

**СТІЙКІСТЬ СКЛЕПІНЧАТОЇ ВИРОБКИ, ЯКУ ПЕРЕТИНАЄ ВУГІЛЬНИЙ ПЛАСТ ПАРАЛЕЛЬНО ДЕННІЙ ПОВЕРХНІ****П. З. Луговий**

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

**ORCID: 0000-0001-8065-9187****Т. В. Гребенюк**

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

**ORCID: 0000-0002-9287-2919**

Використання запасів нафти і газу проходить найбільшими темпами, тому питома вага вугілля в енергозабезпеченні людства буде постійно зростати. В той же час збільшується глибина його видобутку, зростають ризики виникнення аварій за рахунок гравітаційних сил, вибухів, гірських ударів, землетрусів. Все більш ускладнені умови, які супроводжують розкривання і розробку корисних копалин, освоєння нових родовищ зі складними геологічними умовами пред'являють підвищені вимоги до наукових рекомендацій, методів, засобів і технологій виконання гірничих робіт. В даній статті на основі розроблених теоретичних методик розв'язано актуальну науково-технічну задачу про стійкість горизонтальних гірничих виробок при гравітаційних навантаженнях. У результаті проведених досліджень отримані нові дані про вплив геометрії і фізико-механічних властивостей корисної копалини і вміщуючих порід на статичну стійкість гірничих виробок склепінчатого перетину при гравітаційному навантаженні. Чисельне моделювання даної задачі виконано з застосуванням методу скінчених елементів.

**Ключові слова:** гірничі виробки, вугільний пласт, гравітація, скінчено-елементний метод, чисельні результати.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** При видобутку корисних копалин на достатній глибині шахтного поля необхідно дослідити напружено-деформований стан (НДС) навколо гірничої виробки щоб звести до мінімуму можливість виникнення аварії. Так в роботі [1] досліджено вплив параметрів зміцненого шару на переміщення приконтурного масиву при наповненні закріпного простору виробок для складних умов для складних умов експлуатації шахтного поля. Розроблена чисельна модель породного масиву, який вміщує одиночну протяжну виробку для конкретних шахтних умов. Показано [2], що в якості основного показника ефективності кріплення і безпечної експлуатації виробок доцільно використовувати тріщинуватість масиву. Результати досліджень [3] можна використати для реалізації потрібної зміни модулю пружності гірської породи навколо виробки. В роботі [4] показано, що збільшення швидкості просування забою сприяє зменшенню нерівномірності розподілу деформацій поверхні виробки, а міцність породи зазвичай зростає зі збільшенням навантаження. Значна кількість робіт [5–9] присвячена дослідженню питання розподілу напружень в системі «масив – виробка – кріплення» на властивості і стан масиву гірських порід з виробками. Обґрунтовано спосіб вирішення граничної задачі про НДС породного масиву навколо виробок з вільним і закріпленим контуром. Розроблені розрахункові схеми для вирішення задач такого класу. Основним питанням при вивченні життєздатності гірничих виробок є визначення їх стійкості в експлуатаційних умовах, про що свідчать статті [10–12].

Одним з важливих питань способу влаштування гірничих виробок є вивчення НДС масиву гірських порід, ослаблених виробками різного поперечного перетину [13].

В даній роботі проведено дослідження НДС навколо склепінчатої виробки, через яку проходить вугільний пласт і виходячи з його аналізу визначити

стійкість даної виробки в залежності від глибини її розташування. Якщо горизонтальна виробка склепінчатого поперечного перетину має велику протяжність, то можна покласти, що граничні умови на кінцях виробки не справляють впливу на поля напружень і деформацій в околиці центрального поперечного перетину виробки. Досліджувати ці поля будемо з допомогою постановки задачі плоскої деформації теорії пружності, а її розв'язок отримаємо з допомогою методу скінчених елементів [14]. Відзначимо, що метод скінчених елементів добре зарекомендував себе при вивченні НДС шаруватих масивів з різними фізико-механічними властивостями.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** В гірничій справі МСЕ застосовується для вирішення задач статичної і динамічної порідних масивів. При цьому розглядаються просторові (трьохвимірні) і плоскі (двохвимірні) задачі теорії пружності, причому за звичай перевага віддається, якщо це можливо, плоским задачам, які дозволяють досліджувати більш багатопараметричні системи. В даній роботі розглядаються горизонтальні гірничі виробки значної протяжності, тому можна вважати, що їх кінцеві частини не впливають на середню частину виробки і для неї реалізуються умови плоскої деформації. В такому випадку для кожного перпендикулярного до осі виробки перетину будемо мати однаковий розподіл напружень навколо контуру виробки. Тому розрахункову область для визначення розподілу напружень навколо виробки виберемо у вигляді квадратної пластини одиничної товщини, яка перпендикулярна осі виробки, а контур виробки знаходиться у її центрі. Розмір сторони квадрату повинен бути не меншим п'яти максимальних розмірів поперечного перетину виробки. Краї пластини навантажені гравітаційним тиском, величина якого залежить від глибини розташування виробки і щільності порід шахтного поля. Контур виробки вважається вільним від навантажень і в'язей (нормальні і доти-

чні напруження дорівнюють нулю на контурі виробки). Таким чином, для визначення розподілу напружень навколо гірничої виробки маємо задачу про плоский напружений стан. Для розв'язку плоских задач теорії пружності накопичений достатній досвід і розроблені різні методи.

