

УДК 622.831

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-140-151](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-140-151)

О.І. Сергієнко, Л.В. Сергієнко

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ПРОГНОЗУ ВИВАЛОУТВОРЕННЯ ПОРІД ПОКРІВЛІ НАД ОЧИСНИМ ВИБОЄМ

Мета. Обґрунтування параметрів і розробка способу прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм.

Методика досліджень. Чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану (метод кінцевих елементів), метод суцільних середовищ, методика контактної взаємодії поверхонь, аналітичні дослідження процесу вивалоутворення порід безпосередньої покрівлі.

Результати досліджень. В статті представлені методика та результати чисельного моделювання об'ємного напружено-деформованого стану шаруватого гірського масиву, з граничними умовами контактної взаємодії між породними шарами та з навантаженням гравітаційних сил.

Встановлено, що процес утворення вивалу в зоні опорного тиску починається з формування пересічних систем тріщин, напрям яких залежить від кута нахилу площини руйнування.

Для прогнозу вивалоутворення обґрунтований критерій тріщиностійкості порід при змішаному навантаженні наскрізної тріщини.

Розроблений спосіб для визначення локальних зон утворення вивалів, якій дозволяє визначити місце розташування вивалу у виїмковому полі лави та його параметри.

Наукова новизна. Вперше представлений спосіб прогнозування параметрів вивалоутворення з урахуванням критерію тріщиностійкості порід при змішаному навантаженні наскрізної тріщини.

Практичне значення. Практична значимість полягає в способі прогнозуванні процесів вивалоутворення в безпосередній покрівлі при відпрацюванні вугільних пластів та визначенні їх параметрів.

Ключові слова: безпосередня покрівля, критерій тріщиностійкості, вивалоутворення, параметри вивалу.

Актуальність. На сьогодні, зі збільшенням глибини розробки значно погіршилися гірничо-геологічні та гірничотехнічні умови ведення очисних робіт. При проведенні гірничих виробок і ведення очисних робіт одними із головних факторів, які ускладнюють видобуток вугілля є велика вірогідність обвалів і обвалень. В основі природних причин обвалів і обвалень лежать різноманіття гірничо-геологічних умов та чисельні прояви гірського тиску і раптового його збільшення. Недостатня вивченість поведінки гірничого масиву над виробленим простором, при веденні очисних робіт в складних гірничо-геологічних умовах, приводить до непередбаченого обвалення покрівлі та вивалоутворення порід на виїмкових дільницях. Обвалення покрівлі, представленої потужними міцними пісковиками або слабкими глинистими сланцями, у привибійній частині лави веде до її зупинки і втрати видобутку вугілля. При цьому завжди існує потенційна небезпека травмування гірників при обвалах і обваленнях покрівлі. Відомо, що в шахтах щорічно відбувається в середньому до 40 обвалів і обвалень із загибеллю або травмуванням людей [1]. Це свідчить про відсутність надійних методів прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм.

Таким чином, обґрунтування параметрів та розробка способу прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм, з урахуванням геомеханічних процесів, які протікають у підроблюваному вуглепородному масиві є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що на зміщення порід покрівлі та її стійкість мають велике значення фізико-механічні властивості гірських порід, такі як міцнісні і деформаційні. До міцнісних властивостей гірських порід належать: тимчасовий опір стискуванню, розтягуванню, зсув і вигін, коефіцієнт зчеплення і кут внутрішнього тертя. Найбільш часто в класифікаціях використовують показник опору

на стискування, а в розрахунках опір на вигин і кут внутрішнього тертя. Деформаційні характеристики такі як модуль пропорційності напруження і деформацій Юнга, коефіцієнт Пуассона використовують значно рідше.

Оскільки гірські породи вугільних родовищ є осадовими і їм властиві наявність шаруватості, а також тріщинуватості, яка розділяє вуглепородний масив на окремі структурні блоки, то при проведенні виробки відбувається його розшарування. При цьому від потужності окремого шару залежить стійкість покрівлі.

Вплив шаруватості порід покрівлі на їх стійкість встановлено експериментально. Так в роботі [1] запропоновані емпіричні залежності між коефіцієнтом структурного ослаблення і потужністю шарів породи. Під коефіцієнтом структурного ослаблення розуміється співвідношення міцності порід в масиві і їх міцності в зразку.

