

Assessment of the influence of geotechnical factors on deformation processes in rock mass around mining

Oleksandr Solodyankin^{1*}, Kostiantyn Kravchenko¹, Volodymyr Shapoval¹,
Oleksandr Prokudin¹, Oksana Solodyankina¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: solodiankin.o.v@nmu.one

Abstract. The introduction of renewable energy sources is an unalterable global trend. However, transition process may take a long time in Ukraine. Coal is a reliable energy source for the country for this period. An urgent task for the near purpose is to increase the efficiency of coal mines, reduction the cost of coal, attraction of reserves in deep horizons. PJSC «DTEK Pavlogradugol» is large modern association, which conducts mining in the Western Donbass. The mines in this region are characterized by difficult operating conditions, which leads to a decrease mining resilience and many renovations. To increase the stability of capital mining extra activities are necessary.

Article contains the results of deformation processes, which were performed at the Heroiv Kosmosu mine of the company «DTEK Pavlogradugol». A comparison of the data recorded at this stage of the research, and the results that were obtained in 1970-1980-s was done. It is shown that the intensity of deformation processes in mining has increased significantly over the last 40 years, which requires the fact when an evaluation of the degree of complexity of mining operation conditions, choosing the parameters of fastening and assigning extra activities.

Keywords: capital working, structural factor, skin grouting, shotcrete, rock mass strength

Оцінка впливу геотехнічних факторів на деформаційні процеси в породному масиві навколо виробок

Олександр Солодянкін^{1*}, Костянтин Кравченко¹, Володимир Шаповал¹, Олександр Прокудін¹, Оксана Солодянкіна¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

*Відповідальний автор: solodiankin.o.v@nmu.one

Анотація. Впровадження відновлюваних джерел енергії є безальтернативною світовою тенденцією. Проте, для України процес переходу може зайняти тривалий час. На цей період для країни надійним ресурсом енергії є вугілля. Актуальним завданням на найближчу перспективу є підвищення ефективності роботи вугільних шахт, зниження собівартості вугілля, залучення запасів на глибоких горизонтах. ПрАТ «ДТЕК Павлоградуголь» є великим сучасним об'єднанням, яке веде видобуток на Західному Донбасі. Шахти цього регіону характеризуються складними умовами експлуатації, що призводить до зниження стійкості виробок і великих обсягів ремонтних робіт. Для підвищення стійкості капітальних виробок потрібне проведення додаткових заходів.

В статті наведено результати досліджень деформаційних процесів, виконаних на шахті імені Героїв Космосу компанії «ДТЕК Павлоградуголь». Виконано порівняння даних, зафіксованих на даний момент досліджень, та результатів, отриманих у 1970-1980 рр. Показано, що інтенсивність деформаційних процесів у виробках шахти за останні 40 років суттєво зросла, що потребує врахування цього факту при оцінці ступеня складності умов експлуатації виробок, виборі параметрів кріплення та призначенні додаткових заходів.

Ключові слова: капітальна гірнична виробка, коефіцієнт структурного ослаблення, тампонаж закріпного простору, торкретування, міцність породного масиву

1. Вступ

В Україні вугільна промисловість ще залишається базовою галуззю економіки. Світові тенденції свідчать про поступовий перехід на джерела енергії, що відновлюються, проте зростання обсягів та стабільне отримання енергії з альтернативних джерел потребує ще 40-50 років. На цей час потрібно забезпечити достатню кількість, перш за все, вугілля, як сировини для теплових електростанцій, та вже зараз усвідомити, що до кінця цього перехідного періоду, треба буде припинити діяльність шахт, закрити які надто складно, а інколи і неможливо з екологічних причин.

