

© Е.В. Фесенко¹, Є.Є. Павлов¹, А.І. Новак¹

¹ ТОВ "Технічний університет "Метінвест Політехніка", Маріуполь, Україна

ВПЛИВ ОСНОВНИХ ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНИХ ТА ГІРНИЧОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПРОЦЕСИ РУЙНУВАННЯ ПОРІД У ПІДОШВІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

© E. Fesenko¹, Ye. Pavlov¹, A. Novak¹

¹ Metinvest Polytechnic Technical University LLC, Mariupol, Ukraine

INFLUENCE OF MAIN MINING-GEOLOGICAL AND MINING- TECHNICAL PARAMETERS ON ROCK DESTRUCTION PROCESSES IN THE FOOT WALL OF MINE WORKINGS

Мета. Обґрунтування розрахункового методу оцінки потужності порід підосви, що здимаються і визначення найбільш значущих чинників, що впливають на цю величину.

Методи дослідження. За допомогою методів механіки суцільного середовища розглянута поздовжньо-поперечна стійкість шаруватих порід підосви, здатність їх протидіяти вигину під дією зовнішніх навантажень. Досліджено процес формування зони непружних деформацій в підосві виробки. Визначення глибини руйнування порід в кутах виробки виконано шляхом розрахунку напруженого стану на контурі гірничої виробки довільної форми і пружного накладення напружень.

Результати. Запропоновано методика визначення глибини руйнування порід в кутах виробки шляхом розрахунку напруженого стану на контурі гірничої виробки довільної форми. Показана ступінь впливу основних гірничо-геологічних і гірничотехнічних факторів на величину шару зруйнованих порід в підосві гірничої виробки, для якого можлива подальша втрата стійкості і здимання. Запропонована в роботі методика дозволяє істотно спростити розрахунки і своєчасно та раціонально застосовувати способи боротьби зі здиманням підосви гірничих виробок.

Наукова новизна. Розроблено розрахункову схему і методика визначення потужності шаруватих порід підосви гірничих виробок, для яких можлива втрата стійкості і подальше випирання всередину виробки. Досліджено вплив основних гірничо-геологічних і гірничотехнічних факторів на величину підняття порід підосви і доведено, що найбільший вплив на цю величину чинять глибина закладення виробки і міцність порід підосви. При цьому вплив коефіцієнта бічного розпору масиву несуттєвий.

Практичне значення. Запропоновано інженерний метод розрахунку потужності шару порід підосви, схильних до здимання з урахуванням основних гірничо-геологічних і гірничотехнічних факторів, що впливають на геомеханічні процеси, що протікають в підосві підземних гірничих виробок, що дозволяє істотно спростити розрахунки і своєчасно та раціонально застосовувати способи боротьби зі здиманням підосви гірничих виробок.

Ключові слова: гірничої виробки, підосва, здимання підосви, потужність шару, що здимається, втрата несучої здатності, міцність.

Вступ. Здимання підосви гірничих виробок є одним з найпоширеніших проявів гірського тиску. У цьому складному геомеханічному процесі видавлювання порід у виробку важливу, а в багатьох випадках домінуючу роль відіграє

шаруватість порід. В даний час існує ряд гіпотез, що пояснюють механізм і причини здимання порід підешви, однак не всі з них досить точні і достовірні, деякі або мають обмежену сферу застосування, або складні у використанні, а іноді вимагають значного обсягу геологічної і гірничотехнічної інформації та проведення трудомістких шахтних вимірів.

Здимання шаруватих порід підешви гірничих виробок відбувається за двома альтернативними механізмами: а) шляхом втрати їх поздовжньо-поперечної стійкості, або б) у вигляді руйнування і витискання всередину виробки слабких порід. Про ступінь стійкості порід, механізми їх руйнування можна судити за отриманими нами критеріями стійкості [1].

