

С. Г. Негрій
Т. О. Негрій
Р. М. Шепеленко
М. О. Качалов

ГЛИБИНА РОЗРОБКИ ЯК ЧИННИК УСКЛАДНЕННЯ УМОВ ВІДПРАЦЮВАННЯ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

Мета: розвиток наукового підходу щодо уточнення областей застосування технологій охорони гірничих виробок за глибиною ведення гірничих робіт.

Методика: Аналіз та узагальнення результатів науково-технічних досліджень щодо впливу природних явищ на процес видобутку вугілля. Графоаналітичне встановлення областей застосування та визначення критичних глибин для технологій охорони гірничих виробок.

Результати: Вивчено та узагальнено інформацію щодо впливу природних явищ на процес видобутку вугілля з переходом гірничих робіт на великі глибини. Доведена необхідність визначення критичних глибин, при перевищенні яких ускладнюються умови розробки вугільних пластів внаслідок негативних проявів природних явищ, що потребує внесення змін у технологію ведення гірничих робіт. Критичні глибини для різних умов, явищ та технологій різні. Для газонасичених пластів вони визначаються метанонасиченістю пластів, інтенсивністю видобутку та умовами провітрювання підземних виробок, для пластів, схильних до газодинамічних явищ – визначаються напружено-деформованим станом (НДС) та міцністю навіколишніх порід. Критична глибина при застосуванні технологій охорони виробок також залежить від НДС порід та їх міцності. Тому отримав розвиток науковий підхід щодо уточнення областей застосування технологій охорони гірничих виробок за глибиною ведення гірничих робіт. При цьому критичні глибини визначаються умовами міцності порід за відповідними критеріями. На основі критерію $H_{кр}/R_c$ запропоновано графоаналітичний метод визначення областей застосування та визначення критичних глибин для різних технологій охорони гірничих виробок.

Наукова новизна: розвинуто науковий підхід щодо уточнення областей застосування технологій охорони гірничих виробок за глибиною ведення гірничих робіт.

Практичне значення: запропонований підхід щодо уточнення областей застосування технологій охорони гірничих виробок на різних глибинах дозволяє спростити пошук ефективних інженерних рішень при плануванні гірничих робіт.

Ключові слова: велика глибина, складні умови, технологія ведення гірничих робіт, критична глибина, область застосування, критерій, графоаналітичний підхід.

Вступ.

Останнім часом погіршення впливу негативних природних явищ на процес видобутку вугілля пояснюється переходом гірничих робіт на великі глибини. Розглядаються геомеханічні, тектонічні та газодинамічні явищами, зростання температури гірського масиву та природного вмісту метану. З урахуванням впливу даних явищ на технологію ведення гірничих робіт здійснюється розробка та впровадження додаткових заходів щодо усунення цього впливу. Таким чином, під «великою глибиною» розуміється глибина, при якій негативні природні явища обмежують застосування загальноприйнятих технологій ведення гірничих робіт без додаткових заходів. Тобто існує критична (гранична) величина $H_{кр}$, при перевищенні якої глибина вважається великою.

У нормативному документі 1965 року [1] вказувалося, що глибокими для Донецького

басейну вважаються шахти з початковою глибиною розробки вище 600 м при пологому та похилому падінні пластів і 700 м – при крутому падінні. Але додається, що критична глибина може уточнюватися в залежності від проявів властивих до великих глибин явищ: підвищеного тиску, великого газовиділення, раптових викидів вугілля та газу, гірничих ударів, викидів породи, високої температури порід та ін. Тобто для різних гірничо-геологічних умов та технологій ведення робіт величина $H_{кр}$ неоднакова.

Оскільки, згідно керівного документу СОУ 10.1-00185790-002-2005, граничною глибиною розробки вугільних родовищ визначена величина 1600 м [2], то до великих глибин відноситься діапазон від $H_{кр}$ до 1600 м. і нижня межа цього діапазону для певних умов залишається невизначеною. Це вказує на необхідність визначення

критичних глибин для різних умов, явищ та технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У статті [3] вказується, що на глибині 600-1000 м при відпрацюванні пластів зростає гірський тиск, температура, газоносність, небезпека раптових викидів вугілля та газу, а також гірських ударів.

Підвищення температурних умов у гірничих виробках по відношенню до діючих у вугільній промисловості України норм починається на глибинах понад 500 м [4]. При цьому граничною глибиною є величина 600 м [1], при перевищенні якої є обов'язковим проведення контролю теплових умов у виробках в літній період року і, при необхідності, застосування заходів щодо нормалізації теплових умов.

Як показує досвід розробки вугільних пластів, їх схильність до викидів вугілля та газу, за певних умов, починає проявлятися вже з глибини 150 м, а критична глибина, на якій можлива поява викидів визначається з виразу [5]

$$H_{кр} = H + \varphi(P_{AB} - P_A), \quad (1)$$

де H – глибина розташування обстежуваної гірничої виробки, м; φ – емпіричний коефіцієнт, од.; P_{AB} – показник, який визначається за номограмою [5]; P_A – показник діючих сил. Розраховується за формулою

$$P_A = P_r + 0,1H, \quad (2)$$

де P_r – тиск газу, кгс/см².

$$H_{\min} = \sqrt{\frac{\rho v_0^2 E + \sigma_c^2}{\left[(k_1^2 + k_2^2 + k_3^2) - 2\mu(k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_1 k_3) - 1 - 2u - u^2 + 2u^3 / (1 - \mu) \right] \cdot \gamma^2}}, \quad (1)$$

де ρ – середня щільність вугілля та гірської маси, що викидаються після дроблення, т/м³; v_0 – середня початкова швидкість розбитого вугілля та гірської маси, м/с; E – модуль пружності вугілля, МПа; σ_c – міцність на одновісний стиск, МПа; k_1 , k_2 та k_3 – відношення відповідно, максимального, проміжного та мінімального головного напружень до вертикального напруження; u – повна енергія динамічної системи вугілля-порода, Дж; μ – коефіцієнт Пуассона.

У дослідженні [10] наводиться інший вираз, який має вигляд

Існує методика визначення критичної глибини за показником виходу летючих речовин V^{daf} [6], але вказується, що при $V^{daf} > 35\%$ пласти викидобезпечні. У керівному документі [7] дається уточнення, згідно якого, незалежно від глибини розробки та природної газоносності, пласти безпечні за викидами при показнику ступеня метаморфізму $M > 27,7$ (коли $V^{daf} > 39\%$). Хоча у статті [8] цьому дається спростування та вказується, що межа прояву викидів за комплексним показником ступеня метаморфізму вугілля $M = 27,7$ є помилковою, тому що викиди вугілля та газу відбуваються при значеннях $V^{daf} > 39\%$. Вказується, що методики прогнозу викидобезпеки допускають помилки 1-го роду, що призводить до аварій та травматизму. Пояснюється це тим, що при прогнозі не враховуються фізико-механічні властивості пласта, його напружено-деформований та газодинамічний стан.

На відміну від прогнозу викидобезпеки, при визначенні критичної глибини проявів ударнебезпеки враховується напружено-деформований стан вміщуючих порід та їх міцність.

З посиланням на джерело у роботі [9] вказується, що для шахт Китаю критичні глибини ударнебезпечності вугільних пластів для різних шахт знаходяться у діапазоні 200...540 м (середня глибина 380 м). Також запропоновано вираз щодо визначення критичної глибини проявів ударнебезпеки пластів, який має вигляд [9]

$$H = \frac{I_c^1 \sigma_c}{k\gamma}, \quad (2)$$

де k – критичне значення коефіцієнту концентрації напружень; I_c^1 – індекс ризику удару, од.

Також критична глибина підземних робіт, де будуть можливі гірські удари визначається виразом [11]

$$H_{кр} = \frac{620 + 8\sigma_c}{k\gamma}. \quad (3)$$

Тектонічні явища складно пов'язати з глибиною робіт, оскільки порушеність масиву хаотична в межах родовища та за

глибиною. Але разом глибина робіт та тектонічна порушеність формують у гірському масиві напружено-деформований стан, який негативно впливає на технологічні процеси гірничих робіт. Також з тектонічною порушеністю пов'язують і розподіл метанових покладів [12].