Слід зазначити, що поряд з вирішенням стратегічних завдань, що стоять у світовій енергетиці, Україна повинна вирішувати стратегічні питання на державному рівні. Одним з них є забезпечення своїх теплових електростанцій газовими марками вугілля, на заміну антрацитових. Наразі Україна відчуває гострий дефіцит антрацитових марок вугілля. На підконтрольній території запасів вугілля газових марок достатньо. В першу чергу це родовище Західного Донбасу, на яких ведуть розробку потужні шахти вугільної компанії «ДТЕК Павлоградвугілля». Лідером із видобутку вугілля серед названих є шахта імені Героїв космосу, річний обсяг видобутку якої становить біля 3 млн. тонн.

Видобуток вугілля неминуче пов'язаний зі збільшенням глибини розробки. При цьому істотно збільшується гірський тиск, змінюються властивості породного середовища, суттєво активізуються геомеханічні процеси в масиві порід навколо виробок. Ведення гірничих робіт викликає перерозподіл початкового поля напружень, призводить до руйнування масиву порід, зміни його просторової структури. Все частіше ці процеси носять катастрофічний характер, супроводжуються людськими і матеріальними втратами. У зв'язку з цим, однією з найбільш актуальних проблем сьогодні є забезпечення безпеки і ефективності виконання підземних робіт.

Найбільш тяжкі наслідки проявів підвищеного гірського тиску у виробках глибоких шахт обумовлені великими деформаціями породного масиву. За певних умов великі деформації масиву можуть реалізовуватися надзвичайно швидко, у динамічній формі – гірничі удари, раптові викиди вугілля, породи і газу [1]. Інші протікають відносно повільно, наприклад, деформація і руйнування кріплення, здимання порід підосви і розглядаються як статичні процеси. Проте і в останньому випадку – у складних геомеханічних умовах, матеріальні збитки порівняні з катастрофічними.

При розвитку гірничих робіт і збільшенні глибини розробки особливої актуальності набувають питання спорудження та підтримання капітальних виробок, з тривалим терміном експлуатації, що забезпечують підготовку нових ділянок та глибоких горизонтів [1].

Вирішення проблеми підвищення стійкості виробок пов'язане з максимальним використанням несучої здатності масиву гірських порід, залучення його до спільної роботи з кріпленням. Досвід спорудження та експлуатації шахт у складних гірничо-геологічних умовах свідчить, що для забезпечення експлуатаційного стану виробок необхідно поряд із встановленням кріплення проводити спеціальні заходи щодо підвищення їх стійкості. У складних умовах шахт Західного Донбасу добре зарекомендувало себе кріплення із тампонажем закріпного простору, що дає змогу сформувати комбіновану конструкцію кріплення і працює разом з приконтурним породним масивом. Незважаючи на те, що технологія зведення такого виду кріплень давно відома, трудомісткість та вартість їх залишаються досить високими.

Крім того, наразі ситуація на шахтах регіону суттєво погіршилася. Збільшилася глибина розробки до 400...550 м, зросла техногенна порушеність масиву порід. Інтенсифікація очисних робіт на шахтах потребувала збільшення перерізу виробок у

середньому від 10 м² до 18 м². Зазначені причини призвели до того, що зараз при спорудженні капітальних виробок, через складну організацію робіт, технологія заповнення закріпного простору або не проводиться, або це робиться з великим відставанням від вибою, що не забезпечує тривалої стійкості виробок і вимагає подальшого виконання дорогих і трудомістких ремонтних робіт.

2. Аналіз стану протяжних виробок у складних умовах експлуатації

В даний час розуміння та вивченість геомеханічних процесів, що відбуваються навколо гірничих виробок, знаходиться на високому рівні. Вивченню особливостей їх протікання в умовах шахт Західного Донбасу присвячені роботи Максимова О.П., Усаченка Б.М., Стицина В.І., Шашенка О.М., Халимендіка Ю.М., Кириченка В.Я., Шмиголя О.В., Вигодіна М.О. та багатьох інших. Усі дослідники відзначають специфіку деформаційних процесів зумовлену, насамперед, гірничо-геологічними умовами – наявністю слабких порід, їх шаруватістю, порушеністю та ін.