Розглянемо стійкість горизонтальних протяжних виробок склепінчатого поперечного перетину, які часто використовуються в гірничій справі. Вважається, що цю виробку перетинає вугільний пласт паралельно денній поверхні. Якщо циліндрична виробка має склепінчастий поперечний перетин, то її геометричні характеристики і поля напружень і деформацій мають одну вісь симетрії, а її контур можна описати рівнянням еліпса  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$  і прямої  $y = -c$ . В точках перетину прямої і еліпса є заокруглення, які описуються рівняннями:

$$(x_1 \pm d)^2 + [x_2 \pm (c-R)]^2 = R^2,$$

де  $c$  – відстань від початку координат до підосви виробки,  $d$  – відстань від вісі ординат до центів кіл заокруглення (в даному випадку  $d = 3,4$  м),  $R$  – їх радіуси (тут і в інших випадках  $R = 0,3$  м). Півосі еліпса  $a = 2,5$  м (паралельна денній поверхні),  $b = 3,7$  м (перпендикулярна денній поверхні), для прямої  $c = 1,0$  м.

Розглянемо випадок, коли така непідкріплена склепінчаста гірничка виробка розташована на глибині 500 м. Вугільний пласт, товщина якого складає 1,8 м, перетинає виробку паралельно денній поверхні таким чином, що нижня його площина проходить по лінії  $y = 0,2$  м, а верхня по лінії  $y = 2,0$  м. В цьому випадку на вугільному пласті лежить пісковик, а пласт лежить на сланці з наступними фізико-механічними параметрами: пісковик –  $E = 1,09 \cdot 10^{10}$  Па,  $\nu = 0,3$ ,  $\rho = 2540$  кг/м<sup>3</sup>, сланець –  $E = 7,6 \cdot 10^9$  Па,  $\nu = 0,2$ ,  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>.

Для дослідження стійкості такої склепінчастої виробки з вугільним пластом скористаємося розв'язком задачі плоскої деформації теорії пружності. Для розв'язку плоских задач теорії пружності накопичений достатній досвід і розроблені різні методи.

У випадку задачі про статичний плоский напружений стан використаємо співвідношення теорії пружності для породного масиву в околиці виробки, які мають вигляд:

- рівняння рівноваги:

$$[\partial]^T \{\sigma\} + \{R\} = 0, \quad (1)$$

де  $\{R\} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{Bmatrix}$  – вектор об'ємних сил;

$[\partial] = \begin{Bmatrix} \partial/\partial x_1 & 0 \\ 0 & \partial/\partial x_2 \\ \partial/\partial x_2 & \partial/\partial x_1 \end{Bmatrix}$  – матриця диференціювання;

$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}$  – вектор напружень ( $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ );

- геометричні рівняння:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \quad \gamma_{12} = \gamma_{21} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}; \quad (2)$$

- фізичні рівняння:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{1}{E} \sigma_{11} - \frac{\nu}{E} \sigma_{22}, \\ \gamma_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G}, \\ \varepsilon_{22} = \frac{1}{E} \sigma_{22} - \frac{\nu}{E} \sigma_{11}, \end{cases} \quad (3)$$

де  $E$  – модуль пружності,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Робота внутрішніх сил на можливих переміщеннях для масиву одиничної товщини підраховується наступним чином:

$$\delta U = \int_s (\sigma_{11} \delta \varepsilon_{11} + \sigma_{22} \delta \varepsilon_{22} + \sigma_{12} \delta \gamma_{12}) ds = \int_s \delta \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} ds. \quad (4)$$

Робота зовнішніх сил на можливих переміщеннях

$$\delta A = \int_s \delta \{u\}^T \{R\} dx + \sum Q_i u_i, \quad \{R\} = \begin{Bmatrix} R_1(x_2) \\ R_2(x_1) \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

Вважається, що сили  $R_1$  та  $R_2$  не залежать від координати  $x_3$ .

В практиці скінченно-елементного моделювання застосовуються скінченні елементи (СЕ) різної форми. В плоских задачах теорії пружності, як правило, застосовуються елементи чотирикутного або трикутного виду. Вибір цих форм визначається формою виділеної для розрахунку області. В нашому випадку будуть розглядатися плоскі шари породи з виробками різного поперечного перетину. Для скінченно-елементної апроксимації таких областей найбільш зручними виявляються трикутні елементи. Тому нижче викладені методики скінченно-елементного моделювання на прикладі СЕ трикутної форми.