Розподіл метану у межах Донецького басейну дуже нерівномірний, що підтверджено варіацією глибини залягання поверхні метанової зони, а також даними щодо газового режиму шахт [13]. Це пов'язують з особливостями геологічного розвитку басейну, глибиною залягання вугленосних відкладів, тектонічною будовою, літолого-фаціальним складом вміщуючих порід та умовами циркуляції підземних вод.

Для вугленосних районів Донбасу верхня межа метанової зони змінюється від 80 до 500 м і навіть в межах одного шахтного поля вона може бути різною. Ця межа не є критичною глибиною, при перевищенні якої ускладнюються умови ведення гірничих робіт. Важливими є зміна метаносності пластів та порід, інтенсивність видобутку та умови провітрювання підземного простору. За їх параметрами може бути визначена глибина, при якій обмежуються гірничі робіт за газовим фактором.

До техногенних явищ відноситься неконтрольоване затоплення вироблених просторів та гірничих виробок, при якому ускладнюється відпрацювання запасів вугілля на сусідніх ділянках. Наприклад, наприкінці 2019 р. рівень затоплення шахт Горлівсько-Єнакієвської групи досяг глибини 250–300 м [14]. Це значно ускладнило роботу діючих шахт «Центральна» та «Торецька», які працюють в умовах ризику небезпечних проривів води.

Глибина робіт має значний вплив на стан гірничих виробок. Зі збільшенням глибини інтенсивно зростає гірський тиск, що ускладнює умови підтримання виробок та супроводжується втратою їх експлуатаційного та безпечного стану.

В умовах глибоких шахт Китаю 85 % аварій відбувається в гірничих виробках і в основному вони обумовлені обваленнями порід покрівлі [15]. Також поглиблення робіт призводить до значних деформацій порід на контурі виробок, що спричиняє труднощі підземного транспортування та

підвищення вентиляційного опору, що вимагає значних трудових і матеріальних ресурсів для ремонту виробок. Тому деякі виробки, особливо в умовах слабких навколишніх порід, ремонтуються кожні один-два місяці [16], здебільшого внаслідок інтенсивного видавлювання порід підосви.

Якщо для шахт Китаю мова йдеться про глибини близько 1000 м [15, 16, 17], то для деяких шахт Донецького басейну (Україна) критична глибина складає близько 400 м, при перевищенні якої виробки знаходяться у незадовільному стані та потребують ремонту [18-21]. Тому необхідне застосування ефективних технологій охорони гірничих виробок [22], які відповідають певним глибинам розробки.

У дослідженнях С.М. Гапеева обґрунтована величина «критичної глибини» ведення гірничих робіт H^* , при перевищенні якої глибини вважаються великими. Вираз для визначення критичної глибини має вигляд [23]

$$H^* = \frac{2\bar{R}_c \bar{k}_c \bar{k}_w}{\gamma} \left[\frac{\left(1 + \bar{\varepsilon}_v^{-0.4}\right)^2 \ln\left(1 + \bar{\varepsilon}_v^{-0.4}\right)}{\left(1 + \bar{\varepsilon}_v^{-0.4}\right)^2 - 1} \right]^2, \quad (4)$$

де $\bar{R}_c$ – усереднена межа міцності порід на одновісний стиск; $\bar{k}_c$ – усереднений коефіцієнт структурно-механічного послаблення; $\bar{k}_w$ – усереднений коефіцієнт обводненості гірських порід; γ – об'ємна вага гірських порід; $\bar{\varepsilon}_v$ – середня величина об'ємного розпушення гірських порід.

У даному виразі враховуються окремі фізико-механічні властивості гірських порід та насиченість останніх водою. Цей вираз є вихідним з критерію стійкості оголень порід, за яким визначається категорія порід за стійкістю та встановлюється комплекс заходів щодо забезпечення експлуатаційного та безпечного стану оголень навколо гірничих виробок. Існує велика кількість модифікацій даного критерію, кожна з яких відноситься до певних умов для вирішення окремої науково-практичної задачі.

Для оцінки стійкості оголень порід покрівлі та здимування порід підосви у виробці широко використовується критерій Заславського Ю.З. $\gamma H / R_c$, який пов'язує напружений стан масиву γH , та міцність оточуючих порід R_c [24, 25].

За цим критерієм діапазон гірничо-геологічних умов поділяється на три області (рис. 1) [26]: породне оголення не руйнується (*I*); по контуру виробки

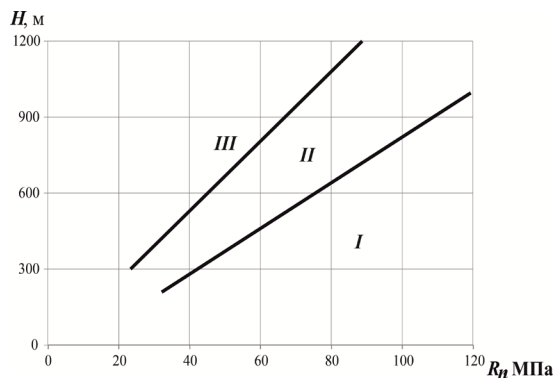


Рис. 1. Області різних схем проявів гірського тиску у виробках, що проводяться комбайном [26]

виникають локальні області руйнування (*II*); навколо виробки через деякий час утворюється суцільна зона непружних деформацій (*III*). Тобто для різних умов різна критична глибина робіт.

В роботах [27, 28] розглядається комплексний показник умов розробки, що є величиною зворотною показнику Ю.З. Заславського та враховує коефіцієнт структурного ослаблення масиву (k_c)

$$\theta = \frac{R_c k_c}{\gamma H} \quad (5)$$

Для порід, які схильні до руйнування та в'язко-пластичного плину, приймають критерій [29, 30]

$$\gamma H k_\sigma \leq k_s R_c, \quad (6)$$

де γ – питома вага порід, що вміщують виробку, МН/м³; H – глибина залягання виробки, м; k_σ – коефіцієнт концентрації напружень; R_c – міцність порід на одновісний стиск, МПа; k_s – коефіцієнт, який враховує пластичність і кут внутрішнього тертя порід (для крихких порід $k_s = 1$).

Для умов шахт Донбасу Кошелевим К.В. запропоновано критерій стійкості K_y , який визначається виразом [31]

$$K_y = \frac{\gamma H}{f_T m R_c}, \quad (7)$$

де f_T – коефіцієнт тектонічної характеристики досліджуваної ділянки породного масиву, що враховує будову та тріщинуватість порід; m – коефіцієнт стійкості порід, що залежить від обводнення порід і терміну служби виробки.

У роботі [32] стійкість виробки визначається виходячи з умови міцності вміщуючих її порід

$$\frac{\gamma H}{R_c} \cdot \frac{k_3 k_2}{\eta \xi} < 1, \quad (8)$$

де k_3 – коефіцієнт зміни напружень в результаті впливу інших виробок; k_2 – коефіцієнт концентрації напружень в результаті проведення даної виробки; η – коефіцієнт структурного ослаблення порід; ξ – коефіцієнт тривалої міцності.

Для порід підосви застосовується критерій H_p/R_c [33], який враховує співвідношення глибини розташування виробки H_p і міцності порід R_c , за яким визначається схильність порід до здимання та рекомендуються заходи боротьби з цим явищем при різних способах підготовки довгих стовпів. Також за значенням даного критерію визначаються умови застосування жорстких засобів охорони [34].

Шашенко О.М. і Солодянкін О.В. в якості критерію здимання запропонували критичні зміщення порід підосви [28], а Белаєнко Ф.О. і Глушко В.Т. [35] для визначення переходу порід у категорію таких, що здимаються, в якості критерію запропонували глибину робіт, яка визначається виразом

$$H = 1,13 \frac{\sigma_s}{\xi \gamma}, \quad (9)$$

де σ_s – межа пластичності породи; ξ – коефіцієнт бічного розпору; γ – середньозважена об'ємна вага порід, які залягають вище.