У роботах наукової школи НГУ проф. А.М. Шашенко, проф. А.М. Роєнко та ін. [2 - 4] вирішується завдання пружно-пластичної стійкості рівноважного стану системи кріплення-масив. Ними розглядається шар підешви, що знаходиться під дією бічних стискаючих зусиль T і пов'язаний з шарами, що залягають нижче. Зчеплення шару з породним масивом характеризується коефіцієнтом структурного ослаблення зчеплення $0 < k < 1$. Граничне розподілене навантаження, при якому можливий відрив шару і його подальше зміщення всередину виробки, становить $q = k \cdot \sigma_p$. Автори роблять такі припущення: 1) наявність структурного ослаблення порід в підешві ($k < 1$); 2) наявність початкового прогину шару ω_0 , що має максимальне значення в центрі виробки. Математична модель, що лежить в основі досліджень, досить близько відображає поведінку порід підешви при здиманні, проте зроблені припущення призводять до неможливості застосування даного підходу для пояснення деяких видів здимання і його причин. Так, автори стверджують, що за коефіцієнтом зчеплення $k > 0,5$, а також при відсутності початкового прогину ω_0 здимання неможливо, що не завжди відповідає дійсності. Тим самим визначальне значення для здимання має величина початкового прогину ω_0 , хоча з практики відомо - плоска підешва не усуває небезпеки здимання. При істотній товщині шару h також виключається можливість здимання, хоча є випадки раптового підняття потужних міцних шаруватих порід.

В роботі [5] розглянуті різні форми профілів підняття підешви в гірничих виробках, і прийнято, що кривизна поверхні порід, що здимаються залежить від співвідношення величин (асиметрії) стискаючих бічних навантажень і кута нахилу породних шарів відносно горизонтальної площини. При цьому не розглядаються причини виникнення, схеми дії бічних навантажень, не оцінюється їхня можлива величина для конкретних умов залягання. Автори відзначають, що на величину підняття порід підешви істотно впливає співвідношення висоти підривання слабкого шару порід і його потужності. На їхню думку, повна виїмка (підірка) цього шару повністю усуває здимання, що не цілком узгоджується з даними практики.

Постановка проблеми. Враховуючи вищевикладене, важливо продовжити вивчення явища здимання гірських порід з урахуванням шаруватості і особливостей взаємодії з навколишнім масивом для пояснення причин і виявлення найбільш значущих чинників.

Виходячи з цього, **мета досліджень** полягає в обґрунтуванні розрахункового методу з оцінки потужності порід, що здимаються та виявленні найбільш значущих факторів, що впливають на цей процес. **Об'єктом досліджень** є гірські породи, що залягають в підшві гірничих виробок, а **предмет досліджень** - геомеханічні процеси, які відбуваються в них під дією зовнішнього навантаження.

Завдання досліджень: визначити напружений стан порід навколо гірничої виробки, оцінити розміри зон непружних деформацій (ЗНД) і руйнування порід в найбільш небезпечних ділянках підшви, встановити закономірності і параметри зруйнованої породної зони в підшві виробки.

Основний матеріал. Реальний масив гірських порід, як правило, не є однорідним і ізотропним, а представлений шарами різної міцності з послабленими міжшаровими зв'язками. Крім того, поява тріщин в масиві, особливо після проведення гірничої виробки, створює додаткові площини послаблень. Тому породи, що залягають в підшві виробки, необхідно розглядати з урахуванням складності їх структурної, і, зокрема, шаруватої будови. Найбільш небезпечним з точки зору стійкості слід вважати верхній шар підшви гірських порід. Його можна представити як плиту в плоско-деформованому стані на пружній (вінклеровській) основі у вигляді нижче лежачих шарів підшви. На балку-плиту діють горизонтальні стискаючі сили P з боку масиву, які викликають вертикальні реакції з боку вінклеровської основи.

Поздовжньо-поперечна стійкість шаруватих порід, тобто здатність їх протистояти вигину з втратою стійкості, багато в чому зумовлюється потужністю (товщиною) шаруватого пакету порід підшви, схильних до здимання.

