

Олександр КУЧИН¹, Ганна БРУЙ¹, Олександр ЯНКІН¹, Ганна ШУТІНА²

¹ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, 49000, Україна;

askuchin77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4031-164X>; Brui.h.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-9527-8889>; yankin.o.ye@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0003-3208-3253>

² Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, 49005, Україна; ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0665-3040>

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ ОПУСКАННЯМ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ І ОПОРНИМ ТИСКОМ НАД ОЧИСНИМ ВИБОЄМ

Мета дослідження – розроблення методики визначення приросту напружень над рухомим очисним вибоєм шахт Західного Донбасу. У роботі запропоновано варіант вирішення поставленого завдання на основі аналізу результатів геодезичних інструментальних спостережень за осіданням земної поверхні та деформацією масиву гірських порід над очисним вибоєм, що рухається. Основними геометричними показниками зони підвищеного гірського тиску є її ширина (довжина) і дальність поширення у покрівлю і підшву пласта, що відпрацьовується. Кількісні показники цієї зони поки що не розглянуто, а її ширину (довжину) в Західному Донбасі визначають з точністю 50 %. Отже, дослідження у цьому напрямі актуальні. Експериментальною основою для ведення досліджень є результати інструментальних вимірювань деформацій у двох вертикальних свердловинах, що розташовані попереду рухомого очисного вибою, та результати опрацювання геодезичних спостережень на 30 спостережних станціях, розташованих на земній поверхні. На основі аналізу геодезичних інструментальних спостережень за зрушенням масиву, що підробляється, уточнено геометричні параметри зони підвищеного гірського тиску. Запропоновано методику визначення коефіцієнта приросту напружень над очисним вибоєм, що рухається, шахт Західного Донбасу. Встановлено емпіричні коефіцієнти функції розподілу вертикальних напружень у межах зони опорного тиску. Встановлено взаємозв'язок між опусканням земної поверхні попереду очисного вибою, що рухається, і значеннями приросту напружень у крайовій частині розроблюваної очисної виробки. Достовірність отриманих результатів підтверджують геофізичні дослідження у Західному Донбасі, а також результати натурних спостережень.

Ключові слова: опускання земної поверхні; осідання; підвищений гірський тиск; приріст гірського тиску; геодезичні інструментальні спостереження; екстензометри свердловинні.

Вступ

Під час розроблення вугільних пластів навколо межі очисної виробки формується область підвищеного гірського тиску, яка поширюється в покрівлю і підшву пласта, що відпрацьовується. Підвищений гірський тиск формується внаслідок зависання порід над межею очисних робіт. Значення зависання залежить від потужності розроблюваного пласта, міцнісних характеристик гірських порід [Расположение..., 2001] та швидкості просування очисного забою [Назимко, 2008]. Відстань, на якій проявляється підвищений гірський тиск у крайовій частині пласта, що відпрацьовується, називають шириною зони опорного тиску l . Величина l залежить від глибини розробки і потужності пласта, що розробляється, і є основним вихідним параметром для побудови зон підвищеного гірського тиску. У зоні опорного тиску породи відчувають вертикальні напруження, значення яких перевищують напруження незайманого масиву.

Зона підвищеного тиску поширюється вглиб масиву на відстань, що залежить від глибини розроблення та потужності вугільного пласта. Максимальна напруга у покрівлі вугільного пласта зосереджена на певній відстані від межі очисних робіт. Ця відстань, за даними різних досліджень, розміщена на відстані $3\div 16$ потужностей розроблюваного пласта від межі очисної виробки [Khalymendyk et al., 2013; Junker, 2006]. Це пов'язано із руйнуванням крайової частини пласта і бічних порід та видавлюванням гірської маси в очисну виробку. Відомі методики визначення l для однакових умов дають розкид прогнозування цієї величини до 100 %. Методики оцінювання кількісних показників приросту гірського тиску в крайовій частині розроблюваного пласта поки що не запропоновано.

Метою цієї роботи є вивчення закономірностей розподілу значень гірського тиску на основі геодезичних інструментальних спостережень на земній поверхні та маркшейдерських вимірювань деформацій масиву в свердловинах, розташованих попереду очисного вибою, що рухається.

Для вивчення опускання земної поверхні на шахтах Західного Донбасу закладено 35 спостережних станцій, що складаються з 76 профільних ліній та 4030 ґрунтових реперів. На станціях виконано 498 серій спостережень, зокрема короткочасні (частотні) спостереження. Спостереження виконували як із використанням класичних вимірювальних приладів (нівелір, сталева рулетка), так і сучасним геодезичним обладнанням (електронні тахеометри, GNSS-приймачі).

Методика досліджень

Поведінку масиву гірських порід під час підроблення можна вивчити за допомогою лабораторних досліджень, теоретичних методів та інструментальних спостережень. Перший спосіб дає лише якісну картину процесів, що відбуваються, і загальне уявлення про зрушення масиву. Теоретичні методи дуже різноманітні, але залежать від гіпотези, числового математичного апарату і кількості прийнятих припущень.

Найдостовірніші результати щодо прогнозування зрушень і деформацій масиву гірських порід можна отримати в результаті спільного аналізу результатів інструментальних спостережень на земній поверхні та в масиві гірських порід, що пов'язані з теоретичними моделями підроблюваного масиву [Кучин, 2011; Elashiry et al., 2009; Chen et al., 2018]. Метод натурних вимірювань є пріоритетним, на основі результатів вимірювань калібрують математичні моделі [Sdvyzhkova et al., 2016; Kuchin et al., 2017; Shahsenko et al., 2017; Tereschuk et al., 2014]. Основним натурним методом дослідження деформацій гірського масиву та земної поверхні є інструментальні спостереження на реперних наглядних станціях [Lee, Abel, 1983; Subsidence Monitoring Program, 2007]. Маркшейдерські спостереження за масивом гірських порід менш поширені порівняно зі спостереженнями на денній поверхні. Крім цього, інтерпретація їх результатів часто пов'язана із труднощами обліку різних зовнішніх факторів. Проте їхня роль у розвитку науки про зрушення гірських порід незаперечна. Тому як методику досліджень вибрано геодезичні спостереження за зрушенням реперів на земній поверхні у поєднанні з маркшейдерськими замірами у свердловинах-екстензометрах [Subsidence from coal mining activities, 2014; Holla, Barclay, 2000].