Таким чином, для визначення стійкості породних оголень на контурі виробок використовуються різні критерії, які враховують напружено-деформований стан на глибині розташування виробки, міцність порід, а також різні ускладнюючі гірничо-геологічні та гірничотехнічні фактори. Знаючи значення будь-якого з наведених критеріїв для певних умов можна визначити критичну глибину, при якій оголення переходять з одного стану в інший. Ця ж глибина може бути обмежуючим фактором для певних технологій охорони виробок.

Але рекомендацій щодо застосування технологій охорони гірничих виробок на різних глибинах немає, що дещо ускладнює пошук рішень при плануванні гірничих робіт. Тому є необхідність в уточненні області їх застосування відносно величини заглиблення гірничих робіт.

Мета дослідження.

Метою статті є розвиток наукового підходу щодо уточнення областей застосування технологій охорони гірничих виробок за глибиною ведення гірничих робіт для спрощення пошуку ефективних інженерних рішень при плануванні гірничих робіт.

Методика дослідження.

Аналіз результатів науково-технічних досліджень щодо забезпечення ефективного та безпечного видобутку вугілля зі збільшенням глибини робіт. Вивчення та узагальнення інформації щодо впливу природних явищ на процес видобутку вугілля з переходом гірничих робіт на великі глибини. Графоаналітичне встановлення областей застосування та визначення критичних глибин для різних технологій охорони гірничих виробок.

Виклад основного матеріалу.

Технології охорони гірничих виробок щодо забезпечення їх експлуатаційного стану регламентуються різними нормативними документами та представлені у вигляді типових технологічних схем для кріплення цих ділянок. Але в даних документах чітко не регламентуються охоронні конструкції, які були б кращі у тих чи інших умовах. Також відсутня їх прив'язка до глибини розташування.

Для визначення критичних глибин застосування технологій охорони можна скористатися існуючими критеріями стійкості порід та рекомендаціями щодо застосування відповідних технологій у певних умовах.

В умовах слабких порід підосви для виробок, що погашаються позаду лави при $H_p/R_c=20-25$ рекомендується зміцнення порід підосви анкерами (якщо глинисті пластичні породи має застосовуватись камуфлетне підривання або замкнуті кріплення), при $H_p/R_c=25-30$ – зміцнення підосви нагнітанням скріплюючих сумішей а при $H_p/R_c=30-35$ – розвантаження масиву свердловинами [33]. Графічне відображення даного критерію для різних заходів з прив'язкою їх до умов діючих вугільних шахт дозволяє визначити для них зону здимання порід підосви та окреслити межі застосування відповідних заходів (рис. 2а).

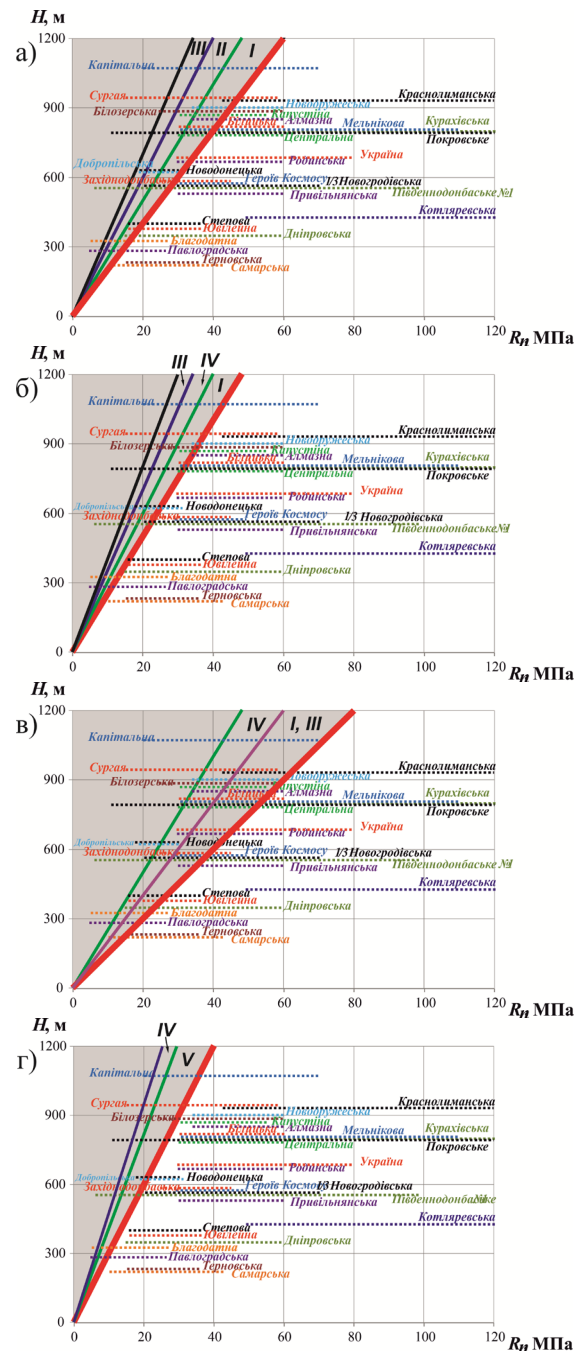


Рис. 2. Діаграма визначення області здимання порід підосви у підготовчих виробках (а) та меж застосування різних засобів щодо запобігання здимання підосви (I – зміцнення підосви анкерами, II – зміцнення підосви скріплюючими сумішами; III – розвантаження масиву свердловинами, IV – камуфлетне підривання зі зміцненням порід в'язучими) при різній глибині розташування виробок H та міцності порід підосви R_n для виробок, що погашаються позаду лави (а), проводяться вприсічку до виробленого простору (б), використовуються повторно (в) або проводяться за лавою (г)

З рисунку 1 випливає, що для виробок, які погашаються позаду лави, критична глибина робіт щодо підтримання виробок зі стійкими підосвами визначається червоною лінією у залежності від міцності порід підосви. Аналогічним чином визначається зона здимування порід підосви за межі заходів для виробок, що проводяться вприсічку до виробленого простору (рис. 2б), зберігаються для повторного використання (2в) та проводяться за лавою (рис. 2г).

Таким чином, згідно рисунку 1 можна зробити висновок, що критична глибина буде різною для однакових умов, але різних способів охорони підготовчих виробок за умови запобігання здимування порід підосви. Наприклад, для порід підосви з міцністю на одновісний стиск 30 МПа критична глибина змінюється у широкому діапазоні від 450 до 900 м (рис. 3), що вказує на суттєве значення правильності вибору доцільного варіанту способу охорони виробки, а заходи щодо запобігання видавлюванню порід підосви мають другорядне значення. Тобто за таких умов при повторному використанні виробок великими є глибини понад 450 м, а при проведенні їх позаду лави – понад 900 м.

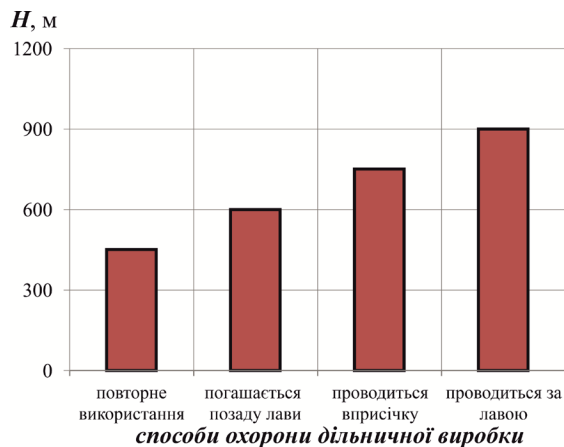


Рис. 3. Діаграма зміни критичної глибини для різних способів охорони підготовчих виробок при умові забезпечення стійкості порід підосви без додаткових заходів при $R_c = 30$ МПа

Для слабких порід підосви при підтриманні виробок позаду лави має значення жорсткість охоронної конструкції. Жорстка охоронна споруда перешкоджає опусканню та розшаруванню порід покрівлі [36], а піддатлива - призводить до великих прогинів і опускань породних шарів, їх руйнування й обвалення. Тобто, чим

жорсткіше охоронна споруда, тим стійкіше нависаючі породи покрівлі та краще стан виробки, що охороняється. Але в умовах слабких порід підосви наявність жорстких засобів охорони призводить до сильного здимування порід підосви, а піддатливих – уповільнює цей процес. Тому областю застосування жорстких охоронних споруд є міцні підстилаючі породи та відносно невелика глибина робіт. Це проілюстровано на рисунку 4, де визначається зона ефективного застосування жорстких засобів охорони.

