

О.О. Фролов, д.т.н., проф.

І.К. Бабичев, аспір.

І.В. Стецьків, магістрант

Національний технічний університет України "КПІ"

О.М. Клеван, асист.

Житомирський державний технологічний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ БОРТІВ КАР'ЕРУ ПІД ЧАС ВИЙМАННЯ ПРИБОРТОВИХ ЗАПАСІВ ВУГІЛЛЯ

Встановлено, що на вугільних родовищах, що розробляються відкритим способом, в бортах кар'єрів залишаються 20–45 % запасів корисних копалин, з яких лише 18 % гірничих підприємств здійснюють видобуток прибортових запасів. Інші переводять ці запаси в забалансові та списують. Для відробки запасів в бортах кар'єру найбільш доцільним є застосування безлюдної технології виймання пластів з відкритих виробок, в основу якої закладено принципи руйнування корисних копалин агрегатами з буровим або різальним виконавчим органом (системами Highwall). Доведено, що шнекові гірничо-видобувні системи забезпечують більшу стабільність гірничих виробок та стійкість відробленого борта кар'єру, ніж системи виймання з безперервним робочим органом. Для дослідження поведінки борта кар'єру під час та після відробки прибортових запасів корисних копалин шнековою системою Highwall застосовуємо чисельне моделювання за методом кінцевих елементів з використанням критерію міцності Мора–Кулона. В результаті моделювання в програмному продукті PLAXIS 3D Tunnel виймання вугілля в борту кар'єру (розрізу) встановлено, що при розміщенні гірничих виробок круглої форми діаметром 1,0 в один ряд на відстані від 4,0 до 0,5 м одна від одної руйнування шнекових отворів не відбувається. При відстані між виробками 0,5 м вертикальне осідання поверхні лише в 1,33 раза більше, ніж при відстані 4,0 м, тобто деформації поверхні є незначними. Зміна осідань на поверхні борта кар'єру при відстані між виробками 0,5 м також не досягає критичної величини, за якої може виникнути підробка промислових споруд на поверхні. Встановлено, що при відстані між гірничими виробками 0,5 м в, порівняно з відстанню 4,0 м, кількість вийнятої корисної копалини збільшується в 3 рази.

**Ключові слова:** борт кар'єру; прибортові запаси; гірський масив; вертикальне осідання; деформація; гірничі виробки.

**Вступ. Постановка проблеми.** Відкритий спосіб розробки родовищ корисних копалин, порівняно з підземним, характеризується більшими можливостями в забезпеченні високої продуктивності праці та низької собівартості продукції. Внаслідок застосування потужного технологічного обладнання забезпечується більш повне вилучення корисної копалини з надр, а також кращі санітарно-гігієнічні умови праці робітників. Це, безперечно, сприяє розширенню масштабів ведення гірничих робіт відкритим способом. Однак головним недоліком відкритого способу розробки є необхідність виймання, переміщення та складування у відвали значних об'ємів розкривних порід. Збільшення масштабів проведення відкритих гірничих робіт загострює життєво важливі проблеми, пов'язані з вилученням з господарського обороту родючих земель, порушенням рельєфу місцевості, забруднення води та ін. Крім того, відкритий спосіб розробки обмежується граничною глибиною, після якої видобуток корисної копалини є неефективним, оскільки збільшується поточний коефіцієнт розкриття та збільшується собівартість видобутку вище граничного значення.

Вказані вище недоліки обмежують сферу застосування відкритого способу розробки вугільних родовищ корисної копалини, хоча наявність на підприємстві транспортної та технологічної інфраструктури сприяє продовженню подальшого видобутку корисних копалин. При цьому в надрах залишається значна їх кількість.