Розглянемо процес формування ЗНД в підшві виробки. При спорудженні виробки відбувається перерозподіл напружень в її околі, причому кутові точки контуру виробки (як правило, біля підшви) є локальними концентраторами напружень (рис. 1, а). Це призводить до того, що руйнування порід в першу чергу починається в зонах, приурочених до кутових точок, тоді як ЗНД в покрівлі і боках виробки ще не утворилася. Розмір ЗНД залежить від вихідного напруженого стану порід і форми виробки. Будемо вважати, що потужність порід підшви, схильних до здимання, буде відповідати розміру r_* ЗНД у кутах виробки (рис. 1, б).

Оцінимо глибину руйнування порід в кутах виробки, використовуючи методику визначення напруженого стану на контурі гірничої виробки довільної форми [6]. Суть методу полягає у визначенні напружень навколо еліпса порівняння. Під ним розуміють еліптичний отвір тієї ж площі і з тим же співвідношенням розмірів, що і у виробки. Потім слід ввести поправки до напружень на тих ділянках, де кривизна реального контуру відрізняється від еліптичного. Ці відхилення трактуються як виступи або западини на контурі еліпса, при цьому використана важлива закономірність: локальна концентрація напружень прямо пропорційна наведеній кривизні контуру в даній точці (див. далі). Метод розрахунку доступний, простий і забезпечує задовільну точність для виробок випуклої форми (помилка не більше $\pm 10\%$) [6].

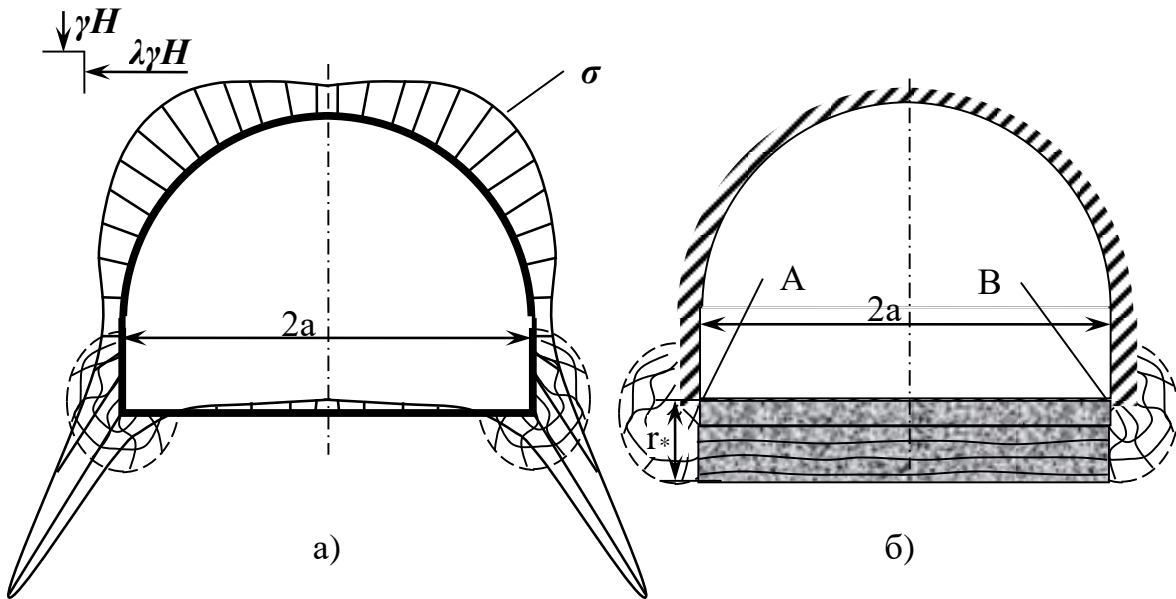


Рис. 1. Епюра розподілу напружень на контурі виробки і розрахункова схема до визначення потужності порід, схильних до здимання

Розглянемо для простоти випадок горизонтального залягання порід, коли в кутовій точці формується ЗНД радіусом r_* . Зростання ЗНД відбувається до тих пір, поки діючі напруження на межі зони не стануть рівними або меншими за міцність порід.