Також, тріщинуватість є одним із головних показників структури гірських порід, яка по генезису розділяється на три типи: ендегенна, екзогенна, техногенна. Кожен з типів тріщинуватості утворює одну або кілька систем тріщин, які розбивають гірський масив на окремі структурні блоки, що в значній мірі впливає на стійкість покрівлі. Тектонічні тріщини тісно пов'язані зі значними розривними порушеннями при перетині порід безпосередньої покрівлі сприяють обваленню порід покрівлі на висоту нижнього шару. Крім того, при відсутності зчеплення породи, розбитої системою тріщин на висоту всієї потужності безпосередньої покрівлі, з площиною тріщинуватості призводить до обвалення у привибійному просторі.

Відомо, що взаємне положення системи тріщин і лінії очисного вибою має великий вплив на стійкість покрівлі. Так, при значеннях кута зустрічі до 30-35° може відбутися непередбачене обвалення у лаві та ускладнення управління гірським тиском. У роботі [3] авторами експериментально на моделях з еквівалентних матеріалах встановлені не тільки якісні, але кількісні залежності стійкості покрівлі від її тріщинуватості. Так, граничний проліт тріщинуватої покрівлі становить 0,50-0,75 від аналогічного показника непорушеної покрівлі.

Питанню стійкості порід покрівлі при веденні очисних робіт, а також створенню безпечних умов праці присвячено багато робіт.

В.Т. Давідянцем запропонована залежність для обчислення величини опускання покрівлі при будь-якій ширині привибійного простору [2]. В.І. Барановський запропонував визначати початковий зсув покрівлі у очисному вибої [3]. Залежність стійкості покрівлі виробки від кута падіння вивчена в роботах В.Д. Слесарева, О.О. Борисова, Н.А. Шаповала, В.І. Барановського, В.Т. Давідянца, Ф.Н. Воскобоева, К.Ф. Сапицького та інших.

В даний час в галузі діють класифікації стійкості порід покрівлі розроблені ДонВУГІ для пологих, похилих і крутих пластів [4]. В роботі [5] О.О. Борисов пропонує оцінювати стійкість порід покрівлі за коефіцієнтом стійкості, який визначається як відношення довжини граничного прольоту шару покрівлі (або декілька шарів) до фактичного прольоту.

Критерій стійкості покрівлі запропонований Ю.Б. Грядущим, В.В. Вишневецьким, В.В. Назимко, М.І. Бугару [6] дозволяє оцінювати міцність порід покрівлі з урахуванням як потужності і геометричних характеристик кожного шару покрівлі, так і вугільного пласта та безпосередньої підшви.

У роботі [7] авторами на основі аналізу фізичного та математичного моделювання, а також шахтних інструментальних спостережень за проявом гірського тиску в очисних вибоях, пропонується оцінювати стан покрівлі за допомогою критерія, в якому враховується не тільки фізико-механічні властивості порід покрівлі і її літологічний склад, а також параметри вугільного пласта і безпосередньої покрівлі.

У роботах В.П. Зубова [8] запропоновано комплексний підхід до оцінки стану

покрівлі за критерієм стійкості. В основу підходу оцінки стану покрівлі положено, що всі геомеханічні процеси, що протікають в гірському масиві при розробці вугільних пластів, залежать від його напруженого стану. Тому автором запропоновано наступний критерій :

$$\eta = \frac{\gamma H}{\sigma_c^{kp}}, \quad (1)$$

де γ – середньозважена щільність порід;

H – глибина ведення гірничих робіт, м;

σ_c^{kp} – межа міцності порід безпосередньої покрівлі при одноосьовому стисненні, МПа.

Аналіз критеріїв стійкості [8] показав, що незважаючи на великий досвід вивчення процесу вивалоутворення порід покрівлі над лавою, вплив напружено-деформованого стану на утворення місць локального обвалення, при веденні очисних робіт в складних гірничо-геологічних умовах вивчено недостатньо. Також запропоновані критерії стійкості не дають можливості прогнозувати місця утворення вивалів по лінії очисного вибою, на кожному етапі відробки вугільних пластів.

Мета статті (постановка завдання). Обґрунтування параметрів і розробка способу прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовані наступні задачі:

1) Виконати чисельний аналіз напружено-деформованого стану об'ємної моделі шаруватого масиву з граничними умовами контактної взаємодії між шарами порід.

2) Обґрунтувати критерій граничного стану для визначення зон руйнування порід і утворення вивалу в безпосередній покрівлі.

3) Визначити параметри зони руйнування порід і місць утворення вивалу в безпосередній покрівлі.

Методи дослідження: чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану гірського масиву при веденні очисних робіт; аналітичні дослідження критеріїв граничного стану.

Виклад основного матеріалу. Згідно з даними геологічного розрізу гірський масив уявляється у вигляді шаруватої структури різноманітних типів порід різної потужності.