Для трикутного СЕ число постійних коефіцієнтів апроксимуючих поліномів кожної з незалежних функцій переміщень природно дорівнює трьом.

Наприклад, для  $u_1(x_1, x_2)$  маємо

$$u_1(x_1, x_2) = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 x_2. \quad (6)$$

Значення коефіцієнтів цього поліному виразимо через переміщення вузлів СЕ  $V_1, V_3, V_5$ , що відповідають переміщенню вздовж осі  $x_1$ .

Таким чином,

$$[c]\{\alpha\} = \{v\}. \quad (7)$$

Розв'язком системи лінійних рівнянь є значення коефіцієнтів поліному (6):

$$\{\alpha\} = [c]^{-1}\{V\}, \quad \text{або} \quad \alpha_1 = V_5, \quad \alpha_2 = (V_3 - V_5)/\ell, \quad \alpha_3 = (V_5 - V_1)/h.$$

Після підстановки цих значень у поліном отримаємо:

$$u_1(x_1, x_2) = -\frac{x_2}{h} V_1 + \frac{x_1}{\ell} V_3 + (1 + \frac{x_2}{h} - \frac{x_1}{\ell}) V_5.$$

Випишемо функції форми СЕ

$$N_1(x_1, x_2) = -\frac{x_2}{h}, \quad N_3(x_1, x_2) = \frac{x_1}{\ell},$$

$$N_5(x_1, x_2) = 1 + \frac{x_2}{h} - \frac{x_1}{\ell}. \quad (8)$$

Вони визначають розподіл вузлових переміщень по області СЕ в напрямку осі  $x_1$ .

Визначення переміщення  $u_2$  в напрямку осі  $x_2$  пов'язане з вузловими переміщеннями  $V_2, V_4, V_6$ :  $u_2(x_1, x_2) = N_2(x_1, x_2)V_2 + N_4(x_1, x_2)V_4 + N_6(x_1, x_2)V_6$ . Функції форми  $N_2, N_4, N_6$  визначаються за тією ж схемою, що і  $N_1, N_3, N_5$  і тому можна вважати справедливими рівності  $N_2=N_1, N_4=N_3, N_6=N_5$ .

Матриця жорсткості трикутного СЕ будується на основі формули щодо варіації потенціальної енергії для області СЕ (4). Коефіцієнти матриці жорсткості СЕ визначаються за стандартною схемою:

$$\{u\} = [N]\{V\}, \quad (9)$$

$$\text{де } \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_1V_1 + N_3V_3 + N_5V_5 \\ N_2V_2 + N_4V_4 + N_6V_6 \end{Bmatrix},$$

$$\{\varepsilon\} = [\partial]\{u\} = [\partial][N]\{V\} = [B]\{V\}, \quad [B] = [\partial][N].$$

Тоді остаточно маємо

$$\delta u_e = \int_s \delta\{\varepsilon\}_e^T \{\sigma\}_e dx = \int_s \delta\{V\}_e^T [B]_e^T [E]_e [B]_e \{V\}_e ds = \delta\{V\}_e^T [k]_e \{V\}_e, \quad (10)$$

де  $[k]_e = \int_s [B]_e^T [E]_e [B]_e ds$  – матриця жорсткості трикутного СЕ.

Матриця  $[k]_e$  сформульована в локальній системі координат. При розрахунках її треба перетворити в глобальній системі координат. Для цього введемо вектор переміщень вузлів скінченно-елементного середовища в глобальній системі  $\{V\}^T = \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{2n-1}, \Delta_{2n}\}$ , де  $n$  – загальне число вузлів моделі.

Встановимо залежність  $\{\Delta\}_e = [I]_e \{V\}$ , де  $\{\Delta\}_e$  – вектор переміщень вузлів одного СЕ виділеного шару породи;  $[I]_e$  – матриця відповідності СЕ, яка забезпечує вибірку переміщень з повного набору  $\{V\}$  щодо конкретного СЕ.

Побудова матриці жорсткості і вектора зведених до вузлів сил скінченно-елементної моделі (СЕМ) конструкції виконується в наступній послідовності, починаючи з рівноваги конструкції:

$$\delta U - \delta A = \sum_e (\delta U_e - \delta A_e) = \sum_e (\delta\{\Delta\}_e^T [k]_e \{\Delta\}_e - \delta\{\Delta\}_e^T \{Q\}_e) \quad (11)$$

Вузлові переміщення вузлів СЕ у глобальній системі координат позначені символом  $\Delta$ . Враховуючи наведені вище співвідношення, остаточно отримуємо:

$$\sum_e (\delta\{V\}^T [I]_e^T [k]_e [I]_e \{V\} - \delta\{V\}^T [I]_e^T \{Q\}_e) = \delta\{V\}^T \left( \begin{bmatrix} * \\ k \end{bmatrix} \{V\} - \begin{Bmatrix} * \\ Q \end{Bmatrix} \right) = 0, \quad (12)$$

де  $\begin{bmatrix} * \\ k \end{bmatrix} = \sum_e [I]_e^T [k]_e [I]_e$  – матриця жорсткості СЕМ.