Використовуючи принцип пружного накладення напружень при зростанні ЗНД (що йде в запас міцності), будемо шукати такий радіус контура, при якому напруження дорівнюють міцності порід $[\sigma_c]$ (рис. 2).

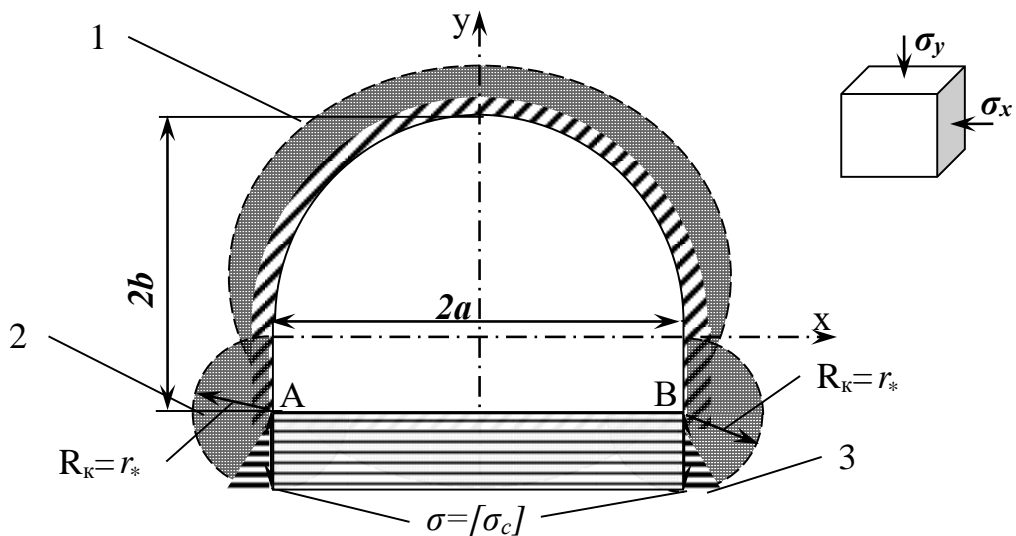


Рис. 2. Схема до визначення радіусу ЗНД (r_*) в кутових точках виробки
 1 – ЗНД навколо виробки; 2 – ЗНД в кутових точках виробки;
 3 – епюра навантажень на породну балку в підшві виробки

Таким чином, використовуючи гірничо-геологічні (глибина залягання H , міцність порід $[\sigma_c]$) і гірничотехнічні (ширина $2a$ і висота $2b$ виробки, площа її поперечного перерізу S) дані, слід визначити глибину зони r_* , для якої можлива втрата стійкості шарів, що залягають в підшві виробки.

Згідно [6], знайдемо напруження в кутовій точці контуру виробки для горизонтального залягання порід:

$$\sigma = \sigma_x \cdot f^x + \sigma_y \cdot f^y; \quad (1)$$

де σ_x, σ_y , - напруження, що діють по осях симетрії виробки; f^x, f^y , - допоміжні функції, які обчислюють відповідно до [6].

$$\sigma_x = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \sin^2 \alpha$$

$$\sigma_y = \sigma_1 \cdot \sin^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \cos^2 \alpha$$

де σ_1, σ_2 - вихідне напружений стан порід, $\sigma_1 = \gamma \cdot H$, $\sigma_2 = \lambda \cdot \gamma \cdot H$; $\gamma \cdot H$ - вага вишележачого масиву; λ - коефіцієнт бічного розпору масиву; α - кут між віссю x і напрямком дії напруження σ_1 .

При горизонтальному заляганні порід $\alpha = 90^\circ$ і $\sigma_x = \sigma_2 = \lambda \cdot \sigma_1$, $\sigma_y = \sigma_1$.