Відомо, що при веденні очисних робіт відбувається зрушення гірського масиву над виробленим простором. В результаті змінюється напружено-деформований стан породних шарів. Крім того, на перерозподіл напружено-деформованого стану впливають як обвалені, так і породні шари, які зависли над виробленим простором. Взаємодія породних шарів супроводжується розшаруванням, групуванням і обваленням порід покрівлі.

Для вивчення процесу перерозподілу напружень в породах покрівлі над очисним вибоєм при їх обваленні, була розроблена фізико-математична модель шаруватого гірського масиву. Визначення напружено-деформованого стану порід над виробленим простором здійснювалося за допомогою чисельного моделювання об'ємної моделі гірського масиву. Приймається кожний породний шар, як окрема дискретна частина моделі зі своїми фізико-механічними властивостями. Також, між породними шарами враховуються умови контактної взаємодії. Таким чином, породний масив в цілому є дискретною складовою, але в межах шару є суцільним середовищем.

Умови рівноваги об'ємного напружено-деформованого стану моделі описуються виразами [10]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho X &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho Y &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho Z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де ρ – щільність речовини;

X, Y, Z – проекції об'ємних сил на осі координат, віднесені до одиниці маси.

Рівняння нерозривності деформацій, які відображають те, що в процесі деформацій суцільність середовища не порушується:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z}, \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x}, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Основна і обов'язкова умова справедливості цих рівнянь – це суцільність або нерозривність середовища, як до початку, так і у процесі деформації.

Додаткові рівняння для ізотропного середовища (узагальнений закон Гука), які зв'язують деформації з напруженням, що відображають фізичні особливості розвитку деформацій [11]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)], \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)], \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Математичне моделювання контакту різних середовищ вимагає опису граничних умов контакту між елементами моделі.

Для точок, що лежать на лінії розділу підобластей, які контактують між собою, граничні умови представлені у вигляді нерівностей [12]:

$$u_n^{i-1} + u_n^{i+1} - \delta_n^i \leq 0; \quad \sigma_n^i \leq 0; \quad (u_n^{i-1} + u_n^{i+1} - \delta_n^i) \cdot \sigma_n^i = 0, \quad (5)$$

де u_n^{i-1} , u_n^{i+1} і δ_n^i – переміщення точок підобластей S_{i-1} , S_{i+1} і початковий зазор (натяг) в напрямку позитивних нормалей контактуючих ділянок, нахил яких збігається з напрямком загальної нормалі n ; σ_n^i – напруження взаємодії тіл у напрямку нормалі n .

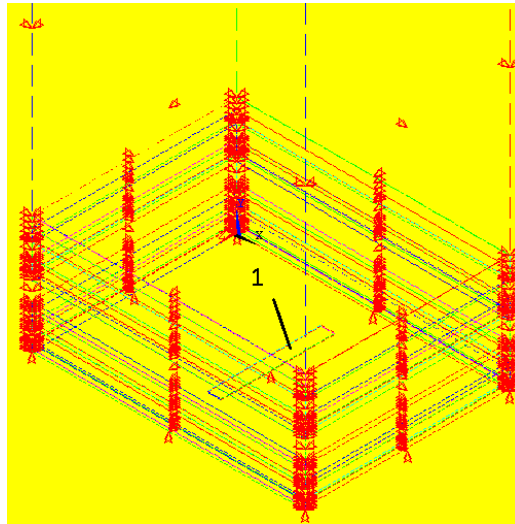
Умови фрикційної взаємодії на точках контакту приймаються у формі закону Кулона. При цьому нормальні σ_n^i і дотичні τ_n^i напруження підпорядковані співвідношенню:

$$|\tau_n^i| \leq f_{mp} \sigma_n^i, \quad (6)$$

де $f_{\text{тр}}$ – коефіцієнт сухого тертя.

Співвідношення (5) виконується за рахунок проковзування контактуючих поверхонь одна щодо одної, стримуваних фрикційними дотичними напруженнями.

Модель складається з породних шарів покрівлі та підосви, вугільного пласта, який відпрацьовується та пластів-супутників. При моделюванні виробленого простору розмір моделі змінюється (рис. 1).



1 – вироблений простір

Рисунок 1 – Об’ємна модель для чисельного моделювання напружено-деформованого стану шаруватого гірського масиву

Щоб не задавати граничні умови навантаження, гірський масив моделюється до самої поверхні. Для моделювання використовуються породні шари, які зміщуватимуться над виробленим простором, а останні шари задаються до поверхні суцільним середовищем. Навантаження моделі здійснюється гравітаційними силами, які моделюються додавання до моделі прискорення вільного падіння. Таким чином, навантаження шарів відбувається за допомогою ваги самих порід. Породні шари, які залягають над іншими, через контактні пари передають навантаження один одному. Сили тертя між шарами теж моделюються контактними парами.