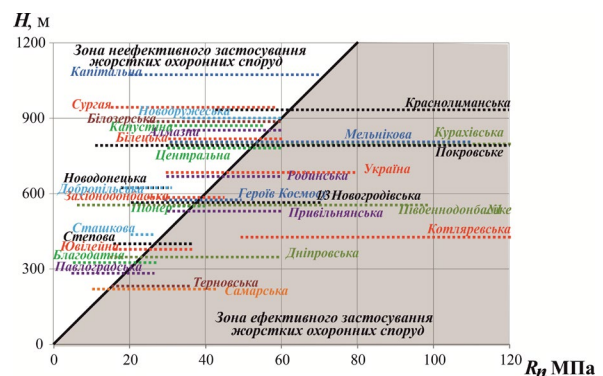


Рис. 4. Діаграма визначення зони ефективного застосування жорстких засобів охорони [37]

Межа даної зони визначалася за критерієм H_p/R_c , який, згідно [34] не має перевищувати 15. Тобто критична глибина застосування жорстких засобів охорони визначається міцністю підстилаючих порід. На рисунку 4 показана зона ефективного застосування жорстких споруд з врахуванням міцності порід підосви на одновісний стиск у domeжному стані. Що не зовсім відповідає дійсності, оскільки місце спорудження засобів охорони припадає на зону зруйнованих порід (рис. 5), яка вже повністю або частково сформувалась на момент підтримання виробки в зоні впливу очисних робіт. Тоді опір приконтурних порід визначається залишковою міцністю порід $R_{зал.}$, яка характеризує можливість порід зберігати вантажонесучу здатність в певному об'ємі як конструкції [38].

З боку засобу охорони на підстилаючі породи діє навантаження з напруженнями $k'\gamma H$. Для забезпечення стійкості порід під засобом охорони необхідне виконання умови $R_{зал.} \geq k'\gamma H$ або $R_{зал.}/k'\gamma H \geq 1$. Це відношення можна вважати критерієм

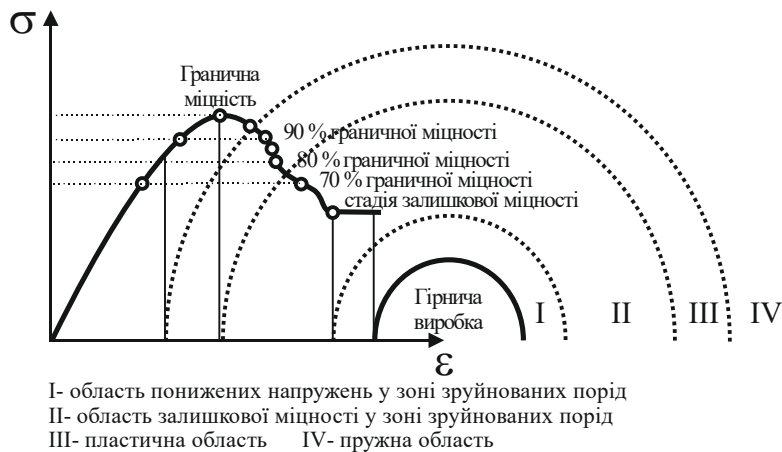


Рис. 5. Співвідношення між навколишніми породами в порушеній зоні з повною кривою напруження-деформації [39]

стійкості порід підшви під засобом охорони k_{cm} , який визначається за формулою [38]

$$k_{cm} = \frac{R_{зал.}}{k' \gamma H}, \quad (10)$$

де k' – коефіцієнт концентрації напружень на контакт засобу охорони та порід підшви ($k' = 1,0 \dots 1,3$) [40]; $R_{зал.}$ – залишкова міцність порід підшви, МПа. Визначається виразом [38]

$$R_{зал.} = [0,47 - 0,1 \ln \sigma_{cm}] \sigma_{cm} k_c k_w k_t. \quad (11)$$

де σ_{cm} – межа міцності порід підшви у зразку на одновісний стиск, МПа; k_c – коефіцієнт структурного послаблення; k_w – коефіцієнт, що враховує знеміцнення обводнених порід у результаті фільтрації по масиву води; k_t – коефіцієнт, що враховує зменшення опору породи одновісному стиску при тривалому навантаженні.

Якщо $k_{cm} \geq 1$, то підстилаючі породи будуть зберігати стійкість, а при $k_{cm} < 1$ – вдавлуватись під охоронною спорудою, тобто умова їх стійкості буде мати вигляд [38]

$$[0,47 - 0,1 \ln \sigma_{cm}] \sigma_{cm} k_c k_w k_t \geq k' \gamma H. \quad (12)$$

У тому випадку, коли умова (12) не виконується, мають місце просідання засобу.

Умовою стійкості геотехнічної системи «засіб охорони-бічні породи» буде забезпечення рівноваги між діючими напруженнями з боку порід покрівлі $k \gamma H$ (МПа), несучою здатністю засобу охорони $P_{охор.}$ (МПа) і опором підстилаючих порід $R_{зал.}$. Для цього має виконуватись умова [38]

$$\min(P_{охор.}; R_{зал.}) \geq k \gamma H. \quad (13)$$

Тоді критична глибина для застосування засобів охорони може визначатися виразом

$$H_{кр} = \frac{\min(P_{охор.}; R_{зал.})}{k \gamma}. \quad (14)$$

Що стосується визначення стійкості порід покрівлі та боків виробки, то більш універсальним є критерій $\gamma H / R_c$. На цьому критерії ґрунтуються рекомендації багатьох технологій охорони гірничих виробок. Наприклад, при $\gamma H / R_c < 0,2$ рекомендуються огорожувальні запобіжні кріплення; при $0,2 \leq \gamma H / R_c < 0,35$ – огорожувальні та несучі кріплення з несучою здатністю до 80 кПа (набризкбетон, анкерне та металеве аркове кріплення); при $0,35 \leq \gamma H / R_c < 0,5$ – піддатливі кріплення з несучою здатністю до 150 кПа (металоаркові та залізобетонні) з піддатливістю до 0,3 м; при $\gamma H / R_c \geq 0,5$ – піддатливі кріплення з несучою здатністю до 250 кПа (металоаркові, збірні залізобетонні, двошарові), що забезпечують піддатливість до 0,5 м [26]. Для цих умов також можна визначити зони застосування даних технологій та критичні глибини.