Аналіз вугільних родовищ, які розробляються відкритим способом, засвідчує, що в бортах кар'єрів залишаються 20–45 % запасів корисних копалин. Запаси в бортах кар'єрів розміщені безпосередньо біля укосу або на відстані не більше 150 м до нього. Глибина залягання

прибортових запасів, в основному, складає від 100 до 500 м [1]. Однак досвід розробки вищевказаних родовищ відкритим способом, показує, що лише 18 % гірничих підприємств здійснюють видобуток прибортових запасів. Інші переводять ці запаси в забалансові та списують [2]. Таким чином, розробка прибортових запасів дозволила б збільшити ступінь виймання корисних копалин та підвищити ефективність освоєння родовища.

**Постановка задачі досліджень.** Особливість розробки прибортових запасів пов'язана зі зміною геомеханічних властивостей гірського масиву (бортів кар'єру). Проведення гірничих виробок в прибортовій зоні кар'єру змінює напружено-деформований стан масиву, що негативно впливає на стійкість бортів та сприяє утворенню поверхні ковзання і, як наслідок, викликає обрушення борта. У зв'язку з цим відпрацювання запасів в бортах кар'єрів необхідно здійснювати лише після постановки бортів в гранично стійкий стан [3]. Тому метою дослідження є прогнозування поведінки бортів кар'єру під час та після відробки прибортових запасів пластових родовищ корисних копалин.

**Викладення матеріалу досліджень.** Основним методом відпрацювання залишених корисних копалин в неробочих бортах кар'єрів в минулому було залишення ціликів і проведення гірничих робіт вибуховим способом [4]. В цьому способі довидобутку є багато недоліків, зокрема: низька ефективність виконання робіт, незначний коефіцієнт вилучення, низька безпека, важке управління, вплив на борти та ін. Зважаючи на наведене, для відробки запасів в бортах кар'єру найбільш доцільним є застосування безлюдної технології виймання пластів з відкритих виробок, в основі якої закладено принципи руйнування корисних копалин агрегатами з буровим або різальним виконавчим органом (комплекси Highwall).

На рисунку 1 наведена класифікація гірничих Highwall систем [4]. Система Miner називається безперервною (рис. 2), видобуток системою Highwall (МП) класифікується на два типи: перший являє собою систему Add-car, а другий – систему ArchVeyor (скребковий конвеєр). Система Add-car складається з комбайна безперервної дії, нарощувальної машини (конвеєрні автомобілі), укладальника конвеєру і навантажувачів. Система ArchVeyor складається з комбайна безперервної дії, ланцюгового конвеєра, що транспортує вугілля, і спорядженого автомобілю.

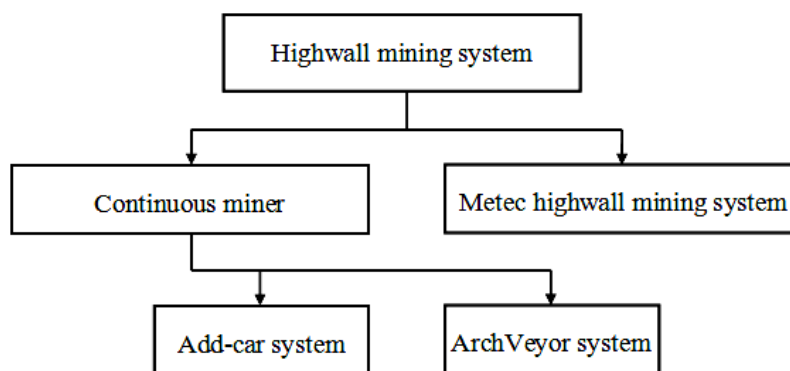


Рис. 1. Класифікація гірських Highwall систем

Видобуток системами Highwall вперше застосовано в США та Австралії і зараз використовується через його безпечність та економічність. В Індонезії, була використана лише шнекова система в декількох місцях (Мацуї та ін.).

Система Highwall (МП) може виймати отвори прямокутної форми довжиною до 350 м і більше, а розмір отвору залежить від характеристик комплексу. Міцність гірських порід, які здатен розробляти комплекс, становить  $f = 3,8 \dots 7$ . При видобутку здійснюється повний автоматизований контроль системи та гірського масиву (тому числі покрівлі і підшви) за допомогою передових технологій навігації: пасивного гамма детектора, інклінометрів, лазерного гіроскопа (RLG) і програмованого логічного контролера (PLC).