На бокових гранях граничні умови деформування моделі дорівнюють нулю. Сама нижня грань моделі теж не має зміщення. Таким чином, бокове напруження буде створюватися за рахунок поперечних деформацій.

Якщо лава одиночна, а гірський масив моделюється до самої поверхні, то моделювання виробок при такому масштабі не має сенсу. Отже, розмір кінцевого елемента може бути більшим за розміри виробки. Це потрібно для оптимізації моделі у плані витрат розрахункового часу.

Прогнозування вивалів в очисних вибоях можливо виконати при визначенні об’ємного напружено-деформованого стану, за допомогою критерію тріщиностійкості, якщо задатися певною довжиною тріщини. Породи, що складають гірський масив, мають різні системи тріщин, тому визначати руйнування в будь якій точці масиву можливо, якщо прийняти наявність в ньому випадкової тріщини.

Кут нахилу площини руйнування грає важливу роль при утворенні тріщин розколювання. Завдяки цьому утворюються перетинаючі системи тріщин і породи покрівлі руйнуються на дрібні фракції, що веде до обвалення покрівлі у привибійний простір із залишком куполів обвалення над секціями механізованого кріплення (рис. 2).



Рисунок 2 – Купол обвалення над секціями механізованого кріплення

Для визначення зони руйнування були проаналізовані існуючі критерії граничного стану [13]. Для встановлення місць вивалоутворення в масиві найбільш доцільним виявився критерій тріщиностійкості [14].

Критерій тріщиностійкості для наскрізної тріщини постійного перетину в масиві при змішаному навантаженні (рис. 3) [15]:

$$K_I = \frac{P_2}{\sqrt{\pi \cdot l}} \cdot \sqrt{\frac{l+x_0}{l-x_0}}; K_{II} = \frac{P_1}{\sqrt{\pi \cdot l}} \cdot \sqrt{\frac{l+x_0}{l-x_0}}; K_{III} = \frac{P_3}{\sqrt{\pi \cdot l}} \cdot \sqrt{\frac{l+x_0}{l-x_0}}; \quad (7)$$

$$\sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + K_{III}^2} \cdot \frac{4}{k+1} \leq K_{ef} \quad (8)$$

де K_I , K_{II} , K_{III} – коефіцієнти інтенсивності напружень при відриву та поперечному і повздовжньому зсуві відповідно;

P_1 , P_2 , P_3 – об'ємне навантаження в масиві з тріщиною;

l – довжина тріщини.

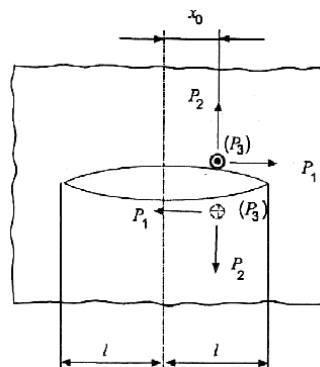


Рисунок 3 – Наскрізна тріщина постійного перерізу в масиві при змішаному навантаженні

Чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану вуглепородного масиву виконувалось згідно гірничо-геологічних умов 9-ої північної лави блоку № 10 пласта d_4 ПАТ "ШУ "Покровське", з використанням методу кінцевих елементів.

В результаті виконаних розрахунків отримані чисельні значення нормальних і дотичних напружень, головних нормальних напружень, а також лінійних та зсувних деформацій в кожній точці об'ємної моделі шаруватого вуглепородного масиву.

Розрахункові показники напруження з об'ємної моделі гірського масиву знімалися за допомогою "скануючих" ліній, проведених в безпосередній покрівлі по довжині виїмкового стовпа, з відстанню одна від одної 5 м. Тобто, якщо довжина лави 250 м, то кількість ліній складе 50 одиниць.

Контури зони утворення вивалів безпосередньої покрівлі встановлювалися за допомогою критерію (8).

Для визначення локальних зон утворення вивалів був розроблений спосіб, який полягає у наступному:

1. У породному шарі безпосередньої покрівлі по всім "скануючим" лініям, які об'єднуються у "скануючу" площину, визначають параметри компонент головних напружень.
2. За допомогою критерію тріщиностійкості визначається стан порід покрівлі: приймаємо «0» – якщо руйнування відсутнє, або «1» – якщо є руйнування.
3. Для визначення висоти зони руйнування необхідно розглянути напружений стан інших перетинів по висоті породного шару.