Вирази допоміжних функцій (f^x, f^y) для кутових точок контуру мають вигляд [6]:

$$f^x = 0,6 \cdot (\kappa - 1) + \frac{b_3}{a_3}; \quad f^y = 0,6 \cdot (\kappa - 1) + \frac{a_3}{b_3}; \quad (2)$$

де κ - наведена кривизна контуру:

$$\kappa = \left(\frac{R_3}{R_\kappa} \right)^{\frac{2}{3}}; \quad (3)$$

R_3, R_κ - радіус кривизни відповідно еліпса порівняння і контуру.

a_3, b_3 - піввісі еліпса порівняння:

$$a_3 = \sqrt{\frac{S \cdot a}{\pi \cdot b}}; \quad b_3 = \sqrt{\frac{S \cdot b}{\pi \cdot a}}; \quad (4)$$

Для кутової точки виробки радіус еліпса порівняння дорівнює [6]:

$$R_3 = a_3^{-1} \cdot b_3^{-1} \cdot (0,5 \cdot (a_3^2 + b_3^2))^{\frac{3}{2}}; \quad (5)$$

Необхідно знайти таку кривизну контуру ($R_\kappa = r_*$), при якій діючі напруження σ дорівнюватимуть міцності порід $[\sigma_c]$ (рис. 2). Для цього прирівняємо праву частину виразу (1) і міцність порід $[\sigma_c]$ і виразимо наведену кривизну κ з отриманого виразу:

$$\kappa = \frac{3 \cdot \sigma_1 \cdot a \cdot b \cdot \lambda + 5 \cdot [\sigma_c] \cdot a \cdot b + 3 \cdot \sigma_1 \cdot a \cdot b - 5 \cdot \sigma_1 \cdot a^2 - 5 \cdot \sigma_1 \cdot b^2}{3 \cdot \sigma_1 \cdot a \cdot b \cdot (\lambda + 1)}; \quad (6)$$

Тоді з (6) знаходимо шуканий радіус ЗНД r_* :

$$r_* = R_k = \frac{R_3}{k^{3/2}} \quad (7)$$

Слід мати на увазі, що формули (3 - 7) придатні лише у разі, коли $r_* \approx 0,5 a$, оскільки якщо розмір зони руйнування r_* перевищує чверть ширини виробки, відбувається взаємовплив і об'єднання сусідніх зон руйнування в кутах підошви, що змінює розрахункову схему. Так, при досягненні $r_* \approx 0,5a$, в підошві відбуваються процеси об'єднання сусідніх зруйнованих зон і істотний перерозподіл діючих напружень.

Для аналізу закономірностей впливу глибини закладення виробки H і міцності порід підошви $[\sigma_c]$ на величину радіуса ЗНД r_* в кутових точках нами складена програма розрахунків в математичному пакеті Mathcad, де задають вихідні гірничо-геологічні ($[\sigma_c]$, H , λ) і гірничотехнічні ($2a$, $2b$, S) дані, потім з урахуванням виразів (3 - 7) обчислюють значення r_* .

Графіки залежності радіуса ЗНД r_* від $[\sigma_c]$ і H для виробки з параметрами: $2a = 4,75$ м, $2b = 3,44$ м, $S = 12,8$ м², $\lambda = 1$, представлені на рис. 3. З рисунків видно, що $[\sigma_c]$ і H істотно впливають на величину зони руйнування порід в підошві виробки. Наприклад, для глибини $H = 400$ м зниження міцності порід $[\sigma_c]$ з 100 МПа до 30 МПа призводить до збільшення r_* з 0,1 м до 1,0 м тобто в десять разів (рис. 3, а). Збільшення глибини розробки H з 200 м до 800 м для порід міцністю $[\sigma_c] = 60$ МПа збільшує зону зруйнованих порід в підошві r_* з 0,1 м до 1,0 м (також в десять разів) (рис. 3, б). Такі ж залежності можуть бути побудовані для виробок з іншими розмірами $2a$, $2b$, S .