Залежно від розміру різального модулю, комплекс Highwall (МП) дозволяє відробляти вугільні пласти потужністю від 1,1 до 4,8 м з максимальним кутом падіння і повороту пласта

до  $25^\circ$  та пласти потужністю від 4,5 м з кутами падіння  $50\text{--}90^\circ$ . Об'єм втрат корисної копалини складає від 20 до 25 % [3].



Рис. 2. Безперервний робочий орган

Система Highwall зі шнековим виконавчим органом (Metec highwall mining system), порівняно з попередніми конструкціями, більш проста і може утворювати отвори довжиною понад 100 м і 0,5 м в діаметрі або більше у вугільних пластах в робочих бортах, залежно від способів застосування (рис. 3). Ця система більш маневрена, ніж система МП. Однак міцність розроблюваних порід, які здатен виймати комплекс, не перевищує  $f = 3$ .

Шнекова система Highwall в цілому покращила видобуток корисних копалин у зв'язку з її безпечністю та продуктивністю. Тим не менш, її застосування обмежене умовами залягання, параметрами та властивостями пластів: кут падіння, потужність, кривизна, тріщинуватість, наявність розломів і вигинів та ін. Важко або майже неможливо застосовувати цю систему на крутопохилих вугільних пластах з кутом падіння більше  $15^\circ$ . Тому був розроблений ще один тип системи, що здатен відробляти пласти в діапазоні падіння  $16\text{--}25^\circ$  [5].



Рис. 3. Шнекова гірнична система

Досвід застосування систем Highwall на кар'єрах світу, лабораторні дослідження та чисельне моделювання закордонних вчених показують, що шнекові гірничовидобувні системи забезпечують більшу стабільність гірничих виробок та стійкість відробленого борта [4–7].

Для дослідження поведінки борта кар'єру під час та після відробки прибортових запасів корисних копалин шнековою системою Highwall застосуємо чисельне моделювання за методом кінцевих елементів з використанням критерію міцності Мора–Кулона [8]. Для цього гірський масив борта кар'єру розбиваємо на елементарні об'єми, в кожному з яких визначаємо стійкість на руйнування. Як програмний продукт використовуємо PLAXIS 3D Tunnel. Це пакет програм для розрахунку методом кінцевих елементів деформацій та стійкості при проектуванні гірничих виробок. Процес розрахунку заснований на стійкому чисельному методі.

Для дослідження обираємо тривимірну модель з наступними розмірами: висота – 16,5 м; ширина – 25 м, глибина – 10 м (рис. 4). Товщина вугільного пласта становить 3,0 м. Пласт залягає в товщі алевролітів потужністю по 2,0 м над покрівлею і під подошвою. Зверху та знизу їх знаходяться піщаники: потужність верхнього шару піщаника становить 7,0 м, нижнього шару – 2,5 м. Фізико-механічні властивості гірських порід, що використовуються в дослідженні, наведено в таблиці 1.