Аналізуючи формулу (2.13), можна зробити висновок, що у загальному випадку компоненти вектора можливих переміщень СЕМ  $\delta\{V\}$  не будуть нульовими, а в такому разі нулю повинен дорівнювати зміст множника в дужках. Таким чином маємо:

$$\begin{bmatrix} * \\ k \end{bmatrix} \{V\} - \begin{Bmatrix} * \\ Q \end{Bmatrix} = 0. \quad (13)$$

Ці співвідношення визначають математичний аспект СЕМ як системи лінійних алгебраїчних рівнянь стосовно дійсних переміщень вузлів СЕМ конструкції в глобальній системі координат від заданого навантаження, яке характеризується вектором зведених до вузлів сил  $\begin{Bmatrix} * \\ Q \end{Bmatrix}$ .

Компоненти вектора напружень визначаються відповідно до закону Гука:

$$\{\sigma\}_e = [E] \{\varepsilon\}_e = [E][B]_e \{\Delta\}_e,$$

де матриця  $[B]$  для плоско – напруженої конструкції є числовою. Вектор вузлових переміщень СЕ  $\{\Delta\}_e$  теж числовий.

Таким чином, компоненти вектора напружень  $\{\sigma\}$  не залежать від координат і в межах скінченного елемента плоско – напруженої конструкції не змінюються.

Розв'язавши систему лінійних алгебраїчних рівнянь (13), визначимо вектор вузлових переміщень СЕМ конструкції:

$$\{V\} = \begin{bmatrix} * \\ k \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} * \\ Q \end{Bmatrix}, \quad (14)$$

і вектор вузлових переміщень окремого СЕ:  $\{\Delta\}_e = [I]_e \{V\}$ .

Що стосується реакцій в зовнішніх в'язях, то вони теж обчислюються за стандартною схемою МСЕ:

$$\{R\}_i = \sum_e [K]_e^i \{\Delta\}_e^i, \quad (15)$$

де  $[K]_e^i$  – матриця жорсткості скінченних елементів, що притичні до  $i$ -го вузла, в якому накладені зовнішні в'язі. У вузлах без в'язей (вузли на контурі виробки) реакції повинні дорівнювати нулю, що відповідає умовам рівноваги незакріпленого вузла.

Використовуючи розроблений алгоритм СЕМ визначимо напружений стан навколо гірничої виробки, яку перетинає вугільний пласт на глибині 500 м.

На рис. 1 показано розподіл напружень  $\sigma_x^c, \sigma_y^c$  відповідно в Паскалях навколо склепінчастої невідкріпленої гірничої виробки, яку перетинає вугільний пласт паралельно денній поверхні.

При розв'язку поставленої задачі теорії пружності практична збіжність в цьому випадку досягалась коли виділена для розрахунку область розбивалась на 15472 скінчених елементів, загальне число невідомих при цьому складало 47314. Максимальні статичні напруження  $\sigma_x^c = 11773347$  Па, які виникають в зоні з'єднання еліптичної поверхні і підшови

склепінчастої виробки і  $\sigma_y^c = -34213083$  Па, які виникають в зоні перетину віссю у контуру склепінчастої виробки і її підшови при гравітаційних навантаженнях виробки на глибині 500 м.

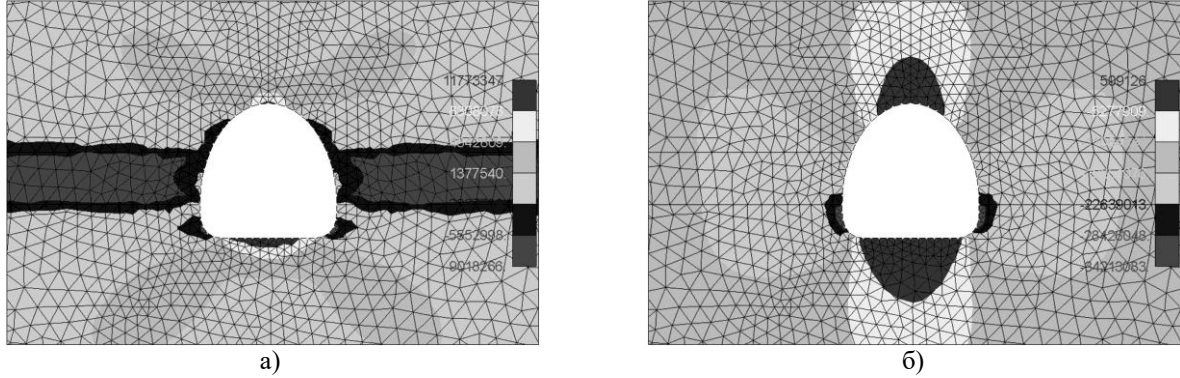


Рисунок 1 – Розподіл напружень  $\sigma_x^c$  (а),  $\sigma_y^c$  (б) відповідно в Паскалях навколо склепінчастої невідкріпленої гірничої виробки, яку перетинає вугільний пласт паралельно денній поверхні