Детальні дослідження щодо вивчення закономірностей деформування породного масиву навколо протяжних виробок в умовах глибоких шахт Західного Донбасу у 1980-х роках було виконано Вигодіним М.О. з використанням глибинних та контурних реперів [2]. Їхні результати свідчать, що геомеханічні процеси навколо об'єкту, що досліджується (типові виробки), розташованого поза зоною впливу очисних робіт, нелінійно розвиваються протягом 50 діб. За цей час здимання підосви виробки сягають того критичного значення, коли для нормального виконання технологічних процесів у виробках вже потрібне рихтування рейкового шляху. Виконаний тампонаж закріпного простору призводить до стабілізації зсувів у приконтурному масиві та суттєвому зниженню швидкості деформацій, а в окремих випадках до повної їх зупинки [3].

Аналогічні результати досліджень у виробках шахт Західного Донбасу в 1970-80-ті роки з отриманими залежностями зміщень контуру виробки були виконані Ю.М. Халимендіком [4], Б.М. Усаченком [5], В.І. Стициним [6] та ін. Параметри деформування приконтурного масиву за даними в цілому схожі з результатами М.О. Вигодіна.

На рис. 1 (графік 2) наведена залежність для здимання підосви виробки, яка апроксимована виразом:

$$U_{1,2} = a \cdot (1 - e^{-bL}) \quad (1)$$

де U – здимання підосви виробки, L – відстань до вибою; a , b – коефіцієнти апроксимації: $a_1 = 706,5$, $b_1 = 0,0132$, $a_2 = 530,3$, $b_2 = 0,0177$.

Отримані результати свідчать, що здимання підосви виробки досягали небезпечної величини на відстані приблизно 50 – 60 м від вибою. Тому тампонаж, який виконується за прохідницьким комплексом обладнання на відстані 30 – 40 м від вибою, проводився ще до реалізації значних деформацій приконтурного масиву порід і був ефективним заходом для підвищення стійкості виробок.

Результати шахтних досліджень, виконані співробітниками кафедри БГГМ НТУ «Дніпровська політехніка» протягом 2013 – 2016 років у капітальних виробках шахти імені Героїв космосу, що споруджувалися, показали, що на сучасному етапі розвитку гірських робіт, деформаційні процеси відбуваються більш інтенсивно, ніж 30-40 років тому в тих же гірничо-геологічних умовах (рис. 2, графік 1).

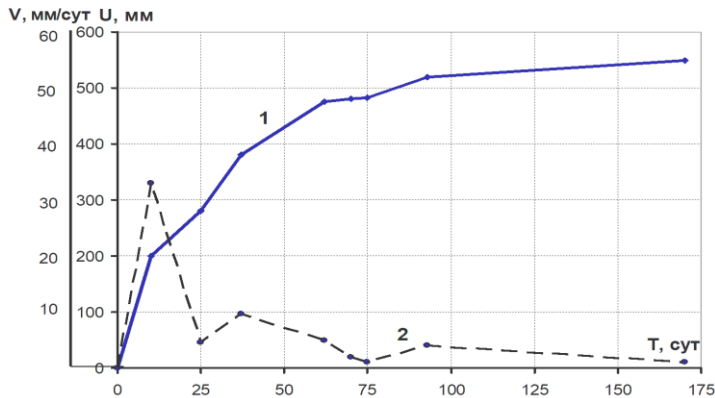


Рисунок 1. Графік здимання підосви виробки (1) та швидкості здимання (2) у часі в квершлагу №3 гор. 470 м шахти ім. Героїв космосу