Обговорення результатів. У таблиці 1 представлені результати розподілу головних напружень безпосередньої покрівлі по одній "скануючій" площині до первинного обвалення безпосередньої покрівлі (табл. 1). Згідно запропонованого способу були встановлені локальні зони руйнування попереду очисного вибою, в зоні опорного тиску.

Користуючись такими "скануючими" перетинами, через кожний метр висоти породного шару безпосередньої покрівлі, отримуємо об'ємну графічну інтерпретацію зони руйнування породного шару (табл. 2). Об'єм вивалу визначається за допомогою кількості визначених зон руйнування. Також є можливість визначити геометричні параметри вивалу (висоту, ширину та глибину).

Таким чином, визначити параметри вивалу безпосередньої покрівлі за допомогою критерію тріщинуватості при змішаному навантаженні є можливим, якщо використовувати об'ємний напружено-деформований стан шаруватого масиву з навантаженням гравітаційних складових.

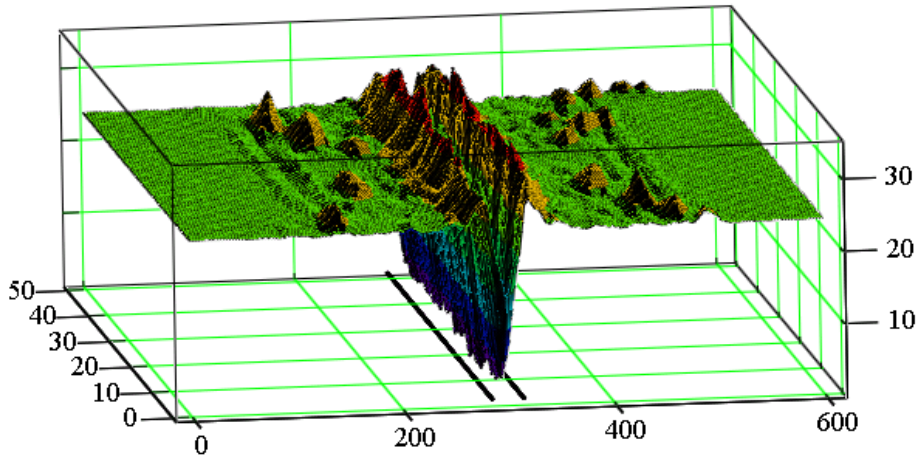
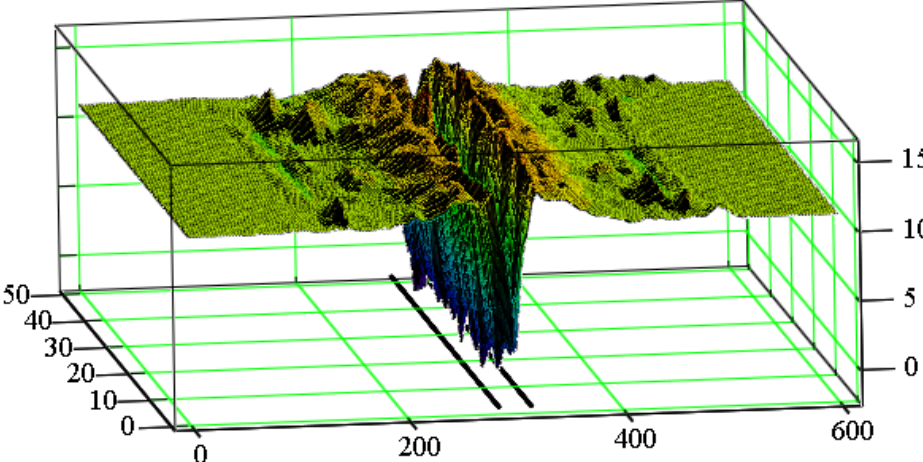
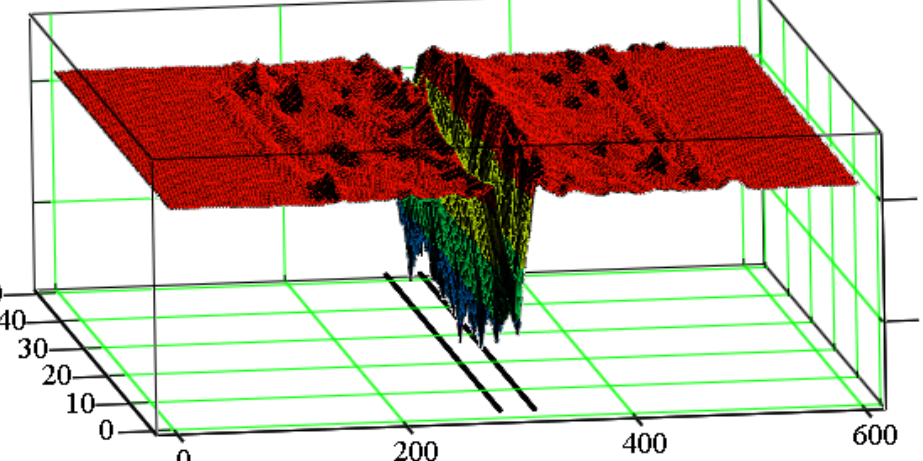
Висновки.