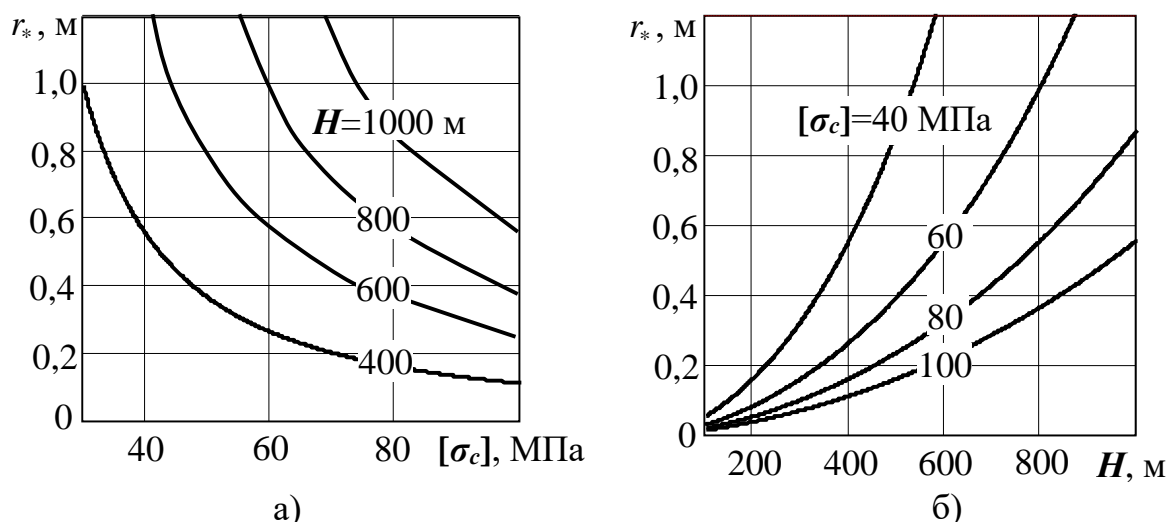


Рис. 3. Залежність потужності порід, що здимаються від:
а) – міцності порід $[\sigma_c]$ ($H = 400 \dots 1000$ м); б) – глибини закладення виробки H ($[\sigma_c] = 40 \dots 100$ МПа)

Дослідження показали, що зміна коефіцієнта бічного розпору λ майже не впливає на величину r_* . Так, зменшення λ з 1 до 0,5 призводить до зменшення r_*

не більше ніж на 20 % (при $H = 800$ м, $[\sigma_c] = 60$ МПа, тобто при $\gamma H/\sigma_{сж} = 0,33$). При зменшенні $H/[\sigma_c]$ вплив λ на радіус ЗНД r_* ще менш помітно. Оскільки на практиці не завжди можливо точно визначити величину λ , використання в виразах (3 - 7) його значення $\lambda = 1$ не внесе суттєвої помилки в результати розрахунку.

Для спрощення розрахунків зручно використовувати безрозмірну комбінацію $\omega = \gamma H/\sigma_{сж}$ (критерій гірського тиску проф. Ю.З. Заславського), а замість розмірного радіусу ЗНД r_* - відносний радіус r_*/a . Виконаний розрахунок залежності r_*/a від критерію ω представлений на рис. 4 і в табл. 1.

Таким чином, для розрахунку величини радіуса ЗНД r_* в кутовій точці виробки достатньо скористатися графіком (рис. 4) або табл. 1, попередньо розрахувавши величину критерію ω . Проміжні значення r_*/a , що не увійшли в табл. 1, можна розрахувати методом інтерполяції.

Таблица 1

Розміри ЗНД в підшві виробки (r_*/a)

Параметр $\omega = \gamma H/\sigma_{сж}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5
Відносний радіус ЗНД r_*/a	0,01	0,03	0,06	0,11	0,17	0,26	0,37	0,5	0,5
	0	2	5	0	0	0	0	0,5	0,5