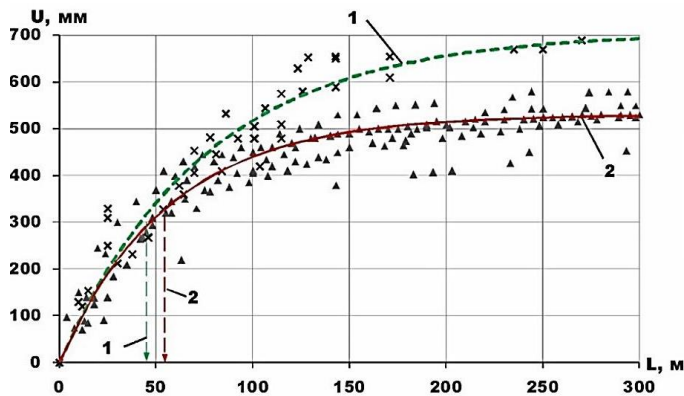


Рисунок 2. Графіки здимання підосви у виробках гор. 370 м шахти ім. Героїв космосу виконаних за результатами досліджень: 1 – сучасний стан гірничих робіт; 2 – у період 1970-1980 років

Так, активізація деформаційних процесів відбувається вже на відстані 10-15 м від вибою, а одразу за прохідницьким комплексом здимання підосви виробки сягає критичних величин. Виконання тампонажних робіт на цьому етапі будівництва виробки вже виконується із запізненням та його ефективність незначна.

Аналізуючи отримані результати необхідно відзначити, що і для першої, і для другої залежності використовувалися дані, отримані при спорудженні капітальних виробок в однакових умовах – пласт S_{10} , горизонт 370 м шахти імені Героїв космосу. При цьому зміщення контуру виробки (здимання підосви) збільшилися в середньому в $U_1/U_2 = 1,32$ рази.

Таким чином, метою досліджень, представлених у статті, є оцінка геотехнічних факторів, що впливають на деформаційні процеси у приконтурному масиві порід.

3. Результати та обговорення

3.1. Оцінка факторів, що впливають на активізацію деформаційних процесів у масиві гірських порід навколо протяжних виробок

Слід зауважити, що на стан виробок впливає велика кількість факторів, що визначають її стійкість, обсяги ремонтних робіт, безпеку робітників. Ступінь впливу

цих факторів різна і до кінця не вивчена. Тому часто проєктувальники оцінюють сукупний їх вплив.

Найбільш прийнятним та досить аргументованим для оцінки ступеня складності умов ведення гірничих робіт є емпіричний показник, запропонований Ю.З. Заславським:

$$K = \gamma H / R_c, \quad (2)$$

де γ – об'ємна вага порід, H – глибина розробки, R_c – міцність масиву порід на стиск.

За своєю фізичною сутністю параметр $\gamma H / R_c$ найбільш точно відображає стан породного масиву в конкретних геомеханічних умовах, дозволяє класифікувати породний масив за ступенем його стійкості та рекомендується нормативними документами [7], як критерій оцінки умов ведення гірничих робіт.

Нами далі використовуватиметься величина зворотна показнику Ю.З. Заславського – комплексний показник умов розробки:

$$\theta = R_c k_c / \gamma H, \quad (3)$$

де міцність масиву приймається з урахуванням коефіцієнта структурного послаблення – k_c .

Розглянутий критерій (θ , K) поєднує в собі такі основні показники стану масиву порід, як його міцність – $R_c k_c$ і рівень напружень, що діють у ньому – γH .

За величиною показника умов розробки θ ступінь складності ведення гірничих робіт на шахтах ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» можна поділити на групи:

А. $\theta > 1$ – сприятливі умови проведення та підтримання виробок (шахти Тернівська, Самарська);

Б. $\theta < 1$ – несприятливі умови проведення та підтримання виробок (шахти Павлоградська, Дніпровська);

В. $\theta < 0,67$ – особливо складні умови проведення та підтримання виробок (шахти ім. Героїв космосу, Західнодонецька).

Для розглянутого гор. 370 м шахти імені Героїв космосу величина цього показника складала $\theta = 0,62$, що відносить умови експлуатації протяжних виробок до категорії особливо складних.

Зміна значень $R_c k_c$ і γH за останні 40 років, а також відмінність деяких параметрів технології проведення магістральних виробок, необхідно врахувати для оцінки ступеня інтенсифікації деформаційних процесів при веденні гірничо-прохідницьких робіт на шахті.