1. Аналіз джерел вказує на те, що критерій прогнозування вивалу перетворюється на критерій стійкості покрівлі, але це не дає певної картини процесу вивалоутворення.

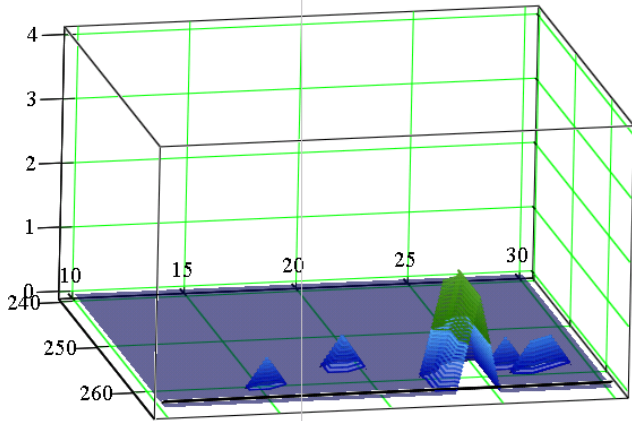
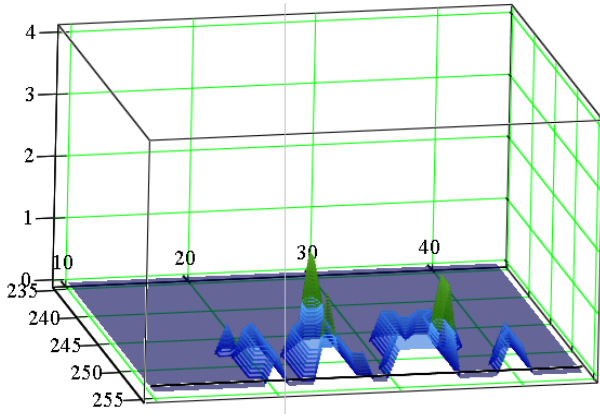
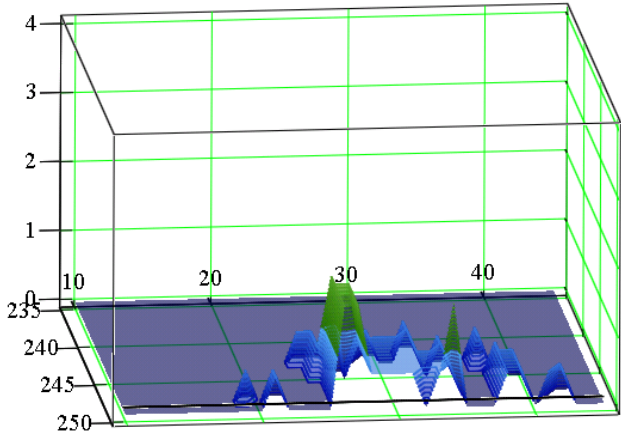
2. Для вивчення процесу перерозподілу напружень в породах покрівлі над очисним вибоєм при їх обваленні, була розроблена фізико-математична модель шаруватого гірського масиву. Визначення напружено-деформованого стану порід над виробленим простором здійснювалося за допомогою чисельного моделювання об'ємної моделі гірського масиву.

3. Кут нахилу площини руйнування грає важливу роль при утворенні тріщин розколювання, завдяки цьому утворюються перетинаючі системи тріщин і породи покрівлі руйнуються на дрібні фракції, що веде до обвалення покрівлі у привибійний простір з залишком куполів обвалення над секціями механізованого кріплення.