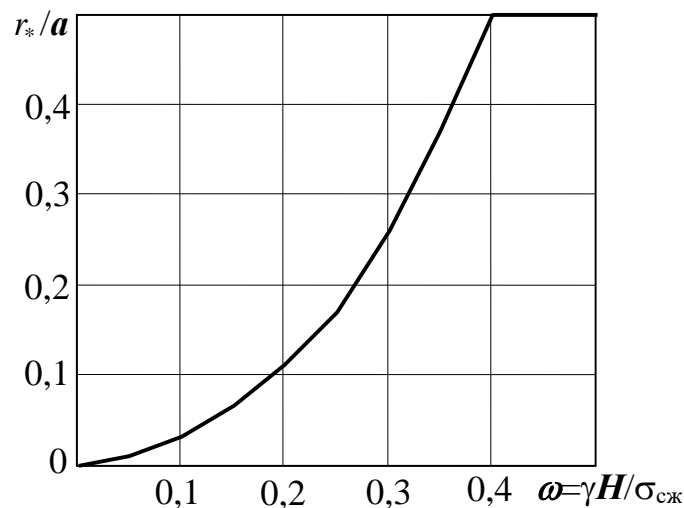


Рис. 4. Залежність розміру ЗНД (r_*/a) від параметра $\omega = \gamma H/\sigma_{сж}$

Приклад: визначити глибину руйнування порід в підшві виробки r_* для наступних умов: глибина закладення $H = 800$ м, міцність порід підшви $[\sigma_c] = 70$ МПа, ширина виробки $2a = 5,2$ м.

1. Розраховуємо критерій ω : $\omega = (0,025 \text{ МН/м}^3 \cdot 800 \text{ м})/70 \text{ МПа} = 0,286$.
2. Визначаємо величину безрозмірного радіусу r_*/a (табл. 1 або рис. 4): $r_*/a = 0,23$.
3. З урахуванням розмірності: $r_* = 0,23 \cdot 2,6 = 0,598 \approx 0,6$ м.

Ту ж величину r_* отримаємо, використовуючи для розрахунку вираження (3 - 7). Отже, для даних умов товщина породних шарів, що залягають в підосві виробки, для яких можлива втрата стійкості і здимання, складе $r_* \approx 0,6$ м.

Висновки. Стійкість шаруватих порід підосви гірничих виробок багато в чому зумовлюється потужністю (товщиною) r_* шаруватого пакету порід підосви, схильних до здимання. Найбільший вплив на цю величину чинять глибина закладення виробки і міцність порід підосви. Для діапазону $200 \text{ м} < H < 800 \text{ м}$ і $30 \text{ МПа} < [\sigma_c] < 100 \text{ МПа}$ збільшення $H/[\sigma_c]$ в 3 - 4 рази призводить до збільшення потужності порід, що здимаються в 10 разів. Коефіцієнт бокового розпору масиву λ впливає на величину r_* несуттєво. Графік (рис. 4) і табл. 1 для визначення потужності порід, що здимаються r_* в залежності від параметра $\omega = \gamma H / \sigma_{сж}$, дозволяють істотно спростити розрахунки, що дає можливість своєчасно і раціонально застосовувати способи боротьби зі здиманням порід підосви в капітальних і підготовчих виробках.

Перелік посилань

1. Литвинский, Г.Г. & Фесенко, Э.В. (2004). Критерии устойчивости слоистых пород почвы. *Материалы международной научно-технической конференции. Сб. науч. докладов*, 330-335.
2. Шашенко, А.Н. & Каганов, М.Е. (1990). Моделирование процесса пучения пород почвы в подземных выработках. *Изв. вузов. Горный журнал*, 11, 21-26.
3. Шашенко, А.Н., Каганов, М.Е. & Роечко, А.Н. (1994). Критерий устойчивости в задаче о пучении пород почвы подземной выработки. *Изв. вузов. Горный журнал*, 1, 44-46.
4. Роечко, А.Н. (2001). Численное исследование нового подхода к изучению пучения пород почвы выработок. *Уголь Украины*, 9, 6-7.
5. Борзых, А.Ф., Зюков, Ю.Е. & Княжев, С.Н. (2004). *Содержание, ремонт и ликвидация выработок угольных шахт*. Алчевск: ДонГТУ.
6. Литвинский, Г.Г., Гайко, Г.И. & Кулдыркаев, Н.И. (1999). *Стальные рамные крепи горных выработок*. Киев: Техника.