Актуальність досліджень визначається необхідністю подальшої підготовки до відпрацювання нових запасів та спорудження комплексу виробок у межах блоку вуглепродуктивної товщі, що інтенсивно відпрацьовується. Досить сказати, що шахту імені Героїв космосу було введено в експлуатацію у 1979 р. з проєктною потужністю 1,5 млн. тон вугілля на рік. Наразі шахта досягла рекордного рівня видобутку – понад 3 млн. тон на рік за розглянутий період. Видобуток вугілля ведеться одночасно 4-5 лавами на 2-3 горизонтах [8].

Врахування впливу зміни площі перерізу виробки на зміщення породного контуру.

Серед гірничотехнічних чинників останніми роками найбільшою мірою змінилася площа поперечного перерізу виробки. Площа перерізу магістральних виробок, які споруджувались у 1980-ті роки становила $S_{св} = 12,7 \text{ м}^2$. В даний час основним перетином капітальних гірничих виробок, що споруджуються. $S_{св} = 17,7 \text{ м}^2$.

У загальному випадку вплив площі поперечного перерізу виробки на зміщення порід оцінюють коефіцієнтом перерізу k_s , [9]. За цими рекомендаціями збільшення

площі поперечного перерізу капітальних виробок від $S_{св} = 12,7 \text{ м}^2$ до $S_{св} = 17,7 \text{ м}^2$ призведе до збільшення зміщень контуру на величину $k_s = 1,17$.

Г.Л. Фісенко [9] пропонує формулу для розрахунку:

$$k_s = 0,315\sqrt{S} . \quad (4)$$

Значення k_s , визначене за (4) становить $k_s = 1,18$. Для подальших розрахунків приймаємо $k_s = 1,175$.

3.1.1. Оцінка міцності масиву (Rk_c).

Основним параметром, що впливає на поведінку порід навколо виробок є їх міцність. Невідповідність засобів і способів кріплення та охорони гірничих виробок умовам їх роботи пов'язаний з тим, що традиційні методи визначення основних параметрів міцності породного масиву для конкретного регіону не в змозі повною мірою врахувати фактори, що визначають реальну гірничо-геологічну ситуацію.

Межа міцності порід на одновісний стиск визначається за стандартними методиками проведення випробувань. Міцність породного масиву відрізняється від міцності лабораторних зразків, що враховується запровадженням коефіцієнта структурного ослаблення. За результатами досліджень Глушка В.Т., Кіричанського Г.Г., Беззяна А.В., Фісенка Г.П. значення коефіцієнта k_c рекомендується приймати в межах 0,1-0,5 залежно від ступеня тріщинуватості масиву, орієнтації систем тріщин, міцності порід, що складають масив і т.д.

Також при проектуванні виробок коефіцієнт структурного ослаблення можна визначати за даними кількісного аналізу порушеності масиву порід у місцях проєктованого розташування виробок на підставі даних інженерно-геологічних вишукувань.

Для умов шахт Західного Донбасу значення коефіцієнта структурного ослаблення тріщинуватого масиву рекомендується приймати рівним для аргілітів 0,2, алевролітів 0,3.

Одним з важливих факторів, що впливає на стан виробок, є вологість, що істотно знижує характеристики міцності гірських порід навколо виробки. У вологонасиченому стані породи розпадаються за площинами напластування і знижують свої показники міцності в 4 і більше разів (втрачають до 80% міцності [10]).

У зв'язку з цим врахування різкого зниження міцності від вологості порід вимагає введення відповідних поправочних коефіцієнтів.

Як вважає автор [11], для визначення міцності порід у масиві з урахуванням їх структурного ослаблення, вологості та часу впливу навантаження, слід користуватися виразом:

$$R_c = R_c^a k_c k_{вл} k_{дл}, \quad \text{МПа}, \quad (5)$$

де R_c^a – міцність порід, визначена у лабораторних умовах на стандартних зразках, МПа; k_c – коефіцієнт структурного ослаблення порід; $k_{вл}$ – коефіцієнт впливу вологості на характеристики міцності порід; $k_{дл}$ – коефіцієнт тривалої міцності.