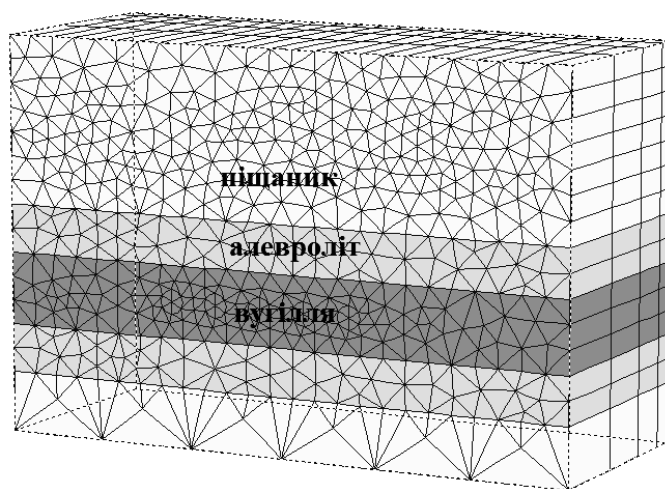


Рис. 4. Тривимірна модель досліджуваного гірського масиву

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>
Алевроліт	24,892	$4,6 \cdot 10^7$	0,25	30	$230 \cdot 10^2$
Піщаник	26,068	$5 \cdot 10^7$	0,12	35	$20 \cdot 10^2$
Вугілля	13,404	$1,9 \cdot 10^7$	0,15	37	$90 \cdot 10^2$

Моделюємо виймання пласта вугілля системою Highwall зі шнековим виконавчим органом (Metec highwall mining system) діаметром 1,0 м на глибину 10 м. Шнекові отвори (гірничі виробки) в кількості 5 шт. розміщуємо в один ряд. Відстань між виробками в неробочому борту кар'єру змінюємо від 4,0 до 0,5 м з кроком 0,5 м.

Результати розрахунку зміни осідань поверхні борта кар'єру наведено в таблиці 2.

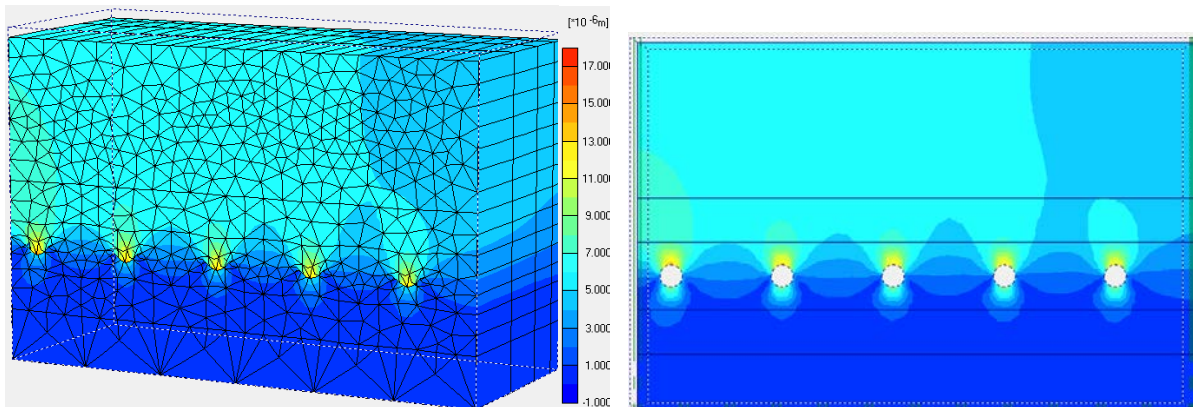
Таблиця 2

Зміна осідань,  $10^{-6}$  м, поверхні борта при різній відстані між виробками

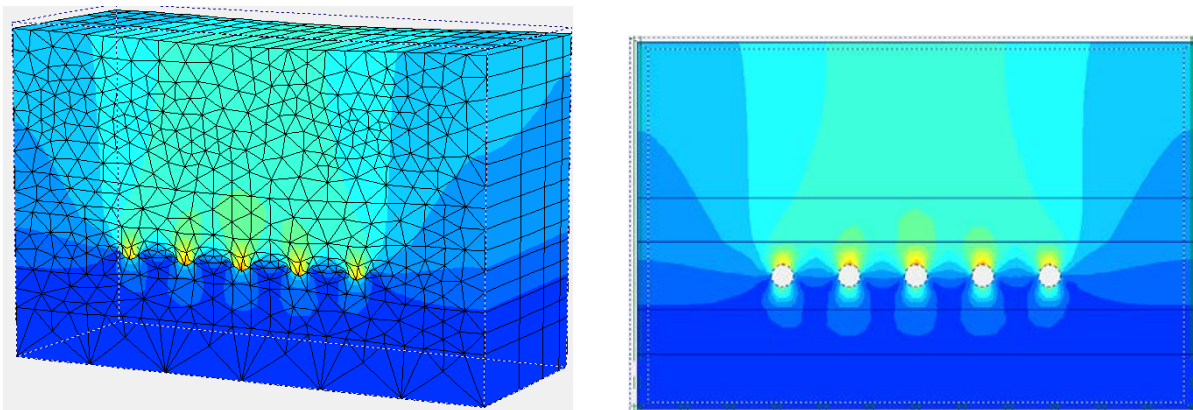
Відстань між виробками в борту кар'єру, м	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5
Осідання поверхні борта, $10^{-6}$ м,	12,86	12,97	13,21	13,47	13,66	14,25	14,93	17,08