Таблиця 1 – Напружений стан безпосередньої покрівлі до її первинного обвалення (відхід лави від монтажного хідника на 30 м)

Компонент напруження	Графічне уявлення розподілу головних напружень в безпосередній покрівлі
σ_1 , МПа	
σ_2 , МПа	
σ_3 , МПа	

Таблиця 2 – Графічна інтерпретація проявів вивалоутворення попереду очисного вибою

№	Відхід лави від монтажного хідника, м	Зони вивалоутворення попереду очисного вибою в безпосередній покрівлі	Орієнтовний об'єм вивалу, м ³
1	70		85
2	90		242,5
3	100		230

4. Прогнозування вивалів в очисних вибоях здійснюється за допомогою розрахунку об'ємного напружено-деформованого стану масиву з використанням критерію тріщиностійкості, який передбачає початкову довжину тріщини. Породи, що

складають гірський масив, мають різні системи тріщин, тому визначати руйнування в будь-якої точці масиву можливо, якщо прийняти наявність в ньому випадкової тріщини.

5. Розроблений спосіб для визначення локальних зон утворення вивалів, який дозволяє встановити місце розташування та його параметри (об'єм, висота, довжина, глибина).

Список літератури

1. Брюханов А.М., Бережинский В.И., Бусыгин К.К., Колосюк В.П., Коптиков В.П., Мнухин А.Г., Хорунжий Ю.Т. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / Под общей редакцией А.М. Брюханова. - Часть II. - Донецк - Донбасс: 2004. - 632 с. с ил.
2. Давидянц В.Т. Совершенствование способов и средств управления кровлей на шахтах Донбасса. - М.: Недра, 1969. - 278 с.
3. Барановский В.И. Влияние природных факторов на выбор способов разработки пологопадающих пластов на глубоких горизонтах. - М.: Горгостехиздат, 1963. - 60 с.
4. Е.Н. Мухин, Е.Н.Захаров, Е.Д. Дубов и др. Управление очистных забоев с индивидуальной крепью. - К.Техника, 1994. - 190 с.
5. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980.-320 с.
6. Назимко В.В., Вишневецкий В.В., Грядущий Ю.Б., Бугара М.И. Критерий устойчивости пород кровли в очистном забое.// Уголь Украины. - 1996. - №8. - С.20-22.
7. Грядущий Ю.Б., Трунов Л.Ф., Зборщик М.П., Назимко В.В. Повышение устойчивости подготавливаемых выработок, поддерживаемых в обрушенных и уплотненных породах зон разгрузки. // Уголь Украины. - 1991. - №1. - С.13-15.
8. Зубов В.П. Борьба с вывалами на концевых участках лав при отработке пластов на больших глубинах. // Уголь. - 1985. - №12. - С.22- 26.
9. Разработка критерия вывалообразования пород кровли очистных забоев / О.Ю. Белогуб, Г.И. Соловьев, Л.Л. Бачурин, А.И. Сергиенко, М.В. Федоренко, С.В. Козырь // Геотехнічна механіка: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2013. – Вип. 110. – с. 39-49. – Бібліогр.: 6 назв. – рос.
10. Седов Л.И. Механика сплошной среды, т. I, – М., Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1970 г., стр. 492 с.
11. Баклашов И.В. Механика горных пород. / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, «Недра», 1975. 271 с.
12. Подгорный А.Н. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. / А.Н. Подгорный, П.П. Гонтаровский, Б.Н. Киркач и др. Ин-т проблем машиностроения. – Киев : Наук, думка, 1989.– 232 с.
13. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. Монография / ДонНТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.
14. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука. Гл. ред. физ.мат. лит. – М. 1974. – 640 с.
15. Пестриков В.М., Механика разрушения на базе компьютерных технологий. Практикум / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 464 с.: ил.

References

1. A. M. Briukhanov, V. I. Berezhinskii, K. K. Busygin, V. P. Kolosiuk, V. P. Koptikov, A. G. Mnukhin, and Yu. Investigation and prevention of accidents in coal mines / Under the general editorship of A.M. Briukhanov. - Part II. - Donetsk - Donbass: 2004. - 632 p.
2. Davidiants V.T. Improving the methods and means of roof management in the mines of Donbass. - M.: Nedra, 1969. - 278 p.
3. Baranovskii V.I. The influence of natural factors on the choice of methods for the development of gently dipping reservoirs at deep horizons. - M.: Gorgostekhizdat, 1963. - 60 p.
4. E.N. Mukhin, E.N. Zakharov, E.D. Dubov and others. Management of stopes with individual support. - K. Tekhnika, 1994. - 190 p.
5. Borisov A.A. Mechanics of rocks and massifs. M.: Nedra, 1980.-320 p.
6. Nazimko V.V., Vishnevetskii V.V., Griaduschii Yu.B., Bugara M.I. The criterion for the stability of roof rocks in the production face.// Coal of Ukraine. - 1996. - No. 8. - S.20-22.
7. Griaduschii Yu.B., Trunov L.F., Zborshchik M.P., Nazimko V.V. Increasing the stability of preparation workings supported in collapsed and compacted rocks of the discharge zones. // Coal of Ukraine. -

1991. - No. 1. - P.13-15.

