

© В.В. Руських¹, С.М. Пойманов¹, І.В. Філіппов¹

¹ Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК В УМОВАХ ШАХТ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

© V. Ruskikh¹, S. Poimanov¹, I. Filippov¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

STUDY OF METHODS FOR PREDICTING THE STABILITY OF PREPARATORY WORKINGS IN THE MINES OF WESTERN DONBAS

Мета. Аналіз ефективності та доцільності існуючих методів прогнозування підготовчих виробок.

Методика дослідження. Дослідження виконано із застосуванням аналітичного методу (аналіз, пояснення, узагальнення, порівняння) та методу статистичної обробки даних.

Результати дослідження. Проведені дослідження дозволили визначити, що вугленосний осадовий масив Західного Донбасу, у результаті складних тектонічних рухів, відзначається розвиненою і інтенсивною тектонічною порушеністю розривного та плікативного характеру. З'явлення плікативних порушень у привибійній зоні вугільного пласта, які супроводжуються збільшенням їх потужності, призводить до зосередження напруг у місцях порушень, викликаних наближенням до гірничого вибою. Плікативні порушення регіонального характеру спричиняють формування зон аномальної активності в недоторканому гірничому масиві. Окрім гравітаційних сил, що впливають на геологічну структуру, тектонічні напруги, спрямовані вздовж площини напластавання, додаються до цього явища. Тектонічні напруги орієнтовані в напрямку головних кривизн природної поверхні залягання порід і залежать від їхньої величини. Геологічні відхилення різних типів є ключовими показниками аномалій у тектонічному середовищі та зон зниження міцності недоторканого гірничого масиву. Ці аномалії можуть бути результатом комплексного взаємодії геологічних процесів, що включають тектонічну активність, діяльність водних потоків та інші природні чинники. Ці відхилення стають фундаментальними факторами, які сприяють виникненню газодинамічних явищ та обвалень порід під час етапу підготовчих гірничих робіт.

Наукова новизна. Встановлена закономірність взаємовпливу геомеханічних параметрів елементів системи «шаруватий масив – кріплення виробки».

Практичне значення. Вивчення методів прогнозування стійкості підготовчих виробок дозволяють розробляти ефективні системи кріплення виробок згідно геологічних умов та попереджати від можливих аварій та обвалень порід в гірничих робочих областях.

Ключові слова: *стійкість виробок, диз'юнктивна порушеність, кативна порушеність, прогноз.*

Вступ. Дослідження методів прогнозування стійкості підготовчих виробок у гірничому регіоні Західного Донбасу має на меті розв'язати складні завдання, пов'язані з ефективним збереженням гірничих виробок та підвищенням безпеки робітничого персоналу. На фоні великих запасів вугілля у регіоні, специфічні гірничо-геологічні умови створюють значні виклики для галузі.

Традиційні методи охорони підготовчих виробок втрачають ефективність при зміні умов, тому важливо розвивати нові методи прогнозування, які б враховували ці особливості.

Одним з можливих рішень є використання комп'ютерних моделей для прогнозування стійкості гірничих порід. Це дозволить вибрати оптимальний спосіб охорони виробок у конкретних гірничо-геологічних умовах, що в свою чергу забезпечить збереження виробок у експлуатаційному стані та знизить ризики аварійних ситуацій. Такі дослідження сприятимуть підвищенню ефективності видобутку вугілля і покращенню умов праці на шахті, що є важливими аспектами для сталого розвитку гірничої промисловості в регіоні.

Основна частина. Усі геологічні порушення та проведені гірничі виробки спричиняють перерозподіл напруг у гірничому масиві. Прогнозування місць розташування дрібноамплітудних розривних порушень, а також локально розташованих порушень, що відображаються зміною потужності пласта, гірськими виробками, є складним завданням при прогнозуванні гірничо-геологічних умов розробки вугільного пласта. Складність цього прогнозу обумовлена необхідністю проведення його в умовах обмеженої кількості вихідної інформації, отриманої під час розвідницьких робіт.