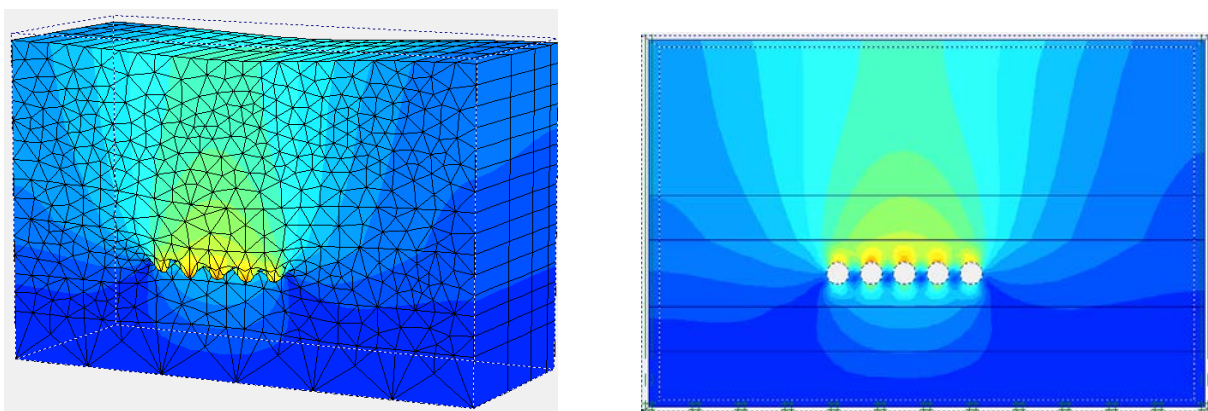
На рисунках 5–7 показано деформований стан модельного блока після виймання вугілля при різних відстанях між гірничими виробками для випадку їхнього розміщення в один ряд.



а) б)  
Рис. 5. Деформований стан борта кар'єру після шнекового виймання прибортових запасів виробками на відстані 4,0 м одна від одної:  
а – вигляд спереду; б – розріз на відстані 5,0 м від устя виробок



а) б)  
Рис. 6. Деформований стан борта кар'єру після шнекового виймання прибортових запасів виробками на відстані 2,0 м одна від одної:  
а – вигляд спереду; б – розріз на відстані 5,0 м від устя виробок



а) б)  
Рис. 7. Деформований стан борта кар'єра після шнекового виймання прибортових запасів виробками на відстані 0,5 м одна від одної:  
а – вигляд спереду; б – розріз на відстані 5,0 м від устя виробок

На рисунку 8 показана графічна залежність зміни осідань поверхні борта кар'єру залежно від відстані між виробками. Вона описується з достатньою точністю поліномом 2-го порядку:

$$\eta = 0,46d^2 - 3,1d + 18,08, \quad (1)$$

де  $\eta$  – вертикальне осідання поверхні борта;  $d$  – відстань між гірничими виробками, пройденими в борту кар'єру.