Аналіз результатів розрахунків показує, що наявність пласта досить значно впливає на розподіл напружень навколо виробки: концентрація напружень має місце не лише в околиці трьох закруглених вершин цього перетину, а і в точках контакту вугільного пласта і вмшуючих порід. При цьому вісь у є віссю симетрії, як для виробки, так і для поля напружень. Приймається, що шари вмшуючих порід і вугільний пласт, а також повздовжня вісь гірничої виробки паралельні денній поверхні. Наявність пласта і різниця механічних властивостей вмшуючих порід призводять до підвищення максимальних на-

пружень на контурі виробки, тому податливі елементи конструкції кріплення треба встановлювати в місці з'єднання верхньої площини пласта і вмшуючої породи, а загальну міцність конструкції кріплення треба збільшити.

Переміщення на контурній лінії перетину виробки (рис. 2) мають складний характер, причому найбільше переміщення, рівне  $u_r = 0,0415$  м, має місце у верхняку, а в центральній точці підшови виробки воно рівне  $u_r = 0,04$  м.

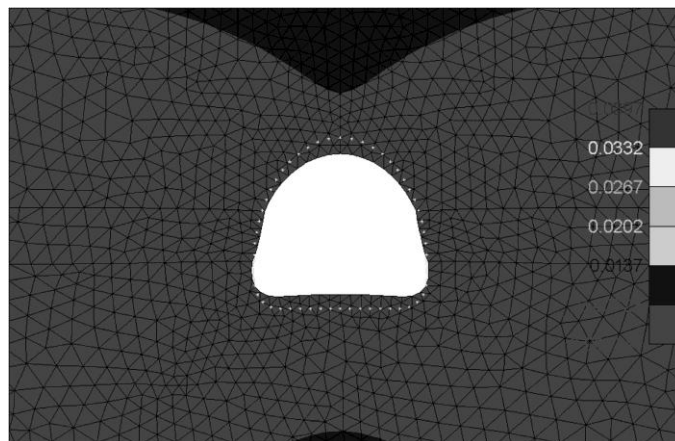


Рисунок 2 – Переміщення на контурній лінії перетину виробки

руйнування гірського масиву може статися в результаті досягнення напружено-деформованим станом біля виробки границі міцності. Багато фахівців називають такий стан втратою стійкості гірничих виробок. Дослідженню саме такої проблеми присвячена представлена робота. Практично всі відомі з літератури праці з дослідження стійкості гірничих виробок присвячені вивченню дії статичних навантажень. Для вибору критерію стійкості гірничої ви-

робки необхідно розглянути питання про міцність гірської породи в кожній точці контуру виробки. Як показують досліди, для однієї і тої ж гірської породи небезпечний стан може мати місце при різних граничних значеннях головних напружень  $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \sigma_z^0$  в залежності від співвідношень між ними. Тому для розв'язку задачі про встановлення критерію міцності (критерію граничного напружено-деформованого

стану) вводять гіпотезу про переважний вплив на міцність матеріалу того чи іншого фактору: покладаючи, що порушення міцності матеріалу при будь-якому напруженому стані настане тільки тоді, коли величина даного фактору досягне деякого граничного значення.

Оскільки розглядаються виробки, які розташовані на великих глибинах, то вугільні пласти і вміщуючі їх породи знаходяться в пружному стані, який близький до пружно-пластичного, то для описання їх стійкості краще всього використовувати енергетичну теорію міцності (теорію Мізеса [15]). В загальному вигляді її критерій міцності записується наступним чином:

$$\sqrt{1/2[(\sigma_x^0 - \sigma_y^0)^2 + (\sigma_y^0 - \sigma_z^0)^2 + (\sigma_z^0 - \sigma_x^0)^2]} \leq [\sigma], \quad (16)$$

де  $[\sigma]$  – границя міцності гірської породи.

Розрахункове рівняння теорії міцності Мізеса можна отримати виходячи з критерію постійності октаедричних догичних напружень. Така трактовка звільняє розглядувану теорію міцності від обмежень, пов'язаних з областю застосування закону Гука, і дає можливість встановити не тільки початок пластичної деформації, а і початок руйнування. Це дає нам можливість дослідити їх стійкість при вико-

ристанні теорії міцності Мізеса – умова (16), яка для плоскої деформації, коли  $\varepsilon_z$  дорівнює нулю, а  $\sigma_z^0 = \nu(\sigma_x^0 + \sigma_y^0)$  згідно закону Гука, умова (16) дає граничну криву і записується у наступному вигляді:

$$\sqrt{(1-\nu+\nu^2)[(\sigma_x^0)^2 + (\sigma_y^0)^2] - [1+2\nu(1-\nu)](\sigma_x^0)(\sigma_y^0)} \leq [\sigma]. \quad (17)$$

Слід зауважити, що коефіцієнт Пуасона  $\nu = 0$  для крихких тіл, а для нестисливих –  $\nu = 0,5$ . При цьому коефіцієнт при сумі квадратів напружень зменшується від 1 до 0,75, а при добутку напружень – збільшується від 1 до 1,5. Це вказує на те, що зі збільшенням глибини, коли коефіцієнт Пуасона зростає [8], стійкість гірничої виробки відносно збільшується. Таке явище свідчить про вдалий вибір умови міцності (16).