Серед основних методів прогнозу, які використовуються на даний момент, можна виділити геологічні та геофізичні. Перші ґрунтуються на прогнозуванні порушень за допомогою геологічної інформації, отриманої під час розвідницького буріння або вивчення особливостей вуглевміщувального масиву з гірничих виробок.

Одним із основних методів геологічного прогнозу диз'юнктивних порушень є використання прогнозу на основі зміни елементів залягання пласта [1, 2]. Цей підхід ґрунтується на встановленні зв'язку між диз'юнктивними порушеннями та складчастістю, що проявляється в локальному скривленні вугільного пласта, і запропоновано вести діагностику диз'юнктивної порушеності шляхом спостережень за зміною кривизни залягання пласта.

Наприклад, появу в підготовчому вибою вигину пласта з радіусом кривизни від 100 до 300 метрів можна розглядати як індикатор можливого диз'юнктивного порушення. Однак цей метод надає лише загальну картину і не дозволяє точно визначити характеристики очікуваного порушення.

Метод прогнозу порушеності на основі графічної моделі родовища, яка створюється з використанням інформації, отриманої при розвідницькому бурінні [3], широко використовується в гірничій промисловості. При побудові такої моделі досліджуються літологія та кути нахилу порідних пластів, а також виділяються ділянки порушених порід.

Проте, навіть за умови найбільш щільних сіток розвідницьких шпурів (300x300 метрів), виявлення порушень із амплітудами менше 10 метрів є неможливим. З цією метою модифікації методу, що базуються на складніших конструкціях, наприклад, графіках ухилів, обчислені вздовж паралельних профільних ліній, підвищують роздільну здатність методу й дозволяють виявляти порушення з амплітудами приблизно 5 метрів.

Однак недолік модифікованого методу полягає в можливості отримання неоднозначних результатів у складних умовах залягання пласта. Такі умови можуть включати гетерогенність гірських порід або наявність додаткових геологічних факторів, які ускладнюють точне прогнозування порушень.

В галузевому нормативному документі "Геологічні роботи на вуглевидобувних підприємствах України" [4] рекомендується враховувати залежність зміни ширини зони зниженої міцності вугілля для дрібноамплітудних порушень від амплітуди та величини двогранного кута.

$$B_{кр} = \alpha N^n, \quad (1)$$

де: $B_{кр}$ – ширина зони зниженої міцності вугілля, м; N – нормальна амплітуда розриву, м; де: $n < 1$; – коефіцієнт, який враховує особливості умов формування родовища, структуру й властивості.

Для діапазону амплітуд від 0,5 до 10м ширина зони зі зниженою міцністю вугілля визначається по формулі:

$$B_{кр} = (1,5 \leq 2,5) N^{0,5}. \quad (2)$$

Ширина зони зниженої міцності вугілля для дрібних і дуже дрібних порушень може бути визначена за допомогою наступної форму:

$$B_{кр} = \frac{N}{\sin V} \quad (3)$$

де: $B_{кр}$ – ширина зони зниженої міцності вугілля, м; V – двогранний кут між пластом і зміщувачем, градус; N – нормальна (стратиграфічна) амплітуда розриву, м.

Ширину зони підвищеної тріщинуватості вугілля для тих же порушень визначають по формулі:

$$B_{тр} = \frac{10N}{\sin V} \quad (4)$$

де: $B_{тр}$ – ширина зони підвищеної тріщинуватості вугілля, м

Метод, запропонований авторами роботи [5], для визначення амплітуди диз'юнктива базується на різниці в довжині зон впливу, які виділені за тріщинуватістю та міцністю вугілля ($B_{тр} - B_{кр}$). Графічне зображення цього співвідношення $B_{тр} - B_{кр}$ і N наведено на рис. Відстань до ще не розкритого диз'юнктивного порушення визначається із цього ж малюнка, шляхом установлення повної довжини однієї з розглянутих зон.

Аналіз точності визначення амплітуди порушення цим методом показав, що найбільші погрішності відзначаються на амплітудах до 1 метра. Це свідчить про обмежену точність методу при визначенні дуже малих диз'юнктивних порушень, але при цьому метод може бути корисним для великих амплітуд порушень та загального аналізу розрізнених зон впливу.