Тоді критична глибина підтримання виробок в умовах стійких порід визначається виразом

$$H_{кр} = \frac{0,2 R_c}{\gamma}. \quad (15)$$

За значеннями критерію $\gamma H / R_c$ можна дати характеристику породам, що вміщують гірничі виробки, на прикладі діючих шахт перспективних районів Донбасу [37] (табл. 1). Глибини розробки цих шахт змінюються від 225 до 1090 м, а міцності бічних порід змінюються від 5 до 216 МПа. Поділимо бічні породи на чотири

Таблиця 1. Визначення значень критерію стійкості порід на контурах гірничих виробок, що підтримуються в умовах діючих шахт

Назва шахти	Назва вугленосного району	Глибина робіт (критична глибина), м	Діапазон зміни міцності бічних порід на стиск, МПа	Значення критерію стійкості $\gamma H/R_c$ (характеристика) порід, од.
1	2	3	4	5
ім. Героїв Космосу	Лозовський та Павлоградсько-Петропавлівський	580 (255÷425)	30,0÷50,0	0,46÷0,27 (від нестійкого до середньостійкого; схильні до зриву)
«Благодатна»		325 (41÷212)	5,0÷26,0	1,53÷0,29 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні до зриву)
«Павлоградська»		280 (40÷204)	5,0÷25,5	1,35÷0,26 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні до зриву)
«Західнодонбаська»		585 (204÷367)	25,0÷45,0	0,59÷0,32 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні до зриву)
«Самарська»		250 (85÷357)	10,0÷42,0	0,59÷0,14 (від дуже нестійкого до стійкого; схильні та нестійкі до зриву)
«Дніпровська»		340 (121÷485)	15,0÷60,0	0,53÷0,13 (від дуже нестійкого до стійкого; схильні та нестійкі до зриву)
«Степова»		383 (120÷296)	15,0÷37,0	0,62÷0,25 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні до зриву)
«Ювілейна»		370 (123÷287)	15,0÷35,0	0,59÷0,25 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні до зриву)
«Терновська»		258 (124÷306)	15,0÷37,0	0,42÷0,17 (від дуже нестійкого до стійкого; схильні та нестійкі до зриву)
«Новодонецька»	Покровський	620 (146÷231)	18,1÷28,6	0,84÷0,53 (дуже нестійкі; схильні до зриву)
«Родинська»		650 (238÷476)	30,0÷60,0	0,51÷0,26 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні до зриву)
«Білозерська»		897 (211÷506)	25,0÷60,0	0,84÷0,35 (від дуже нестійкого до нестійкого; схильні до зриву)
«Добропільська»		620 (168÷254)	20,0÷30,0	0,74÷0,49 (від дуже нестійкого до нестійкого; схильні до зриву)
«Білецька»		829 (243÷485)	30,0÷60,0	0,51÷0,26 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні до зриву)
«Алмазна»		850 (287÷492)	35,0÷60,0	0,58÷0,34 (від дуже нестійкого до нестійкого; схильні до зриву)
«Краснолиманська»		937 (344÷964)	43÷120,5	0,52÷0,19 (від дуже нестійкого до стійкого; схильні та нестійкі до зриву)
«Центральна»		760 (243÷485)	30,0÷60,0	0,51÷0,26 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні до зриву)
«Капітальна»		1090 (161÷564)	20,0÷70,0	1,38÷0,38 (від дуже нестійкого до нестійкого; схильні до зриву)
«1/3 Новогродівська»		570 (164÷574)	20,0÷70,0	0,67÷0,19 (від дуже нестійкого до стійкого; схильні та нестійкі до зриву)
«Котляревська»		430 (400÷960)	50,0÷120	0,21÷0,09 (від середньостійкого до стійкого; не схильні до зриву)

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
«Україна»	Покровський	675 (244÷651)	30,0÷80,0	0,54÷0,20 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні та несхильні до здимання)
«Шахтоуправління «Покровське»		780 (107÷1778)	13,0÷216	1,41÷0,09 (від дуже нестійкого до стійкого; схильні та несхильні до здимання)
«Шахтоуправління «Південно-донбаське №1»	Південно-Донбаський	567 (46÷834)	5,5÷99,7	2,55÷0,14 (від дуже нестійкого до стійкого; схильні та несхильні до здимання)
ім. М.С. Сургая		940 (114÷499)	13,7÷60,0	1,62÷0,37 (від дуже нестійкого до нестійкого; схильні до здимання)
ім. Г.Г. Капустіна	Лисичанський	860 (244÷447)	30,0÷55,0	0,70÷0,38 (від дуже нестійкого до нестійкого; схильні до здимання)
ім. Д.Ф. Мельникова		820 (238÷873)	30,0÷110	0,67÷0,18 (від дуже нестійкого до стійкого; схильні та несхильні до здимання)
«Привільнянська»		540 (243÷485)	30,0÷60,0	0,43÷0,22 (від дуже нестійкого до середньостійкого; схильні та несхильні до здимання)
«Новодружеська»		900 (284÷487)	35,0÷60,0	0,63÷0,37 (від дуже нестійкого до нестійкого; схильні до здимання)

категорії, згідно з [28], де розглядається показник θ , але за значенням критерію $\gamma H/R_c$, який дорівнює θ^I : стійкі ($<0,2$), середньостійкі ($0,2\div0,33$), нестійкі ($0,33\div0,5$) та дуже нестійкі ($>0,5$). Для порід підосви приймемо дві категорії: не схильні та схильні до здимання (відповідно, $\leq 0,25$ та $>0,25$).

З таблиці 1 випливає, що стійкість оголень порід змінюється на однаковій глибині. За значеннями критерію, бічні породи змінюються від дуже нестійких до стійких, але для більшості шахт вони відносяться до категорій від дуже нестійких до середньостійких (для порід покрівлі), а породи підосви – у більшості випадків схильні до здимання. Для даних умов з виразу (15) було визначено критичну глибину, нижче якої породи знаходяться поза зоною стійких оголень (табл. 1).

Для більшості шахт максимальна глибина ведення робіт перевищила 600 м і згідно [1] вони можуть бути віднесені до глибоких. Для багатьох шахт переліку (табл. 1), особливо шахт Лозовського та Павлоградсько-Петропавлівського вугленосного районів, досягнута глибина робіт перевищила критичну, тому за станом оголення порід на контурах виробок є

нестійкими та дуже нестійкими. Для шахт «Самарська», «Дніпровська» та «Терновська» на певних ділянках шахтних полів зберігається стійкість порід, оскільки критична глибина ще не досягнута. Тим не менш, для даного району, згідно [1] шахти не є глибокими. Але, за досвідом роботи даних шахт, умови підтримання гірничих виробок є вельми складними. Більшість шахт Покровського, Південнодонбаського та Лисичанського вугленосних районів перейшли на глибину, що перевищує критичні значення, в тому числі глибину 600 м, тому бічні породи відносяться до нестійких та дуже нестійких. Тобто для певних умов глибокими можна вважати шахти з глибиною розробки від 960 м (для шахт «Краснолиманська» та «Котляревська») та близько 490 м (для шахт «Привільнянська», «Центральна», «Алмазна», ім. М.С. Сургая, «Білицька» та «Дніпровська»).

За результатами даних розрахунків можна визначити межу зони стійких порід (рис. 6) та критерій для визначення критичної глибини робіт, при перевищенні якої породи втрачають свою стійкість. Таким критерієм для українських вугільних шахт є $H_{кр}/R_c=8,14$ (рис. 6). При $H_{кр}/R_c<8,14$ породне оголення на контурі виробки не

руйнується і знаходиться у стійкому стані весь термін служби. При цьому допускаються зміщення порід, що не перевищують 50 мм, що можуть супроводжуватися незначними вивалами. Тоді основне кріплення у виробі виконує ізолюючу функцію для запобігання цим вивалам.

Аналогічним чином можна отримати критичну глибину для гірничих виробок, які закріплюються звичайним металоарковим кріпленням з піддатливістю до 300 мм. Оскільки для таких кріплень критерій стійкості $0,2 < \gamma H/R_c < 0,5$ [26], то межа зони застосування таких кріплень (критична глибина) визначається критерієм $H_{кр}/R_c = 20,4$ (рис. 6).