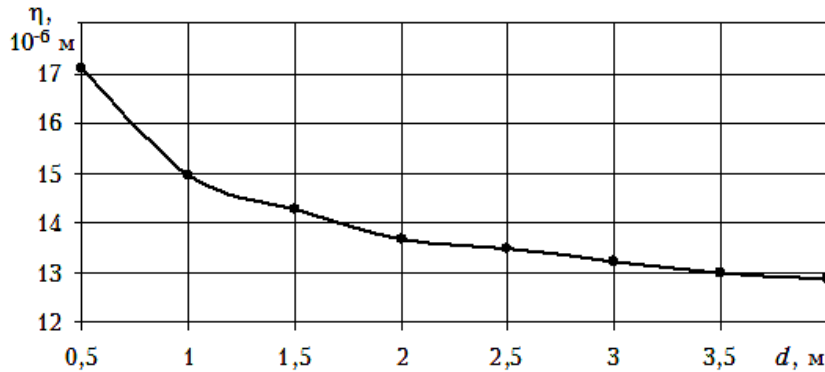


Рис. 8. Зміни осідань поверхні борта кар'єру залежно від відстані між виробками при розміщенні в один ряд

Згідно з отриманими даними (табл. 2, рис. 5–8), незалежно від відстані між виробками, руйнування шнекових отворів в бортах кар'єру не спостерігається, тобто забезпечується стійкість самих виробок. При відстані між виробками 0,5 м вертикальне осідання поверхні ( $17,08 \cdot 10^{-6}$  м) лише в 1,33 раза більше, ніж при відстані 4,0 м ( $12,86 \cdot 10^{-6}$  м), тобто деформації поверхні є незначними. Зміна осідань на поверхні борта кар'єру при відстані між виробками 0,5 м також не досягає критичної величини в  $15 \cdot 10^{-3}$  м, за якої може виникнути підробка промислових споруд на поверхні. Таким чином, можна стверджувати, що при відстані між гірничими виробками 0,5 м, пройденими шнековими гірничими системами, забезпечується стійкість борта кар'єру і, порівняно з відстанню між виробками 4,0 м, кількість вийнятої корисної копалини збільшується в 3 рази.

#### Висновки:

1. Аналіз родовищ, які відробляють відкритим способом, засвідчує, що в бортах кар'єрів залишаються 20–45 % запасів корисних копалин. Досвід розробки родовищ, що відробляють відкритим способом, показує, що лише 18 % гірничих підприємств здійснюють видобуток прибортових запасів. Інші переводять ці запаси в забалансові та списують.

2. Встановлено, що для відробки запасів в бортах кар'єру найбільш доцільним є застосування безлюдної технології виймання пластів з відкритих виробок, в основі якої закладено принципи руйнування корисних копалин агрегатами з буровим або різальним виконавчим органом (системами Highwall). Аналіз застосування систем Highwall на кар'єрах світу показують, що шнекові гірничовидобувні системи (Metec highwall mining system) забезпечують більшу стабільність гірничих виробок та стійкість відробленого борта кар'єра, ніж системи виймання з безперервним робочим органом.

3. Для дослідження поведінки борта кар'єру під час та після відробки прибортових запасів корисних копалин шнековою системою Highwall застосовуємо чисельне моделювання за методом кінцевих елементів з використанням критерію міцності Мора–Кулона. Як програмний продукт використовуємо PLAXIS 3D Tunnel, який дозволяє отримати переміщення і напруження в межах досліджуваної області та встановити умови відробки прибортових запасів, за яких забезпечується стійкість бортів.

4. У результаті моделювання виймання вугілля в борту кар'єру (розрізу) встановлено, що при розміщенні гірничих виробок круглої форми діаметром 1,0 в один ряд на відстані від 4,0 до 0,5 м одна від одної руйнування шнекових отворів не відбувається. При відстані між виробками 0,5 м вертикальне осідання поверхні ( $17,08 \cdot 10^{-6}$  м) лише в 1,33 раза більше, ніж при відстані 4,0 м ( $12,86 \cdot 10^{-6}$  м), тобто деформації поверхні є незначними. Зміна осідань на поверхні борта

кар'єру при відстані між виробками 0,5 м також не досягає критичної величини в  $15 \cdot 10^{-3}$  м, при якій може виникнути підробка промислових споруд на поверхні. Таким чином, можна стверджувати, що при відстані між гірничими виробками 0,5 м, пройденими шнековими гірничими системами, забезпечується стійкість борта кар'єру і, порівняно з відстанню між виробками 4,0 м, кількість вийнятої корисної копалини збільшується в 3 рази.