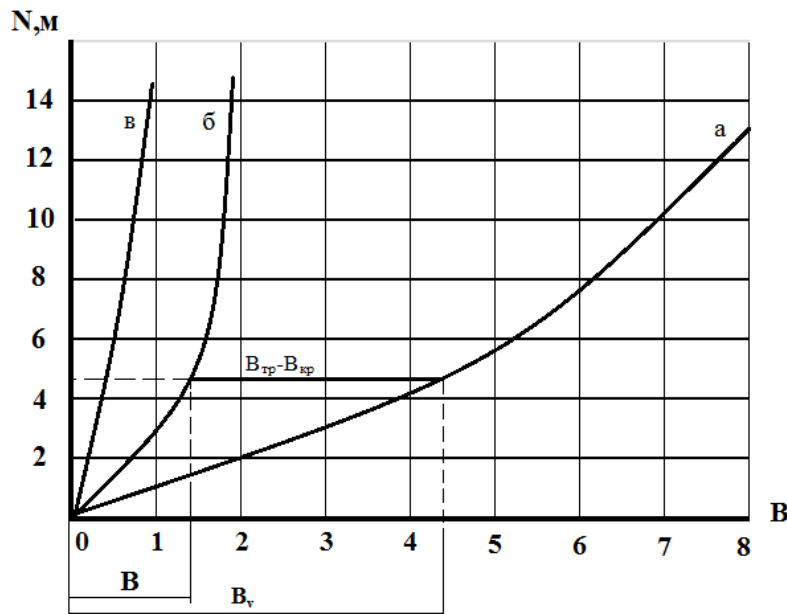


Рис. Залежність ширини зони тріщинуватості I, зони поступового зниження міцності вугілля II та зони контрастних значень міцності III від амплітуди розривного порушення

Розривні порушення, в деяких випадках, можуть бути супроводжені зонами дроблення, що характеризуються різко змінюваними значеннями міцності вугілля. Цю зону можна виявити візуально, що дає можливість прогнозувати диз'юнктив. Ширина зони дроблення, як правило, не перевищує амплітуди зсуву пласта.

Окрім зміни фізико-механічних властивостей вугілля в зоні впливу диз'юнктивного порушення, також відбувається зміна його фізико-хімічних властивостей. У багатьох дослідженнях відзначається, що під впливом високих температур, що виникають через перехід механічної енергії в теплову під час переміщення крил диз'юнктива, можуть змінюватися хімічні властивості вугілля [6, 7].

Метод прогнозу диз'юнктивних порушень, що базується на змінах структури основних породоутворюючих мінералів під впливом тектонічних процесів, дійсно існує і описаний у роботі [8]. Зауважено, що з поліморфними перетвореннями, викликаними тектонічними напруженнями, тісно пов'язані перепади ефективною поверхневою енергії (ЕПЕ) піщаників і модуля пружності.

У роботі було запропоновано критерій K_h , який відображає інтенсивність зміни ЕПЕ і модуля пружності. Цей критерій може використовуватися для оцінки того, наскільки значимі тектонічні процеси для прогнозування диз'юнктивних порушень в гірничому масиві.

Цей метод є цікавим, оскільки він дозволяє оцінювати не лише геометричні аспекти порушень, а й їхні фізико-хімічні зміни, що може бути важливим для повного розуміння механізмів формування диз'юнктивних структур:

$$K_h = \sqrt{\frac{E_{\text{фон}} \Gamma_{\text{фон}}}{E_{\text{тек}} \Gamma_{\text{тек}}}}, \quad (5)$$

де: $E_{тек}$, $G_{тек}$ – значення модуля пружності поверхонь енергії на першому метрі вибою; $E_{фон}$, $G_{фон}$ – фонові значення модуля пружності й ефективний поверхонь енергії в недоторканій частині пласта.

Поява розривної тектоніки в гірничому масиві характеризується значенням $k_h > 1,5$ [8]. Зона впливу порушення визначається по формулі:

$$B = 8,46k_h - 9,11, \quad (6)$$

де: B – зона впливу порушення, м.