Оцінка гірничо-геологічних та геомеханічних умов шахт ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», виконана в рамках проведених протягом 2012...2016 років науково-дослідних робіт, дозволила систематизувати деякі кількісні та якісні показники, вплив яких у сукупності визначатиме подальший стан гірничих робіт, ефективність засобів та способів забезпечення стійкості комплексу підземних гірничих виробок. Поряд із зазначеними вище гірничо-геологічними особливостями регіону, що погіршують умови ведення робіт, технічними службами відзначаються фактори, вплив яких у міру експлуатації родовища та збільшення глибини робіт буде

все більш вагомим. До них слід віднести техногенну порушеність масиву порід, підвищення тектонічної порушеності, збільшення зон підвищеного гірського тиску.

Врахування перелічених вище факторів має проводитися шляхом запровадження відповідних коефіцієнтів, що зменшують міцність порід. Так, тектонічне порушення місця розташування виробки або ступінь тріщинуватості породи, що оцінюється коефіцієнтом k_{CH} [9], в залежності від типу порушення викликає зниження міцності порід – $k_{CH} = 0,3 \div 0,9$.

3.1.2. Оцінка рівня діючих напружень (γH)

Крім того, вплив цих же факторів – зон підвищеного гірничого тиску від очисних робіт, що проводяться в межах розглянутого горизонту, вплив відпрацювання лав на суміжних пластах вимагає введення відповідних коефіцієнтів концентрації до діючих на даній глибині геостатичних напружень.

Основний вплив на стан виробки надає опорний тиск, що виникає в результаті концентрації напружень у приконтурному просторі виробки. Цьому тиску протидіє не тільки кріплення і охоронні конструкції, але й опірність гірських порід, що оточують виробку, їх несуча здатність, що визначається міцнісними властивостями.

В умовах інтенсивної очисної виїмки доцільно вивчення та врахування техногенного поля напружень, що формується в результаті взаємного впливу кількох лав, що відпрацьовувались одночасно в умовах високої структурної неоднорідності та геологічної порушеності масиву.

В [12] встановлено, що значна неоднорідність природних полів напружень, що визначається особливостями тектонічної структури родовищ, ще більше посилюється при техногенному впливі на породний масив під час гірничих робіт.

При виборі параметрів систем розробки на Старобинському родовищі, наприклад, для обліку навантажень на кріплення виробок вводилися розрахункові коефіцієнти, значення яких були в діапазоні $1,13 \div 3,12$ [13].

Низка дослідників в оцінці стійкості виробок використовують коефіцієнт порізаності масиву. Під коефіцієнтом порізаності масиву K_{piz} розуміється [14] відносний обсяг виробок, що потрапляє в шар радіусом L_{min} з центром в аналізованому перерізі.

Порізаність масиву виробками істотно впливає на деформації приконтурного масиву порід. Так, наприклад, за даними [15], коефіцієнт порізаності масиву, визначений для однієї з виробок в умовах верхньокамського родовища $K_{piz} = 3,54$ рівносильний збільшенню глибини розташування одиночної виробки з 395 до 474 м. Це вдвічі збільшує швидкість вертикальної конвергенції приконтурних порід у порівнянні зі швидкістю зміщень одиночної виробки.

Важливим тут є те, що порізаність масиву виробками, а також вплив сусідніх виробок зі збільшенням часу експлуатації горизонту (ділянки) шахти, що відпрацьовується, тільки зростають.

3.1.3. Визначення коефіцієнта інтенсивності деформацій k_i в комплексному показнику умов розробки θ

З урахуванням зробленого вище аналізу та обґрунтувань щодо оцінки гірничо-геологічних та геотехнічних факторів при проектуванні гірничих робіт [16], показник умов розробки θ для шахт, що розглядаються, матиме нижчі значення, що відповідають ситуації на сучасному етапі експлуатації.