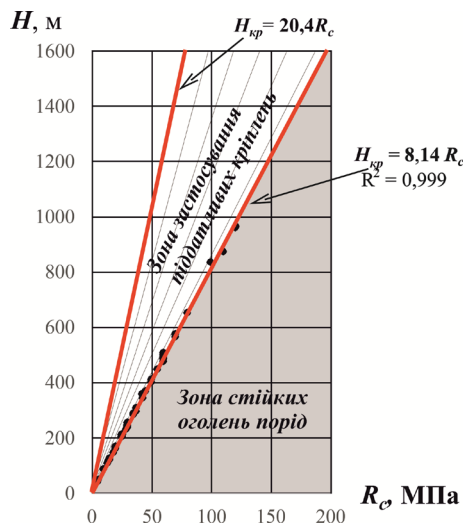


Рис. 6. Діаграма визначення зони стійких оголень порід та критичної глибини втрати їх стійкості

Подібним чином можна визначити області застосування інших технологій охорони виробок, використовуючи відомі та запропоновані у роботі критерії стійкості порід для відповідних заходів. Такий підхід дещо спрощує пошук інженерних рішень при плануванні гірничих робіт.

Висновки.

Узагальнено інформацію щодо впливу природних явищ на процес видобутку вугілля з переходом гірничих робіт на великі глибини. Для різних вугільних шахт перехід на великі глибини (перевищення критичних глибин) означає ускладнення умов розробки пластів внаслідок негативних проявів

природних явищ, що супроводжується змінами у технології ведення гірничих робіт.

При характеристиці умов розробки вугільних пластів необхідно більш акуратно використовувати термін «глибокі шахти», щоб уникнути плутанини та помилок при проектуванні технологічних ланок шахти та плануванні гірничих робіт. Критичні глибини для різних умов, явищ та технологій будуть різними. Для пластів, схильних до газодинамічних явищ, критичні глибини визначаються напружено-деформованим станом порід та їх міцністю, для газонасичених пластів – метаносистістю пластів, інтенсивністю видобутку та умовами провітрювання підземних виробок.

За результатами проведеного дослідження отримав розвиток науковий підхід щодо уточнення областей застосування технологій охорони гірничих виробок за глибиною ведення гірничих робіт, коли критичні глибини визначаються умовами міцності порід за відповідними критеріями. Зокрема, на основі критерію $H_{кр}/R_c$ запропоновано графоаналітичний метод визначення областей застосування та визначення критичних глибин для різних технологій охорони гірничих виробок.

Вдячність.

Дослідження проведено в рамках науково-дослідної роботи «Удосконалення способів підвищення стійкості гірничих виробок в умовах глибоких шахт» (державна реєстрація 0117U004316).

Список літератури

1. Временные положения по разработке проектов новых и реконструкции действующих угольных шахт Донецкого бассейна на глубоких горизонтах. Центргипрошахт. Москва, 1965. 37 с.
2. СОУ 10.1-00185790-002-2005. Правила технічної експлуатації вугільних шахт. Мінвуглепром України. Київ, 2006. 450 с.
3. Медяник В.Ю., Медяник Ю.А. Эффективность от применения комбинированной системы разработки пологих угольных пластов на больших глубинах. *Школа підземної розробки*. 2010. С. 296-310.
4. Малеев Н.В., Мартынов А.А., Яковенко А.К. Компьютерная технология прогнозирования и разработки мер по улучшению тепловых условий на выемочных участках глубоких шахт. *Школа підземної розробки*. 2010. С. 103-113.
5. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа. Недра. Москва, 1977. 159 с.

6. Забига́йло В.Е., Николин В.И. Влияние катагенеза горных пород и метаморфизма углей на их выбороопасность. Київ: Наукова думка, 1990. 168 с.
7. СОУ 10.1.00174088.011-2005. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. Мінвуглепром України. Київ, 2005. 221 с.
8. Анциферов А.В., Туманов В.В., Радченко А.Г., Киселёв Н.Н., Ашихмин В.Д., Радченко А.А. Современные рабочие гипотезы формирования и проявления выбороопасности угольных пластов Донбасса. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2013. № 13 (1). С. 136-152.
9. Rong H., Yu S., Zhang H., Liang B. Quantitative Calculation of Critical Depth in Typical Rockburst Mine. *Advances in Civil Engineering*. Volume 2020. Article ID 7968160, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/7968160>
10. Wen J., Li H., Jiang F., Yu Z., Ma H. and Shu C. Research on Critical Depth of Rock Burst in Coal Mines in China. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. 570. 042056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/570/4/042056>
11. Порцевский А.К. Выбор рациональной технологии добычи руд. Геомеханическая оценка состояния недр. Использование подземного пространства. Геоэкология. Москва: МГУ, 2003. 767 с.
12. Privalov V. A., Sachsenhofer R. F., Panova E. A., Antsiferov V. A. Tectonic factors affecting coal bed methane distribution in the Donets basin. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2011. № 9 (2). С. 469–479.
13. Плужнікова В.Л., Вергельська Н.В. Структурно-тектонічний фактор формування газоносності вуглепородних масивів Донбасу. *Мінеральні ресурси України*. 2015. №4. С. 22-25.
14. Улицький О.А., Бойко К.Є. Прогноз підтоплення територій ліквідованих вугільних шахт України за даними ДЗЗ. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2021. 8 (1). С. 18–25.
15. Wang Q., Jiang Z., Jiang B., Gao H., Huang Y., Zhang P. Research on an automatic roadway formation method in deep mining areas by roof cutting with high-strength bolt-grouting, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020. Volume 128. 104264. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104264>.
16. Chang J., Li D., Xie T., Shi W., He K. Deformation and Failure Characteristics and Control Technology of Roadway Surrounding Rock in Deep Coal Mines. *Geofluids*. Volume 2020. Article ID 8834347, 15pages. <https://doi.org/10.1155/2020/8834347>.
17. Kang H. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2014. 1(3). P. 261–277. <https://doi.org/10.1007/s40789-014-0043-0>.
18. Nehrii S., Sakhno S., Sakhno I., Nehrii T. Analyzing kinetics of deformation of boundary rocks of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Volume 12 (4). P. 115-123. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.115>.
19. Негрій С.Г., Живогляд С.К., Негрій Т.О. Спостереження за станом виробок при суцільній системі розробки. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2019. №2 (45). С. 16-27. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-2-16-27>.
20. Халимендик Ю.М., Бруй А.В., Барышников А.С. Поддержание штрека канатными анкерами в условиях слабых боковых пород. *Геотехнічна механіка*. 2013. № 110. С. 190-203.
21. Слащев И.Н. Шахтные исследования устойчивости систем поддержания штреков в условиях легкообрушаемых пород Западного Донбасса. *Геотехнічна механіка*. 2012. № 97. С. 177-185.
22. Негрій С. Г. Вдосконалення методики вибору технологій охорони підготовчих виробок. *Технічна інженерія*. 2021. № 1(87). С. 155-162. [https://doi.org/10.26642/ten-2021-1\(87\)-155-162](https://doi.org/10.26642/ten-2021-1(87)-155-162).
23. Гапеев С.М. Моделирование и прогноз геомеханических процессов у виробках глубоких шахт: автореф. дис. ...докт. техн. наук: 05.15.09. НГУ, Дніпропетровськ, 2014. 35с.
24. Заславский Ю.З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках шахт Донецкого бассейна. Харьков: Недра, 1966. 180 с.
25. Заславский Ю.З., Дружко Е.Б. Новые виды крепи горных выработок. Москва: Недра, 1989. 256 с.
26. Руководство по выбору крепи для выработок, проводимых комбайнами. ЦБНТИ. Донецк, 1979. 35 с.
27. Солодянкин А.В., Мартовицкий А.В., Панченко В.В. Оценка геомеханических условий поддержания протяженных выработок шахт ОАО «Павлоградуголь». *Разработка рудных месторождений*. 2011. № 94. С. 3-6.
28. Шашенко А.Н., Солодянкин А.В. Совершенствование критерия для устойчивости пород почвы выработки. *Проблеми гірського тиску*. 2014. № 1-2. С. 77-95.
29. Бульчев Н.С., Амусин Б.З., Оловянный А.Г. Расчет крепи капитальных горных выработок. Москва: Недра, 1974. 320 с.
30. Адонкин А.С. Опыт поддержания подготовительных выработок. *Уголь*. 1975. №5. С. 34-37.
31. Кошелев К.В., Петренко Ю.А., Новиков А.О. Охрана и ремонт горных выработок. Москва: Недра, 1990. 218 с.
32. Бокий Б.В., Зими́на Е.А., Смирняков В.В., Тимофеев О.В. Технология, механизация и организация проведения горных выработок. Москва: Недра, 1983. 264 с.
33. Указания по рациональному расположению, охране поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. ВНИМИ. Ленинград, 1986. 222 с.
34. Тимохин А.Н. Обоснование параметров и разработка податливых опор для охраны повторно используемых выработок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02. ВНИМИ. Санкт-Петербург, 1993. 14 с.
35. Белаенко Ф.А., Глушко В.Т. Исследование пучения горных пород в капитальных и подготовительных выработках на шахтах Донбасса. *Труды Украинского научно-исследовательского института организации и механизации шахтного строительства*. 1960. № 11. С. 117-138.
36. Черняк И.Л. Повышение устойчивости подготовительных выработок. Москва: Недра, 1993. 256 с.