5. Отримані результати засвідчують, що необхідно продовжити дослідження з розробки ефективних схем відробки прибортових запасів корисних копалин для отримання закономірностей вертикальних осідань поверхні бортів кар'єрів залежно від відстані між виробками та встановлення оптимальних значень цих відстаней.

#### Список використаної літератури:

1. *Гавришев С.Е.* Методика обоснования параметров бортов карьеров при выемке прибортовых запасов подземным способом / *С.Е. Гавришев, Т.С. Кузнецова, Т.В. Некерова* // Разработка полезных ископаемых / Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2010. – № 1. – С. 14–17.
2. *Каплунов Д.Р.* Комбинированная геотехнология / *Д.Р. Каплунов, В.Н. Калмыков, М.В. Рильникова*. – М. : Изд. дом «Руда и металлы», 2003. – 560 с.
3. *Нецветаев А.Г.* Расчетные параметры технологии безлюдной добычи угля с применением КГРП / *А.Г. Нецветаев А.А. Григорян*. – Кемерово, 2015. – 66 с.
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* // *Procedia Earth and Planetary Science* / *Procedia Earth and Planetary Science*. – Vol. 6. – Pp. 1-492 (2013) / *International Conference on Earth Science and Technology Proceedings* (Sept. 2012). – Pp. 311-318.
5. Geotechnical Issues on Application of Highwall Mining System inIndonesia / *T.Sasaoka, H.Shimada, A.Hamanaka, B.Sulistianto, M.Ichinose and K.Matsuia* // *Vietrock2015 an ISRM specialized conference Vietrock2015* (12–13 March 2015). – Hanoi, Vietnam.
6. *Seib W.T.* Australian Coal Mining Practice / *A.J. Hargraves& C.H. Martin (eds.)*. // *The Australian Institute of Mining Metallurgy*. – 1993. – Pp. 238–242.
7. *Mark C.* Analysis of retreat mining pillar stability / *C.Mark, F.E. Chase and A.A. Campoli* // *Proceedings of 14-th Conference on Ground Control in Mining*. – 1995. – Morgantown, WV, U.S.A. – Pp. 49–59.
8. *Plaxis Version 8 Scientific Manual*. Edited by R.B.J. Brinkgreve Delft University of Technology & PLAXIS b.v.
9. *Загоруйко Є.А.* Застосування сучасних програмних комплексів чисельного моделювання для дослідження напружено-деформованого стану масиву ґрунту / *Є.А. Загоруйко, Д.Л. Капінус, Т.Є. Усманова* // 36. матеріалів III Міжнар. науково-техн. конф. «Енергетика. Екологія. Людина» (конференція молодих вчених-аспірантів та магістрантів) / Секція «Перспективи розвитку гірничої справи та підземного будівництва» : сб. науч. трудов. – Вип. 3. – К., 2012. – С. 158–160.

**ФРОЛОВ Олександр Олександрович** – доктор технічних наук, професор кафедри геобудівництва та гірничих технологій Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

- вибухові роботи;
- гірництво.

Тел. (044) 406-80-08.

**БАБИЧЕВ Ігор Костянтинович** – аспірант інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи.

СТЕЦЬКІВ Ірина Василівна – магістрант кафедри геобудівництва та гірничих технологій Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи.

КЛЕВАН Олег Миколайович – аспірант кафедри маркшейдерії Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- відкрита розробка родовищ корисних копалин;
- буро-вибухові роботи.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2015.