Використовуючи дані, наведені на рис. 1, а також формулу (17) побудуємо поле умов міцності по Мізесу (рис. 3) навколо склепінчастої гірничої виробки, через яку проходить вугільний пласт паралельно денній поверхні. Величини напружень наведені в Паскалях.

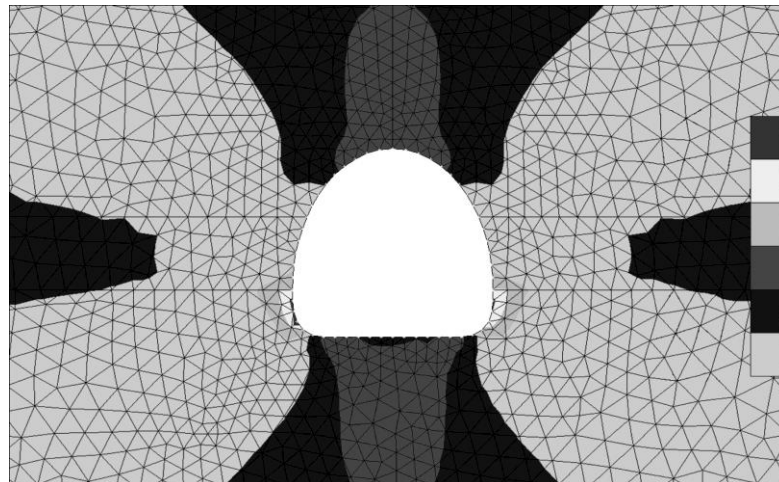


Рисунок 3 – Поле умов міцності по Мізесу навколо склепінчастої гірничої виробки, через яку проходить вугільний пласт паралельно денній поверхні

**ВИСНОВКИ.** Провівши порівняльний аналіз, бачимо, що присутність вугільного пласта досить сильно впливає на розподіл умов міцності по Мізесу  $\sigma_{mis}^c$ . Так у випадку, коли виробка повністю розташована у вугільному пласті [8], максимальне напруження при якому може статися втрата стійкості виробки на її контурі на 25% менше ніж у виробці з вугільним пластом, який проходить через виробку паралельно денній поверхні (рис. 3). Наявність пласта і різниця механічних властивостей вміщуючих порід призводять до значного підвищення максимальних напружень в точках контуру де з'єднуються вугільний пласт і вміщуючі породи. В точках контакту вугільний пласт – сланець умова стійкості (17) набуває найбільшого значення.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Солодянкин А. В., Прокудин А. З., Выгодин М. А., Кравченко К. В., Мясников И. В. Исследование влияния параметров упрочненного слоя закрепленного пространства выработок на смещения контура. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2018. Вип. 2(22). С. 17–26.
2. Скипочка С. И., Паламарчук Т. А., Прохорец Л. В., Яланский А. А., Бобро Н. Т. Закономерности влияния геомеханической системы «массивы выработка-крепь» на информационные параметры акустических полей в массиве горных пород. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2018. Вип. 2(22). С. 27–38.

3. Кулинич В. Д., Воробьев В. В., Чебенко В. Н. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на прочностные характеристики скальных горных пород при различных типах воздействия. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2017. Вип. 2(20). С. 43–49.
4. Скипочка С. И., Паламарчук Т. А., Прохорец Л. В., Бобро Н. Т. Закономерности изменения напряженно-деформированного состояния породного массива при интенсификации горных работ. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 2(18). С. 26–40.
5. Терещук Р. М. Кріплення похилих гірничих виробок анкерними системами. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2017. Вип. 2(20). С. 50–60.
6. Ковалевская И. А. Геомеханика взаимодействия элементов системы «Горный массив – упрочненные породы – крепь подземных выработок». 2003, Днепропетровск: НГА Украины, 236 с.
7. Кравец В. Г., Кириченко М. Т., Фролов О. О., Вапнічна В. В. Основи технології видобування корисних копалин. Навчальний посібник, 2009 Київ: НТУУ. 100 с.
8. Chudek M. Geomechanika z podstawami ochrony srodowiska gorniczego i powierzchni terenu. Gliwice: Wyd.Pol. Sl., 2002, 106 p.
9. Chudek M., Негрей С. Г., Соловьев Г. И. и др. Особенности механизма выдавливания пород почвы выемочных выработок глубоких шахт. *Miedzynarodowa Konferencja «IX Szkola Geomechaniki 2009»*, Materiały Naukowe. Gliwice-Ustron. С. 227–239.
10. Боликов В. Е., Никитин А. М., Васильев М. В. Прогнозная оценка устойчивости горных выработок и определение типа и параметров крепи. *Горный информационно аналитический бюллетень*. 2009. Вып. 4. С. 309–315.
11. Касьян Н. Н., Иващенко В. Д. Геомеханические основы обеспечения устойчивости выработок глубоких шахт. *Miedzynarodowa Konferencja «IX Szkola Geomechaniki 2009»*, Materiały Naukowe. Gliwice-Ustron. С. 81–92.
12. Саммаль А., Фотиева Н. Прогноз напряженного состояния и оценка устойчивости пород вокруг горных выработок в сейсмически активных районах V *Międzynarodowe Sympozjum Geotechnika-Geotechnics 2001*. Materiały Naukowe. Gliwice – Ustroń. 16-19 października r. Pp. 125–132.
13. Кургузов В. Д. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород, ослабленного квадратной выработкой. *Вычислительные технологии*. 2003, Т. 8, № 5. С. 84–93.
14. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with Nastran. М.: ДМК Пресс. 2013. 784 с.
15. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872с.