Серед геофізичних методів, найбільш перспективними для прогнозування дрібноамплітудних порушень вугільних пластів, є шахтні методи, такі як радіохвильові, електрометричні і акустичні [4]. Ці методи надають можливість отримувати важливу інформацію про геологічну структуру та властивості пластів безпосередньо в процесі гірничих робіт.

Радіохвильові методи використовуються для вимірювання різниці часу, що потрібно радіохвилі для проходження через гірську породу. Це дозволяє виявляти зони зниженої міцності або потенційних диз'юнктивних структур.

Електрометричні методи базуються на вимірюванні електричної провідності гірських порід. Зміни в провідності можуть вказувати на наявність порушень або зміну гідрогеологічних умов у пластах.

Акустичні методи використовуються для вимірювання швидкості поширення звукових хвиль у гірських породах. Зміни у швидкості поширення можуть вказувати на наявність порушень або зміну фізико-механічних властивостей порід.

Ці геофізичні методи дозволяють не лише виявляти потенційні диз'юнктивні структури, а й оцінювати їхні розміри, глибину, інтенсивність та інші параметри, що є важливими для прогнозування гірничих умов і планування робіт з видобутку вугілля.

Радіохвильові методи вивчення мають дві основні модифікації: радіолокаційний метод та метод радіохвильового просвічування. Радіолокаційний метод ґрунтується на аналізі електромагнітних хвиль радіохвильового діапазону, що випромінюються з гірничих виробок, проходять через середовище та відбиваються від границь між різними шарами з різною електропровідністю. Розташування цих границь визначається за зміною фаз між прямим і відбитим сигналом, яку фіксує приймальна антена.

Однак радіолокаційний метод має свої обмеження. Серйозною проблемою є складність виділення відбитих сигналів на тлі великої кількості електромагнітних перешкод у гірництві. Також, мала глибина зондування є результатом інтенсивного поглинання електромагнітних хвиль гірничими породами. Це ускладнює визначення границь та стану середовища на значній глибині. Крім того, радіолокаційний метод не може ефективно працювати при виявленні диз'юнктивних порушень з амплітудою зсуву менше 0,6 метра.

Такі обмеження змушують вчених та інженерів шукати інші технології та методи дослідження гірничих утворень для більш точної та ефективної роботи у гірництві.

Метод радіохвильового просвічування зосереджується на впливі радіохвиль, що проникають через вуглепородний масив, на зони дроблення та гідромеханічної переробки. В результаті шахтних досліджень було виявлено, що цей метод може ефективно виділяти розривні порушення лише за умови, що амплітуда таких порушень перевищує 1 метр на пластах, товщина яких більше 1,5 метра.

Електрометричні методи базуються на аналізі аномалій електричного поля над різними геологічними об'єктами, включаючи порушення вугільного пласта. Підземні електророзвідочні дослідження використовують такі методи як симетричне електропрофілювання, електричне просвічування та горизонтальне електричне зондування. Ці методи дозволяють виділяти закарстовані зони і ділянки, що можуть бути небезпечними через прорив підземних вод. Крім того, за допомогою електрометричних методів можливе виявлення порушень з поперечником більше 10 метрів у виїмкових стовпах шириною 60 метрів.

Акустичні методи дослідження структури і властивостей гірничих порід можна розділити залежно від частотного діапазону застосовуваних хвиль на ультразвукові (з частотою $f_{раб} \geq 20$ кГц) і сейсмоакустичні (з частотою $f_{раб} < 20$ кГц). Ультразвукові дослідження часто проводяться методами міжскважинного прозвучивання або акустичного каротажу. Ці методи дозволяють виявляти локальні неоднорідності, такі як тверді включення або порожнечі розміром в кілька десятків сантиметрів на відстані до декількох метрів, а також одиночні та групові тріщини, а також зони підвищеного опорного тиску.