АННОТАЦИЯ

Цель. Обоснование расчетного метода оценки мощности пучащих пород почвы и определения наиболее значимых факторов, влияющих на эту величину.

Методы исследования. С помощью методов механики сплошной среды рассмотрена продольно-поперечная устойчивость слоистых пород почвы, способность их противодействовать изгибу под действием внешних нагрузок. Исследован процесс формирования зоны неупругих деформаций в почве выработки. Определение глубины разрушения пород в углах выработки выполнено путем расчета напряженного состояния на контуре горной выработки произвольной формы и упругого наложения напряжений.

Результаты. Предложена методика определения глубины разрушения пород в углах выработки путем расчета напряженного состояния на контуре горной выработки произвольной формы. Показана степень влияния основных горно-геологических и горнотехнических факторов на величину слоя разрушенных пород в почве горной выработки, для которого возможна дальнейшая потеря устойчивости и пучение. Предложенная в работе методика позволяет существенно упростить расчеты и своевременно и рационально применять способы борьбы с пучением почвы горных выработок.

Научная новизна. Разработаны расчетная схема и методика определения мощности слоистых пород почвы горных выработок, для которых возможна потеря устойчивости и дальнейшее выпирание внутрь выработки. Исследовано влияние основных горно-геологических и горнотехнических факторов на величину поднятия пород почвы и доказано, что наибольшее влияние на эту величину оказывают глубина заложения выработки и прочность пород почвы. При этом влияние коэффициента бокового распора массива несущественно.

Практическое значение. Предложен инженерный метод расчета мощности слоя пород почвы, склонных к пучению с учетом основных горно-геологических и горнотехнических факторов, влияющих на геомеханические процессы, протекающие в почве подземных горных выработок, позволяющий существенно упростить расчеты и своевременно и рационально применять способы борьбы с пучением почвы горных выработок.

Ключевые слова: *горная выработка, почва, пучение почвы, мощность пучащего слоя, потеря несущей способности, прочность.*

ABSTRACT

Objective. Substantiation of the calculation method for assessing the thickness of heaving soil rocks and determining the most significant factors affecting this value.

Research methods. Using the methods of continuum mechanics, the longitudinal-transverse stability of layered soil rocks, their ability to resist bending under the action of external loads are considered. The process of the formation of a zone of inelastic deformations in the working soil has been investigated. Determination of the depth of destruction of rocks in the corners of the working is carried out by calculating the stress state on the contour of a mine working of arbitrary shape and elastic application of stresses.

Findings. A method is proposed for determining the depth of destruction of rocks in the corners of the working by calculating the stress state on the contour of a mining working of an arbitrary shape. The degree of influence of the main mining-geological and mining-technical factors on the size of the layer of destroyed rocks in the floor of working, for which further loss of stability and heaving is possible, is shown. The method proposed in the work allows to significantly simplify the calculations and timely and efficiently apply the methods of combating the heaving of the floor of working.

The originality. A design scheme and a method for determining the thickness of layered soil rocks in mine workings have been developed, for which loss of stability and further bulging into the workings is possible. The influence of the main mining-geological and mining-technical factors on the magnitude of the uplift of rocks in the floor of working has been investigated and it has been proved that the depth of the excavation and the strength of the rocks in the floor of working have the greatest influence on this value. In this case, the influence of the lateral expansion coefficient of the massif is insignificant.

Practical implications. An engineering method is proposed for calculating the thickness of a layer of rocks in the floor of working prone to heaving, taking into account the main mining-geological and mining-technical factors affecting the geomechanical processes occurring in the rocks in the floor of working, which makes it possible to significantly simplify calculations and timely and efficiently apply methods of combating rocks in the floor of working heaving in mine workings.

Keywords: *mine working, floor of working, floor of working heaving, thickness of the swelling layer, loss of bearing capacity, strength.*