietnam, 2015.
6. *Стецьків І.В.* Відробка запасів корисних копалин в неробочих бортах кар'єрів комплексами Highwall / *І.В. Стецьків, І.К. Бабичев, О.О. Фролов* / Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», 2016. – С. 55–56.
7. Australian Coal Mining Practice / *A.J. Hargraves, C.H. Martin etc.* // The Australian Institute of Mining Metallurgy, 1993, pp. 238–242.
8. *Mark C.* Analysis of retreat mining pillar stability / *C. Mark, F.E. Chase, A.A. Campoli* // Proceedings of 14th Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV, U.S.A. – 1995, pp. 49–59.
9. *Бабичев І.К.* Аналіз існуючих методів розрахунку технологічних параметрів розробки прибортових запасів корисних копалин з застосуванням HIGHWALL MINING SYSTEM / *І.К. Бабичев, О.О. Фролов* // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», ІЕЕ, 2017. – С. 390–394.
10. *Оксенчук Р.М.* Аналіз перспектив вугленості Олександрійського буровугільного району, 1990–1993 pp. / *Р.М. Оксенчук*. – Київ : Геофонд України, 1993. – С. 18–35.
11. Plaxis Version 8 Scientific Manual / Edited by R.B.J. Brinkgreve Delft University of Technology & PLAXIS b.v. – 2004.
12. *Фролов О.О.* Встановлення деформації бортів розрізу після відробки прибортових запасів вугілля : зб. наук. праць / *О.О. Фролов, І.К. Бабичев* // Вісник НТУУ "КПІ". Серія «Гірництво», 2016. – Вип. 31. – С. 48–56.
13. *Бабичев І.К.* Моделювання процесу деформації бортів розрізу при відробці прибортових запасів вугілля / *І.К. Бабичев, О.О. Фролов* // Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, м. Шостка, 23–25 листопада 2016 року. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – С. 174–177.

#### References:

1. Gornichii entsiklopedichnii slovník (2002), T. 2, Donets'k, 632 p.
2. Stetskiy, I.V. (2016), Obgruntuvannia parametriv vyimannia zapasiv korysnykh kopalyn v bortakh karieriv pry rozrobtsi plastovykh rodovyshch, mahisterska dysertatsiia, Kyiv, 138 p.
3. Frolov, O.O., Babichev, I.K., Stetskiy, I.V., Klevan, O.M. (2015), «Modeliuvannia pruzhno-plastychnoho deformuvannia bortiv kar'ieru pid chas vyimannia prybortovykh zapasiv vuhillia», *Visnyk ZhDTU: Tekhnichni nauky*, Zhytomyr, No. 3(74), pp. 148–154.
4. Shimada, H., Chen, Y., Hamanaka, A., Sasaoka, T., Shimada, H. and Matsui, K. (2012), «Application of Highwall Mining System to Recover Residual Coalin End-walls», *International Conference on Earth Science and Technology Proceedings*, September 2012, pp. 311–318.
5. Sasaoka, T., Shimada, H., Hamanaka, A., Sulistianto, B., Ichinose, M. and Matsui, K. (2015), «Geotechnical Issues on Application of Highwall Mining System in Indonesia», *Vietrock 2015 an ISRM specialized conference Vietrock 2015*, 12–13 March 2015, Hanoi, Vietnam.
6. Stetskiy, I.V., Babichev, I.K. and Frolov, O.O. (2016), «Vidrobka zapasiv korysnykh kopalyn v nerobochykh bortakh karieriv kompleksamy Highwall», *Rozvytok promyslovosti ta suspilstva: materialy mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii*, Kryvyi Rih, pp. 55–56.

7. Seib, W.T., (1993). «Australian Coal Mining Practice», *The Australian Institute of Mining Metallurgy*, pp. 238–242.
8. Mark, C., Chase, F.E., and Campoli, A.A., (1995), «Analysis of retreat mining pillar stability», *Proceedings of 14th Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, WV, U.S.A., pp. 49–59.
9. Babychev, I.K. & Frolov, O.O. (2017), «Analiz isnuichykh metodiv rozrakhunku tekhnolohichnykh parametriv rozrobky prybortovykh zapasiv korysnykh kopalyn z zastosuvanniam HIGHWALL MINING SYSTEM», *Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna. Naukovi pratsi NTUU «KPI imeni Ihoria Sikorskoho»*, Kyiv, pp. 390–394.
10. Oksenchuk, R.M. (2004), Analiz perspektyv vuhlenosnosti Oleksandriiskoho burovuhilnoho raionu, 1990-1993 rr., Kyiv: Neofond Ukrainy, pp. 18–35.
11. Brinkgreve, R.B.J., Broere, W. & Waterman, D., «Plaxis 2D - Version 8», *PLAXIS bv*, Netherlands.
12. Frolov, O.O. & Babychev, I.K. (2016), «Vstanovlennia deformatsii bortiv rozrizu pislia vidrobky prybortovykh zapasiv vuhillia», *Visnyk NTUU "KPI". Seriia "Hirnyctvo"*, No. 31. – pp. 48–56.
13. Babychev, I.K. & Frolov, O.O. (2016), «Modeliuvannia protsesu deformatsii bortiv rozrizu pry vidrobtsi prybortovykh zapasiv vuhillia», *Khimichna tekhnolohiia: nauka, ekonomika ta vyrobnytstvo: materialy III Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, m. Shostka, 23–25 lystopada 2016 roku*, Sumy: Sumskiy derzhavnyi universytet, pp. 174–177.

**Остапчук** Артем Олександрович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0009-0001-5766-3863>.

Наукові інтереси:

– розробка родовищ корисних копалин.

**Литвинчук** Ілля Дмитрович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0003-3702-173X>.

Наукові інтереси:

– розробка родовищ корисних копалин;

– маркшейдерська справа.

**Фролов** Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри геотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-8053-2653>.

Наукові інтереси:

– буропідривні роботи на кар'єрах;

– розробка родовищ корисних копалин.

**Ostapchuk A.O., Lytvynchuk I.D., Frolov O.O.**

#### **The study of the influence of excavation parameters on the stability of rock masses when developing stocks in sidewalls at quarries**

The results of scientific research on the possibility of excavation of reserves in the sides of open pits, which develop deposits in the form of layers and lenses are presented.

According to the analysis of scientific publications, it is established that the excavation of reserves in the sides of open pits is the most effective when using the technology of development from the open pit. It is recommended to use Highwall complexes or similar ones as excavation equipment, which are based on the principle of destruction and subsequent excavation of rocks by drilling or cutting actuators.

For the conditions of Semenivske brown coal deposit the maximum width of the rock pillar between the workings was determined, at which the stability of the passed mine workings should be ensured. The modeling of the side of the career at excavation of mineral reserves by the Highwall complex with a screw actuator and a continuous actuator, at application of which the rectangular shape of the excavation cross-section is formed. To establish the stability of the rock massif, the values of surface settlements have been calculated. Modeling was performed in the software package PLAXIS 3D Tunnel by the finite element method using the Mohr-Coulomb criterion.

It has been proved that the stability of the excavations and the stability of the rock massif is fully ensured during the passage of the excavations by means of the auger actuator. The vertical settlement of the earth surface does not exceed the critical limit ( $15 \cdot 10^{-3}$  m) at the investigated intervals of distances between the workings. At excavation of reserves in the sides of the career by the complex Highwall with a continuous actuator there is a collapse of formed mine workings at the initial stages of development, i.e. stability of mine workings of rectangular shape is not provided.

**Keywords:** open pit wall; reserves; mineral; mining complex; rock mass; vertical settlement; mine tunnel.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023.