Проте ультразвукові методи мають свої обмеження при дослідженні порушеності вугільних пластів. Однією з головних перешкод є мала база прозвучивання та обмежене поглинання високочастотних коливань у гірничих породах. Для проведення таких досліджень необхідно створити щільну мережу вимірювальних шпурів, що ускладнює та збільшує витрати на процес контролю порушеності. Такі фактори роблять застосування ультразвукових методів складним і вимагають додаткових підготовчих заходів для ефективного використання цих технік.

Сейсмоакустичний метод базується на закономірностях поширення каналових і бічних хвиль у вугільному пласті. [9–11] Основні параметри коливань, які надають інформацію про вугільний пласт, включають амплітуду каналових хвиль, їхню групову швидкість, дисперсію групової швидкості, а також енергетичну й спектральну характеристики. Ці параметри дозволяють прогнозувати не тільки диз'юнктивні, але й плікативні (зокрема, заміщення вугілля породою) порушення.

Основними методами, що використовуються для прогнозу геологічних порушень за допомогою сейсмоакустики, є метод сейсмічного просвічування (МОП) і метод відбитих хвиль (МОВ). МОВ можна застосувати з окремого гірничого вибою, а для МОП потрібно мати хоча б дві виробки. Проте, можливість застосування МОВ для прогнозу тектонічних порушень сильно залежить від нахилу зміщувача відносно пласта. При куті нахилу менш 30° відбитої хвилі може не бути помітною.

В умовах Донбасу використання каналових хвиль у сейморозвідці значно ускладнене через малі потужності вугільних пластів і особливості будови порід покрівлі й ґрунту. Частина енергії каналових хвиль піддається дисипативному

загасанню через вплив особливостей гірничих порід та порівняно низькі частоти, що використовуються. Такі фактори роблять застосування сейсмоакустичного методу важкодоступним у цьому регіоні.

Розвиток методів прогнозування ступеня порушеності шахтних полів диз'юнктивами отримав інтенсивний розвиток за останній час. Один із таких методів базується на використанні нейронних мереж і генетичних алгоритмів для прогнозування ступеня порушеності шахтних полів диз'юнктивами.

Проте можна зробити висновок, що прогноз стовщення пласта й дрібноамплітудних диз'юнктивних порушень є досить складним завданням і дотепер немає надійного та легко здійсненого способу прогнозування. Незважаючи на наявність великої кількості методів прогнозу порушень, часто дрібноамплітудні порушення не виявляються завчасно. Це може становити значну небезпеку, оскільки непрогнозоване розкриття порушень гірськими виробками може призвести до серйозних наслідків.

У зв'язку з цим, доцільно рекомендується проводити моніторинг привибійної частини пласта перед кожним циклом робіт з метою виявлення таких порушень. Надійними та інформативними характеристиками параметрів розвантаженої зони є величина видавлювання вугілля у вибій, початкова швидкість газовиділення та величина виходу штибу. Виявлення концентрації напруг у привибійній частині пласта може бути важливим показником для прогнозування порушень.

Висновки. Геологічні відхилення різних типів стають індикаторами аномалій у тектонічному полі напруг та зон зниження міцності недоторканого гірничого масиву. Ці фактори є основною причиною виникнення газодинамічних явищ та обвалень порід під час підготовчих виробок, а також призводять до погіршення стійкості підтримки. Вугленосний осадовий масив Західного Донбасу, у результаті складних тектонічних рухів, відзначається розвиненою і інтенсивною тектонічною порушеністю розривного та плікативного характеру. Це суттєво ускладнює проведення гірничих робіт, є основною причиною зниження безпеки видобутку та зростання витрат виробництва. Поява плікативного порушення в привибійній частині вугільного пласта, що супроводжується збільшенням його потужності, спричиняє концентрацію напруг в області порушення, викликану наближенням до гірничого вибою. Більше того, концентрація напруг відбувається і в області розщеплення вугільного пласта. Плікативна порушеність, яка є характерною для глибоких шахт Західного Донбасу, негативно впливає на стійкість гірничих виробок. Величина вертикальної конвергенції їх контуру може зростати до 50% та має тісний зв'язок з градієнтом головних кривизн рельєфу залягання пласта й порід, що вміщуються. Нажаль, на сьогоднішній день методи прогнозування плікативної порушеності масиву не розвинуті, що є однією з невирішених проблем гірничої справи. Таким чином, подальші дослідження та розробки в цьому напрямку є важливим завданням для підвищення безпеки та ефективності гірничих робіт. Розробка таких методів дозволили б попередньо визначати зони особливого ризику і вживати заходи для їх запобігання. Наприклад, системи моніторингу тектонічних переміщень та розробка алгоритмів реагування на небезпечні ситуації могли б значно підвищити безпеку гірничих робіт.