У [17] була отримана залежність зміщень контуру виробок від часу експлуатації виробки T і показника умов розробки θ :

$$U_i = 0,45k_{\mu}d(a \ln(T) - b)\theta^{(0,9-c)}, \text{ м}, \quad (7)$$

де a і b – коефіцієнти, що залежать від показника умов розробки θ ; c і d – змінні, що залежать від коефіцієнта бічного розпору λ ; k_u – коефіцієнт, що враховує напрямок виробки у відношенню до простягання порід і кут нахилу пластів.

Як було встановлено раніше, відношення зміщень підосви U_2 , для виробок, що проводяться на сучасному етапі до зміщень U_1 для виробок, які у 1970-80-х роках становить $U_2 / U_1 = 1,32$.

Вище було показано, що збільшення зміщень, пов'язане з підвищенням площі поперечного перерізу виробок, може бути оцінено коефіцієнтом перерізу $k_s = 1,175$. Таким чином, зміщення підосви U_2 для виробок с $S_2 = 17,7 \text{ м}^2$ повинні бути наведені за допомогою коефіцієнта перерізу k_s до рівня зміщень при перетині виробки $S_1 = 12,7 \text{ м}^2$.

$$\frac{U_2 / k_s}{U_1} = \frac{U_2}{U_1 k_s} = \frac{1,32}{1,175} = 1,123$$

Тоді відношення зміщень, що визначаються за формулою (8), після скорочень будуть приведені до простого співвідношення:

$$\frac{U_2 = f(\theta_2)}{U_1 = f(\theta_1)} = \frac{\theta_2^{(0,9-c)}}{\theta_1^{(0,9-c)}} = 1,123 \quad (8)$$

де $\theta_1 = \frac{R_c k_c}{\gamma H}$ – показник умов розробки на період 1970-80 рр.; $\theta_2 = \frac{R_c k_c}{\gamma H} k_u$ –

показник умов розробки для сучасного етапу, з урахуванням коефіцієнта інтенсивності деформацій k_i .

Відповідно до [18]:

$$c = -0,52 \lambda^2 + 1,5 \lambda + 0,2,$$

Оскільки для вугледобувного регіону Західного Донбасу $\lambda \approx 1,0$, значення $c = 1,18$.

Після рішення (8) отримаємо значення коефіцієнта інтенсивності деформацій $k_i = 0,66$, що враховує сучасний геотехнічний стан породного масиву – зниження міцності та збільшення напруженого стану порід через техногенну порушеність та сумарний вплив гірничих робіт на ділянку експлуатаційного горизонту. Тоді показник умов розробки для шахти імені Героїв космосу на сучасному етапі експлуатації дорівнюватиме. $\theta = 0,41$.

4. Висновки

Встановлено, що збільшення площі поперечного перерізу капітальних виробок на шахті імені Героїв космосу за останні 40 років від $S_{св} = 12,7 \text{ м}^2$ до $S_{св} = 17,7 \text{ м}^2$ викликало зростання зміщень породного контуру на величину $k_s = 1,175$, що необхідно враховувати при проектуванні конструкції кріплення, технології ведення гірничопрохідницьких робіт та засобів з охорони виробок.

Отримано значення коефіцієнта інтенсивності деформацій $k_i = 0,66$, що дозволило оцінити сучасний геотехнічний стан породного масиву – зниження його міцності та збільшення напруженого стану порід через техногенну порушеність та сумарний вплив очисних та гірничопідготовчих робіт на ділянку експлуатаційного горизонту.

Показано, що показник умов розробки шахти ім. Героїв космосу на сучасному етапі експлуатації дорівнює $\theta = 0,41$ (визначений без урахування коефіцієнта k_i

$\theta=0,62$), що підкреслює ступінь складності умов експлуатації комплексу очисних та підготовчих виробок та дозволяє більш обґрунтовано підійти до вибору ефективних рішень для забезпечення надійної та безпечної їх роботи, зниження обсягів ремонтних робіт протягом тривалого терміну їх експлуатації.