#### SUSTAINABILITY OF THE ARCHED MINING THAT CROSSES THE COAL BED RATE PARALLEL DAY SURFACE

**P. Lugovoi**

S. P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine

**ORCID: 0000-0001-8065-9187**

**T. Grebenyuk**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**ORCID: 0000-0002-9287-2919**

**Purpose.** The presence of a formation and the difference in the mechanical properties of the host rocks lead to a significant increase in the maximum stresses at the points of the production circuit where the coal seam and the host rocks are connected. At the points of contact between the coal seam and shale, the stability condition becomes the most important. This gives grounds to propose a rational design of the mine fastening: it is necessary to increase its rigidity, and the flexible elements of the fasteners must be installed at the junction of shale and coal. **Methodology.** Currently, the finite element method (MSE) is the most common method for solving a wide class of problems in the mechanics of a deformable solid in various fields of technology. In mining, ITU is used to solve problems of statics and dynamics of rock massifs. Usually, preference is given, if possible, to flat problems that allow exploring more multiparameter systems. In this article, horizontal workings of considerable length are considered, so their end parts do not affect the middle part of the work and for it the conditions of flat deformation are realized. In this case, for each section perpendicular to the axis of production, it will have the same stress distribution around the contour of production. Therefore, the calculation area for determining the stress distribution around the development is chosen in the form of a square plate of unit thickness, which is perpendicular to the axis of production, and the contour of production is in its center. The edges of the plate are loaded with gravitational pressure, the magnitude of which depends on the mine depth and the density of the mine field rocks. The production circuit is considered free of loads and ties. Thus, to determine the stress distribution around the mine is the problem of a flat stress state. **Results.** The ray methods was used to investigate the interaction of a plane blast wave with a circular mine production of a minefield. The wave front is parallel to the forming of mining, which is parallel to the day surface. If the horizontal mining of a circular cross-section is of great length, then it can be assumed that the boundary conditions do not affect the stress and strain fields in the vicinity of the central cross-section of the production and we will investigate these fields by formulating a flat problem of the theory of elasticity. Static stress-strain state of the rock in the vicinity of circular production is analyzed using the finite element method. The field of Mises strength conditions ( $\sigma_{miz}^c$ ) around the vaulted mine at a depth of 500 m, through which the coal seam passes parallel to the day surface, is analyzed. The presence of a coal seam strongly influences the distribution of Mises strength conditions  $\sigma_{miz}^c$ . The formation and the difference in the mechanical properties of the host rocks lead to a sig-

nificant increase in the maximum stresses at the points of the circuit where the coal seam and the host rocks meet. At the points of contact between the coal seam and shale, the stability condition acquires the greatest value  $\sigma_{miz}^c = 2 \times 10^7$  Pa. **Originality.** Due to the use of the finite element method, for the first time a detailed description of the stress-strain state around the vaulted mine, through which the coal seam passes parallel to the day surface, was obtained. **Practical value.** The developed technique of definition of mining stability conditions gives the basis to offer a rational design of fastening of mining. Using the finite element method, studies of stress fields and displacements around the vaulted mine, through which the coal seam passes parallel to the day surface, were carried out. This allowed to identify dangerous areas on the contour of the production and suggest rational types of fastening structures. References 15, figures 3.