37. Nehrii S., Nehrii T., Bachurin L., Piskurska H. Problems of mining the prospective coal-bearing areas in Donbas. *E3S Web Conf.* 2019. Volume 123. 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301011>.

38. Nehrii S., Nehrii T., Zolotarova O., Volkov S. Investigation of the geomechanical state of soft adjoining rocks under protective constructions. *Rudarsko-geološko-Naftni Zbornik*. 2021. 36(4). <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.4.6>.

39. Zong Y., Han L., Meng Q., Wang Y. Strength properties and evolution laws of cracked sandstone samples in re-loading tests. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020. №30. P.251–258.

40. Нерпій С.Г., Єфремов І.О., Нерпій Т.О. Визначення навантажень на засоби охорони в зоні впливу очисних вибоїв. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2020. №1 (46). С. 16-27. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-2-16-27>.

References

1. Vremennye polozheniya po razrabotke proektov novykh i rekonstruktsii deystvuyushchikh ugolnykh shaht Donetskogo basseyna na glubokikh gorizontakh. (1965). Tsentrgrproshaht. Moscow. (in Russian)

2. ISU 10.1-00185790-002-2005. Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii vuhilnykh shakht/ (2006). Minvuhleprom Ukraine. Kyiv. (in Ukrainian)

3. Medianyuk, V.Yu., Medianyuk, Yu.A. (2010) Efficiency from the use of a combined system for the development of shallow coal seams at great depths [Effektivnost ot primeneniya kombinirovannoy sistemy razrabotki pologikh ugolnykh plastov na bolshih glubinah]. *School of Mining Engineering*, 296-310. (in Russian)

4. Maleev, N.V., Martynov, A.A., Yakovenko A.K. (2010) Computer technology for forecasting and developing measures to improve thermal conditions in deep mine sections [Kompyuternaya tehnologiya prognozirovaniya i razrabotki mer po uluchsheniyu teplovykh usloviy na vyiemochnykh uchastkakh glubokikh shaht]. *School of Mining Engineering*. 103-113. (in Russian)

5. Instruksiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na plastakh, sklonnykh k vnezapnyim vybrosam uglya, porody i gaza. (1977). Nedra. Moscow. (in Russian)

6. Zabyhailo, V.E., Nykolyn, V.Y. (1990). Vliyanye katahezeza hornykh porod y metamorfyзма uhlei na ykh vybrosopasnost. Kyiv. Naukova dumka. (in Russian)

7. ISU 10.1.00174088.011-2005. Pravyla vedennia hirnychkykh robot na plastakh, skhylnykh do hazodynamichnykh yavlyshch. (2005). Minvuhleprom Ukraine. Kyiv. (in Ukrainian)

8. Antsiferov, A.V., Tumanov, V.V., Radchenko, A.G., Kiselyov, N.N., Ashihmin, V.D., Radchenko, A.A. (2013). Sovremennyye rabochie gipotezy formirovaniya i proyavleniya vybrosopasnosti ugolnykh plastov Donbassa. *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukrainy*. No 13 (1), 136-152. (in Russian)

9. Rong, H., Yu S., Zhang, H., Liang, B. (2020). Quantitative Calculation of Critical Depth in Typical Rockburst Mine. *Advances in Civil Engineering*. Volume 2020. Article ID 7968160. <https://doi.org/10.1155/2020/7968160>

10. Wen, J., Li H., Jiang, F., Yu, Z., Ma, H. and Shu C. Research on Critical Depth of Rock Burst in Coal Mines in China. *IOP Conf. Series: Earth and*

Environmental Science. 2020. 570. 042056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/570/4/042056>

11. Portsevskiy, A.K. (2003). Vybor ratsionalnoy tehnologii dobyichi rud. *Geomechanicheskaya otsenka sostoyaniya nedr. Ispolzovanie podzemnogo prostranstva*. Geokologiya. Moscow. MGU. (in Russian)

12. Privalov, V. A., Sachsenhofer, R. F., Panova, E. A., Antsiferov, V. A. (2011). Tectonic factors affecting coal bed methane distribution in the Donets basin. *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukrainy*. No 9 (2), 469–479.

13. Pluzhnikova, V.L., Verhelska, N.V. (2015). Structural-tectonic factor of gas potential formation in the coal rock massifs of the Donbas [Strukturno-tektonichnyi faktor formuvannya hazonosnosti vuhleporodnykh masyviv Donbasu]. *Mineral Resources of Ukraine*, No 4, 22-25. (in Ukrainian)

14. Ulytsky, O., Boiko, K. (2021). Rse-based flooding prediction within territories of closed coal mines of Ukraine [Prohnoz pidtoplennia terytorii likvidovanykh vuhilnykh shakht Ukrainy za danymy DZZ]. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, No 8 (1), 18–25. (in Ukrainian)

15. Wang, Q., Jiang, Z., Jiang, B., Gao, H., Huang, Y., Zhang, P. (2020). Research on an automatic roadway formation method in deep mining areas by roof cutting with high-strength bolt-grouting, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Volume 128. 104264. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104264>.

16. Chang, J., Li, D., Xie, T., Shi, W., He, K. (2020). Deformation and Failure Characteristics and Control Technology of Roadway Surrounding Rock in Deep Coal Mines. *Geofluids*, Volume 2020, Article ID 8834347. <https://doi.org/10.1155/2020/8834347>.

17. Kang, H. (2014). Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review. *International Journal of Coal Science & Technology*, No 1(3), 261–277. <https://doi.org/10.1007/s40789-014-0043-0>.

18. Nehrii, S., Sakhno, S., Sakhno, I., Nehrii, T. (2018). Analyzing kinetics of deformation of boundary rocks of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, Volume 12 (4), 115-123. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.115>.