Література

1. Babets, D., Sdvyzhkova, O., Shashenko, O., Kravchenko, K., & Cabana, E.C. (2019). Implementation of probabilistic approach to rock mass strength estimation while excavating through fault zones. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 72-83. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.072>
2. Vygodin, M.A., & Yevtushenko, V.V. (1987). Pucheniye pochvy v vyrabotkakh shakht Zapadnogo Donbassa. *Ugol' Ukrainy*, (7), 12-13.
3. Vygodin, M.A., & Yevtushenko, V.V. (1989). Metody povysheniya ustoychivosti gornyykh vyrabotok na shakhtakh Zapadnogo Donbassa. *Shakhtnoye stroitel'stvo*, (5), 11-14.
4. Khalimendik, Yu.M., Chemakin, V.A., & Spitsyn, A.Yu. (1997). Sovershenstvovaniye krepey gornyykh vyrabotok v slabometamorfizirovannykh porodakh Zapadnogo Donbassa. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, (3), 96-98.
5. Usachenko, B.M. (1979). *Svoystva porod i ustoychivost' gornyykh vyrabotok*. K.: Nauk. dumka, 136 s.
6. Stytsin, V.I. (1972)/ *Izucheniye proyavleniy gornogo davleniya v osnovnykh gornyykh vyrabotkakh shakht Zapadnogo Donbassa s tsel'yu vybora ratsional'nykh parametrov krepey*. Dis...kand. tekhn. nauk. – Dnepropetrovsk, 143 s.
7. SNIP II-94-80. (1982). *Podzemnyye gornyye vyrabotki. Normy proyektirovaniya*. M.: Stroyizdat, 272 s.
8. Sdvyzhkova, O., Babets, D., Kravchenko, K., & Smirnov, A. (2015). Rock state assessment at initial stage of longwall mining in terms of poor rocks of Western Donbass. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 65-70. <https://doi.org/10.1201/b19901-13>
9. Reva, V.N., Mel'nikov, O.I., & Rayskiy, V.V. (1995). *Podderzhaniye gornyykh vyrabotok*. M.: Nedra, 270 s.
10. Pin'kovskiy, G.S., & Bezaz'yan, A.V. (1979). Opredeleniye prochnostnykh kharakteristik gornyykh porod pri yestestvennoy vlazhnosti. *Ugol' Ukrainy*, (8), 21-22.
11. Kim, D.N. (1963). Issledovaniye strukturnogo oslableniya treshchinovatykh porod modelirovaniyem prochnostnykh svoystv v laboratornykh usloviyakh. *Voprosy issledovaniya gornogo davleniya i sdvizheniya porod*, (5), 97-105.
12. Rasskazov, I.Yu., Kursakin, G.A., Anikin, P.A., Gulevich, A.M., & Potapchuk, G.M. (2005). Sostoyaniye i perspektivy resheniya problemy gornyykh udarov na rudnikakh Dal'nego Vostoka // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, (12), 433-444.
13. *Instruktsiya po primeneniyu sistem razrabotki na Starobinskom mestorozhdenii* (2010). – Soligorsk-Minsk, 152 s.
14. Prušak, V.Ja. (2015). Zakonomiernosti vzaimnogo vlijanija hornyykh vyrabotok na hlubokikh horizontakh Starobinskogo mestorozhdeniya kalijnykh soliej. *Viesci Nacyjanal'naj akademii navuk Bielarusi. Sieryja fizika-techničnykh navuk*, (4), 41-45.
15. Solov'yev, V.A., Aptukov, V.N., & Vaulina, I.B. (2017). Podderzhaniye vyrabotok v solyanykh porodakh // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, (2), 344-356.
16. Shashenko, A., Solodyankin, A., & Gapieiev, S. (2010). Bifurcation model of rock bottom heaving in mine workings. *New Techniques and Technologies in Mining*. London: CRC Press/Balkema, 71-76.
17. Shashenko, O.M., Solodyankin, O.V., & Martovyts'kyy, A.V. (2012). *Upravlinnya stiykisty protyazhnykh vyrobok hlybokyykh shakht*. D.: LizunovPres, 384 s.