**Key words:** mining, gravity, coal seam, finite element method, numerical results.

## REFERENCES

1. Solodyankin, A. V., Prokudin, A. Z., Vugodin, M. A., Kravchenko, K. V., Myasnikov, I. V. (2018). Issledovanie vliyaniya parametrov uprochnennogo sloya zakreplennogo prostranstva vurabotok na smechniya kontura [Study of the influence of the parameters of the hardened layer of the fixed space of workings on the contour displacement]. Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii girnichogo virobniictva: naukovovo-virobnichij zbirnik [Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry], KNU. Kremenuchuk, issue 2(22). Pp. 17–26.
2. Skipochka, S. I., Palamarchuk, T. A., Prokhorets, I. V., Yalansky, A. A., Bobro, N. T. (2018). Zakonomernosti vliyaniya geomechanical system "massiv-vurabotka-krep" na informatsionnue parametru akusticheskikh poley v massive gornukh porpd [Regularities of the influence of the geomechanical system "massiv-vurabotka-krep" on the information parameters of acoustic fields in the rock mass]. Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii girnichogo virobniictva: naukovovo-virobnichij zbirnik [Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry], KNU. Kremenuchuk, issue 2(22). Pp. 27–38.
3. Kulnich, V. D., Vorob'ev, V. V., Chebenko, V. N. (2017). Issledovanie vliyaniya poerkhnostno-aktivnykh veschestv na prochnostnue kharakteristiki skal'nykh gornukh porod pri razlichnykh tipakh vozdeystviya [Investigation of the effect of surfactants on the strength characteristics of rocky rocks under various types of impact]. Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii girnichogo virobniictva: naukovovo-virobnichij zbirnik [Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry], KNU. Kremenuchuk, issue 2(20). Pp. 43–49.
4. Skipochka, S. I., Palamarchuk, T. A., Prokhorets, I. V., Bobro, N. T. (2016). Zakonomernosti izmeneniya napryazhonno-dekhormirovannogo sostoyaniya porodnogo massiva pri intensifikatsii gornuh rabot [Regularities of change in the stress-deformed state of the rock mass during the intensification of mining operations]. Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii girnichogo virobniictva: naukovovo-virobnichij zbirnik [Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry], KNU. Kremenuchuk, issue 2(18). Pp. 26–40.
5. Tereshuk, R. M. (2017). Kriplennya pokhulykh girnuchukh vurobok ankernumu sistemamu [Fastening of stolen girder vyrobok with anchor systems]. Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii girnichogo virobniictva: naukovovo-virobnichij zbirnik [Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry], KNU. Kremenuchuk, issue 2(20). Pp. 50–60.
6. Kovalevskaya, I. A. (2003). Geomekhanika vzaimodeystviya elementov sistemu "Gornuy massiv - uprochnennue porodu - krep' podzemnykh vurabotok [Geomechanics of interaction of elements of the system "Rock mass - hardened rocks - support of underground workings], Dnepropetrovsk NMA Ukraine, 236 p.
7. Kraets, V. G., Kirichenko, M. T., Phrolov, O. O., Vapnichna, V. V. (2009). Osnovu tekhnologii vudobuvannya korusnykh kopalun [Fundamentals of mining technology Textbook], Kyiv: NTUU. 100 p.
8. Chudek, M. (2002). Geomechanika z podstawami ochrony srodowiska gorniczego i powierzchni terenu. Gliwice: Wyd.Pol. Sl.
9. Chudek, M., Negrey, S. G., Solov'ev, G. I. ats. (2009). Osobennosti mekhanizma vudavlivaniya porod pochvu vuemochnukh vurabotok glubokikh shakht [Peculiarities of the mechanism of extrusion of soil rocks of excavation workings of glide mines], Miedzynarodowa Konferencja "IX Szkola Geomechaniki 2009" Materialy Naukowe. Gliwice-Ustron. Pp. 227–239.
10. Bolikov, V. E., Nikitin, A. M., Vasil'ev, M. V. (2009). "Predictive assessment of the stability of mine workings and determination of the type and parameters of support", *Gornuy informatsionno analiticheskij byulleten'*, no. 4, pp. 309–315.
11. Kas'yan, N. N., Ivashenko, V. D. (2009). Geomekhanicheskie osnovu obespescheniya ustoyshivosti vurabotok glybokikh shakht [Geomechanical foundations for ensuring the stability of deep mine workings], Miedzynarodowa Konferencja "IX Szkola Geomechaniki 2009" Materialy Naukowe. Gliwice-Ustron. Pp. 81–92.
12. Sammal', A., Khotieva, N. (2001). Prognoz napryazhonnoho sostoyaniya i otsenka ustoychivosti porod vokrug gornukh vurabotok v seysmisheski aktivnykh rayonakh [Stress forecast and assessment of rock stability around mine workings in seismically active regions], V Międzynarodowe Sympozjum Geotechnika-Geotechnics 2001. Materiały Naukowe. Gliwice – Ustroń. 16-19 pazdziernika, pp. 125–132.
13. Kurguzov, V. D. (2003). Stress-strain state of the rock mass, weakened by a square working, *Vushislitel' nue tekhnologii*. V. 8, no. 5. Pp. 84–93.
14. Rushkov, S. P. (2013). Modelirovanie konstruksiy v srede Femap with Nastran [Modeling structures in the environment Femap with Nastran] DMK Press, Moscow, Russia, 784 p.
15. Novatskiy, V. (1975). Teoriy uprugosti [Elasticity theory], World, Moscow, Russia, 872 p.

Стаття надійшла 17.05.2021.