8. Zubov V.P. Fight against breakouts at the end sections of coal face when mining seams at great depths. // Coal. - 1985. - No. 12. - P.22-26.

9. Development of a criterion for rock formation of the roof of stopes / O.Yu. Belogub, G.I. Solovyov, L.L. Bachurin, A.I. Serhiienko, M.V. Fedorenko, S.V. Kozyr // Geotechnical mechanics: Interv. Sat. scientific tr. - Dnepropetrovsk: IGTM NASU, 2013. - VIP. 110. - p. 39-49

10. Sedov L.I. Continuum mechanics, vol. I, - M., Main edition of the physical and mathematical literature of the Nauka publishing house, 1970, p. 492 p.

11. Baklashov I.V. Mechanics of rocks. / I.V. Baklashov, B.A. Kartoziia, "Nedra", 1975. 271 p.

12. Podgornyi A.N. Problems of contact interaction of structural elements. / A.N. Podgorny, P.P. Gontarovskii, B.N. Kirkach et al. Inst. problems of mechanical engineering. - Kyiv: Nauk, Dumka, 1989. - 232 p.

13. Litvinskii G.G. Analytical theory of strength of rocks and massifs. Monograph / DonSTU. - Donetsk: Nord-Press, 2008. - 207 p.

14. Cherepanov G.P. Brittle Fracture Mechanics. M.: Science. Ch. ed. phys.math. lit. - M. 1974. - 640 p.

15. Pestrikov V.M. Fracture mechanics based on computer technologies. Workshop / V.M. Pestrikov, E.M. Morozov. - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2007. - 464 p.

Надійшла до редакції 25.10.2022

Serhiienko O., Serhiienko L.

JUSTIFICATION OF THE METHOD OF FORECASTING THE PROCESS OF FORMATION OF CAVE-IN OF ROOF ROCKS OVER COAL FACE

Purpose. Justification of parameters and development of the method of forecasting the formation of roof rocks over the coal face.

Methodology. Numerical modeling of the volumetric stress-strain state (finite element method), the method of continuous media, the method of contact interaction of surfaces, analytical studies of the process of rock cave-in formation of the roof rocks.

Results. The article presents the methodology and results of numerical modelling of the volumetric stress-strain state of a layered rock massif, with boundary conditions of contact interaction between rock layers and with the load of gravitational forces.

It has been established that the process of formation of a bulge in the zone of support pressure begins with the formation of intersecting systems of cracks, the direction of which depends on the angle of inclination of the plane of destruction.

For the prediction of rock cave-in formation, the criterion of crack resistance of rocks under mixed loading of a through crack has been substantiated.

The method has been developed for determining the local zones of formation of cave-in, which allows determining the location of the fallout in the excavated longwall field and its parameters.

Scientific novelty. The method of predicting the parameters of the formation of rock cave-in has been presented for the first time, taking into account the criterion of crack resistance of rocks under mixed loading of a through crack.

Practical significance. Practical significance lies in the method of predicting the processes of cave-in rock formation in the roof rocks during the working of coal seams and determining their parameters.

Keywords: roof rocks, criterion of crack resistance, cave-in, fallout parameters.

Відомості про авторів

Сергієнко Олександр Іванович – к.т.н, доцент кафедри управління гірничим виробництвом і охорона праці, Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (Юридична адреса: пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85300. Фактична адреса: вул. Софії Ковалевської, 29, м. Луцьк, Волинська обл., 43012, Україна). E-mail: oleksandr.serhiienko@donntu.edu.ua

Сергієнко Ліана Валеріївна – к.т.н, провідний фахівець відділу докторантури, аспірантури. Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (Юридична адреса: пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85300. Фактична адреса: вул. Софії Ковалевської, 29, м. Луцьк, Волинська обл., 43012, Україна). E-mail: liana.serhiienko@donntu.edu.ua

Serhiienko Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining Management and Labour Protection, Donetsk National Technical University, (Legal address: 2,

Shybankova Square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300. Actual address: 29, Sofia Kovalevska Street, Lutsk, Volyn region, 43012, Ukraine). E-mail: oleksandr.serhiienko@donntu.edu.ua

Serhiienko Liana, Candidate of Technical Sciences, leading specialist of the Department of doctoral and postgraduate studies. Donetsk National Technical University, (Legal address: 2, Shybankova Square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300. Actual address: 29, Sofia Kovalevska St., Lutsk, Volyn region, 43012, Ukraine). E-mail: liana.serhiienko@donntu.edu.ua