Перелік посилань

1. Михайлов, В.А. (2002). *Основи геотектоніки: Навчальний посібник*. Видавничо-поліграфічний "Київський університет".
2. Левицький, В.Г., & Криворучко, А.О. (2022). *Геометрія надр. Навчальний посібник*. Житомир.
3. Осецкий, А.М., Глушков, В.Т., & Зорин, А.Н. (1973). *Выявления ймовірних тектонічних порушень і викидонебезпечних зон*. Наукова думка.
4. КД 12.06.204-99. *Геологічні роботи на вугледобувних підприємствах України: Інструкція: Керівний документ Міністерства палива та енергетики України*. (1999). <http://www.mitc.org.ua/index.php/normativy/polnyj-spisok>
5. Гарбер, И. С., Григор'єв, В. Е., & Дулак, Ю. Н. (1979). *Розривні порушення вугільних пластів*. Надра.
6. Суярко, В.Г., & Сердюкова, О.О. (2012). *Основи геології навчальний посібник. Тектонічні деформації та елементи залягання гірських порід*. ПолтНТУ.
7. Саранчук, В.І., Ільяшов, М.О., Ошовський, В.В., & Білецький, В.С. (2008). *Основи хімії і фізики горючих копалин*. Східний видавничий дім.
8. Гладка, О.В. (2003). *Оцінка стану гірничого масиву з метою прогнозу малоамплітудних розривних порушень*. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.15.11. Донецьк: 1ФГП НАНУ.
9. Азаров, Н. Я., & Яковлев, Д. В. (1988). *Сейсмоакустичний метод прогнозу гірничо-геологічних умов експлуатації вугільних родовищ*. Надра
10. Гречухин, В.В. (1986). *Вивчення вугленосних формацій геофізичними методами*. Надра.
11. Анциферов, А. В. (2003). *Теорія та практика шахтної сейсморозвідки*. Донецьк: «АЛАН».

ABSTRACT

Purpose. Analysis of the effectiveness and feasibility of existing methods for predicting preparatory workings.

Research methodology. The research was conducted using an analytical method (analysis, explanation, synthesis, comparison) and statistical data processing method.

Research results. The conducted research allowed determining that the coal-bearing sedimentary massif of the Western Donbas, as a result of complex tectonic movements, is characterized by developed and intensive tectonic disturbances of a ruptural and plicative nature. The appearance of plicative disturbances in the hanging wall of the coal seam, accompanied by an increase in their thickness, leads to the concentration of stresses in the areas of disturbances caused by approaching the mining face. Regional plicative disturbances cause the formation of zones of anomalous activity in the intact mining massif. In addition to gravitational forces affecting the geological structure, tectonic stresses directed along the bedding plane are added to this phenomenon. Tectonic stresses are oriented in the direction of the main curvatures of the natural surface of rock deposition and depend on their magnitude. Geological deviations of various types are key indicators of anomalies in the tectonic environment and zones of reduced strength in an intact mining massif. These anomalies can result from the complex interaction of geological processes, including tectonic activity, water flow activity, and other natural factors. These deviations become fundamental factors contributing to the occurrence of gas-dynamic phenomena and rock falls during the preparatory mining stage.

Scientific novelty. The regularity of the interaction of geomechanical parameters of elements of the "layered massif – excavation support" system has been established.

Practical significance. Studying methods for predicting the stability of preparatory workings allows for the development of effective excavation support systems according to geological conditions and prevents possible accidents and rock falls in mining working areas.

Keywords: excavation stability, disjunctive disturbances, plicative disturbances, prediction.