19. Nehrii, S., Zhyvohliad, S., Nehrii, T. (2019). Observation of the state of workings at the outright longwall excavation system [Sposterezhennia za stanom vyrobok pry sutsilnii systemi rozrobky]. *Journal of Donetsk Mining Institute*, No 2 (45), 16-27. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-2-16-27>. (in Ukrainian)

20. Khalymendyk, YU.M., Bryi, A.V., Baryshnikov A.S. (2013). Supporting of mine roadway with rope bolts under conditions of soft walls [Podderzhanie shtreka kanatnyimi ankerami v usloviyah slabyykh bokovykh porod]. *Geo-Technical Mechanics*, No 110, 190-203. (in Russian)

21. Slashchev, I.N. (2012). Mining research of systems maintenance stability coal heading in easily cave rock of Western Donbass [Shahtnyie issledovaniya ustoychivosti sistem podderzhaniya shtrekov v usloviyah legkoobrushaemykh porod Zapadnogo Donbassa]. *Geo-Technical Mechanics*, No 97, 177-185. (in Russian)

22. Nehrii, S. (2021). Improving the methodology for selecting technologies for the protection

of preparatory roadways [Vdoskonalennia metodyky vyboru tekhnolohii okhorony pidhotovchykh vyrobok.]. *Technical Engineering*, No 1(87), 155-162. [https://doi.org/10.26642/ten-2021-1\(87\)-155-162](https://doi.org/10.26642/ten-2021-1(87)-155-162). (in Ukrainian)

23. Gapiiev, S.N. (2014). Modeling and prediction of geomechanical processes in the workings of deep mines [Modeliuvannia i prohnoz heomekhanichnykh protsesiv u vyrobkakh hlybokykh shakht]: (Dr. Tech. Sci.), NMU, Dnipropetrovsk, (in Ukrainian)

24. Zaslavskiy, Yu.Z. (1966). Issledovanie proyavleniy gornogo davleniya v kapitalnykh vyirabotkakh shaht Donetskogo basseyna. Kharkov: Nedra. (in Russian)

25. Zaslavskiy Yu.Z., Druzhko E.B. (1989). *Novyye vidyi krepki gornyyh vyirabotok*. Moscow: Nedra. (in Russian)

26. Rukovodstvo po vyboru krepki dlya vyirabotok, provodimyyh kombaynami. (1979). TsBNTI. Donetsk (in Russian)

27. Solodyankin, A.V., Martovitskiy, A.V., Panchenko V.V. (2011). Otsenka geomekhanicheskikh usloviy podderzhaniya protyazhennykh vyirabotok shakht OAO "Pavlogradugol" *Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy*, No 94, 3-6. (in Russian)

28. Shashenko, A.N., Solodyankin, A.V. (2014). Improving the criterion for the stability of soil rocks [Sovershenstvovanie kriteriya dlya ustoychivosti porod pochvy vyirabotki]. *Problems of rock pressure*, No 1-2, 77-95. (in Russian)

29. Bulyshev, N.S., Amusin, B.Z., Olovnyanyy A.G. (1974). *Raschet krepki kapitalnykh gornyyh vyirabotok*. Moscow: Nedra. (in Russian)

30. Adonkin, A.S. (1975). Opyit podderzhaniya podgotovitelnykh vyirabotok. *Ugol*, No 5, 34-37. (in Russian)

31. Koshelev, K.V., Petrenko, Yu.A., Novikov, A.O. (1990). *Ohrana i remont gornyyh vyirabotok*. Moscow: Nedra. (in Russian)

32. Boki, B.V., Zimina, E.A., Smirnyakov, V.V., Timofeev, O.V. (1983). *Tekhnologiya, mekhanizatsiya i organizatsiya provedeniya gornyyh vyirabotok*. Moscow: Nedra. (in Russian)

33. Ukazaniya po ratsionalnomu raspolozheniyu, ohrane podderzhaniyu gornyyh vyirabotok na ugolnykh shahtakh SSSR. (1986). VNIMI. Leningrad, (in Russian)

34. Timokhin, A.N. (1993). Justification of parameters and development of compliant supports for the protection of reusable workings [Obosnovanie parametrov i razrabotka podatlivykh opor dlya okhrany povtorno ispolzuemykh vyirabotok]. (Ph. D.), VNIMI, St. Petersburg. (in Russian))

35. Belaenko, F.A., Glushko, V.T. (1960). Issledovanie pucheniya gornyyh porod v kapitalnykh i podgotovitelnykh vyirabotkakh na shahtakh Donbassa. *Trudy Ukrainskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta organizatsii i mekhanizatsii shahtnogo stroitelstva*. No 11. 117-138. (in Russian)

36. Chernyak, I.L. (1993). *Povyshenie ustoychivosti podgotovitelnykh vyirabotok*. Moscow: Nedra. (in Russian)

37. Nehrii, S., Nehrii, T., Bachurin, L., Piskurska, H. (2019). Problems of mining the prospective coal-bearing areas in Donbas. *E3S Web Conf.* Volume 123. 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301011>.

38. Nehrii, S., Nehrii, T., Zolotarova, O., Volkov, S. (2021). Investigation of the geomechanical state of soft adjoining rocks under protective constructions. *Rudarsko-geološko-Naftni Zbornik*. No 36(4). <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.4.6>.

39. Zong Y., Han L., Meng Q., Wang Y. (2020). Strength properties and evolution laws of cracked sandstone samples in re-loading tests. *International Journal of Mining Science and Technology*, No 30, 251–258.

40. Nehrii, S., Yefremov, I., Nehrii, T. (2020). Determination of load on protective equipment in the zone of influence of breakage face [Vyznachennia navantazhen na zasoby okhorony v zoni vplyvu ochysnykh vyboiv]. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2020, №1 (46), 16-27. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-2-16-27>. (in Ukrainian)

Надійшла до редакції 10.12.2021

Рецензент канд. техн. наук, доц. О.О. Василець

Негрій Сергій Григорович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри «Розробка родовищ корисних копалин» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна), orcid.org/0000-0002-3195-8401.

E-mail: serhii.nehrii@donntu.edu.ua.

Негрій Тетяна Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Управління гірничим виробництвом і охорони праці» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна), orcid.org/0000-0002-4239-3178.

E-mail: tetiana.nehrii@donntu.edu.ua.

Шепеленко Руслана Миколаївна – асистент кафедри «Розробка родовищ корисних копалин» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна), orcid.org/0000-0002-1867-8069.

E-mail: ruslana.shepelenko@donntu.edu.ua

Качалов Микита Олексійович – аспірант кафедри «Розробка родовищ корисних копалин» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна),

E-mail: nikovex.nik@gmail.com

DEVELOPMENT DEPTH AS COMPLICATION FACTOR OF WORKING OFF CONDITIONS OF COAL SEAMS

Purpose: development of a scientific approach to clarify the areas of technologies application for mining roadways protection on the depth of mining operations.

Methodology. Analysis and generalization of the results of scientific and technical research on the impact of natural phenomena on the process of coal mining. Graphoanalytical establishment of application and areas and determination of critical depths for protection mining roadways technologies.

Results. Was studied and generalized the information on the influence of natural phenomena on the process of coal mining with the transition of mining to great depths. The necessity of determining the critical depths, exceeding which complicate the conditions of coal seams development due to the negative manifestations of natural phenomena, which requires changes in the technology of mining. Critical depths for different conditions, phenomena and technologies are different. For gas-saturated seams, they are determined by the methane-bearing capacity of seams, production intensity and ventilation conditions of underground roadways, for seams prone to gas-dynamic phenomena - they are determined by the stress-strain state (SSS) and strength of surrounding rocks. The critical depth in the application of protection roadways technologies also depends on the SSS of rocks and their strength. Therefore, a scientific approach has been developed to clarify the areas of application of technologies for the protection of mining roadways on the depth of mining. The critical depths are determined by the strength conditions of the rocks according to the relevant criteria. It based on the N_c/R_c criterion, graphoanalytical method for determining the areas of application and determining the critical depths for different technologies of protection mining roadways was proposed.

Scientific novelty: was developed a scientific approach to clarify the areas of application of protection mining roadways technologies on the depth of mining.

Practical significance: the proposed approach to clarify the areas of application for the protection of mining roadways technologies at different depths simplifies the search for effective engineering solutions during planning mining operations.

Key words: great depth, difficult conditions, technology of mining operations, critical depth, field of application, criterion, graphoanalytical approach.

Nehrii Serhii – Doctor of Technical Sciences, Public higher education institution Donetsk National Technical University (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine), orcid.org/0000-0002-3195-8401.
E-mail: serhii.nehrii@donntu.edu.ua.

Nehrii Tetiana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Public higher education institution Donetsk National Technical University (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine), orcid.org/0000-0002-4239-3178.
E-mail: tetiana.nehrii@donntu.edu.ua.

Shepelenko Ruslana – Assistant department, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine), orcid.org/0000-0002-1867-8069.
E-mail: ruslana.shepelenko@donntu.edu.ua

Kachalov Mykyta – graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).
E-mail: nikovex.nik@gmail.com