Криві опускання проходять початкову, пришвидшену та повільну стадії опускання та характеризуються S-подібною формою, яку можна адекватно апроксимувати логістичною регресією

[Yang et al., 2022]. Для аналітичного поділу вертикальної та горизонтальної складових використано теорію осідання під час видобування вугілля [Chen et al., 2020]. У дослідженні [Sepehri et al., 2017] показано, що числові прогнози осідання поверхні, спричиненого гірничими роботами, добре узгоджуються із розподілом Гаусса. Для прогнозування підняття масиву під час затоплення відпрацьованої ділянки у складних геологічних умовах запропоновано авторську методику числового моделювання [Zhao, Kopietzky, 2020]. Модель враховує пружно-пластичну поведінку матеріалу, ураховуючи розломи, представлені межами розділу. Відтворено виміряні опускання до 17 м, а також підйоми за останні десять років зі значеннями від 0,5 до 2,0 мм/рік. Інструментальні спостереження у Західному Донбасі, виконані в межах цієї роботи, таких явищ не виявили.

Згідно з дослідженням [Ma et al., 2022], верхній і нижній критичні опорні тиски в 1,43 і 1,06 рази перевищують бічну напругу на зводі виробки. Ці результати узгоджуються із результатами наших досліджень. Відмінності пояснюються різними технологіями видобування вугілля та специфічними геологічними умовами Західного Донбасу.

Автори [Zheng et al., 2021] згодні з тим, що прогнозування зміщень виробки є складним завданням через невизначеність властивостей масиву гірських порід. Для оцінки осідання поверхні та деформації гірського масиву запропоновано модель прогнозування осідань [Dai et al., 2022], основана на зміні кута поширення впливу гірничих робіт.

Аналіз публікацій показав, що основними напрямками сучасних досліджень процесу деформування гірських порід є: визначення зрушення масиву гірських порід та земної поверхні, моделювання процесу зрушення товщі, визначення зв'язку між вертикальною та горизонтальною проєкціями вектора зрушення, визначення навантажень та зміщень на контурі тунелів та гірничих виробок, дослідження зрушення товщі після завершення гірничих робіт. Однак мало вивчене питання взаємозв'язку осідань земної поверхні з опорним гірським тиском на межі очисної виробки. Встановлення цього взаємозв'язку дасть змогу вирішити зворотне завдання: визначення значень опорного тиску в крайовій частині очисної виробки (цілика) на підставі встановлених значень осідань земної поверхні.

Дотепер інструментальні спостереження за зрушенням масиву гірських порід у Західному Донбасі (слабкі тонкошарові глинисті алевроліти

та аргіліти з міцністю на одновісне стиснення 15–30 МПа, глибина ведення гірничих робіт від 100 до 550 м) виконували із застосуванням таких методів:

- маркшейдерські вимірювання на спостережних станціях, що складаються із ліній реперів у підроблених підземних виробках (два випадки);
- маркшейдерські спостереження за деформаціями глибинних реперів (дві свердловинні спостережні станції, десять реперів у кожній);
- геофізичні вимірювання у вертикальних свердловинах, пробурених із земної поверхні (одна спостережна станція, дві свердловини);
- шахтні маркшейдерські спостереження за деформуванням кріплення гірничих виробок у результаті підробки.

З погляду кількісного оцінювання значень зрушень і деформацій масиву гірських порід практичний інтерес становлять два перші способи.

Для встановлення закономірностей вертикального деформування масиву гірських порід під час руху очисного вибою на шахті “Степова” у Західному Донбасі було закладено дві наглядні станції у свердловинах № 35 (спостережна станція № 13) та № 2 (спостережна станція № 12). Глибина розроблення вугільного пласта становила 100–110 м. У свердловині № 35 глибинні репери, закладені на глибині 56,82 м з інтервалом 5–6 м. Для спостережної станції № 12 глибина закладення становила 57–77 м. Періодичність спостережень становила одну – сім діб. Загалом виконано 96 серій спостережень.

Дослідження геометричних параметрів зони підвищеного гірського тиску попереду очисного вибою, що рухається

Процес деформації масиву гірських порід умовно можна поділити на два етапи:

- деформування масиву попереду вибою, що рухається (зона підвищеного гірського тиску);
- деформування масиву над виробленим простором у зоні розвантаження.

Розглянемо зону підвищеного гірського тиску, що формується попереду очисного вибою, який рухається. Межі цієї зони в масиві доволі умовні й найчастіше їх визначаються у різних методиках за допомогою граничного кута (над незайманим масивом) і кутів захисту (над виробленим простором) [Расположение..., 2001, КД 12.01.01.503 – 2001. Управление кровлей..., 2001]. Враховуючи взаємозв’язок між опорним тиском над крайовою частиною вугільного пласта та осіданнями масиву гірських порід, можна встановити положення межі зони підвищеного гірського тиску за результатами

інструментальних спостережень за осіданнями глибинних реперів. Спосіб визначення цих меж наведено нижче.

Якщо очисний вибій розташований на відстані d (рис. 1) від гирла спостережної свердловини, з’являються перші ознаки осідання земної поверхні.

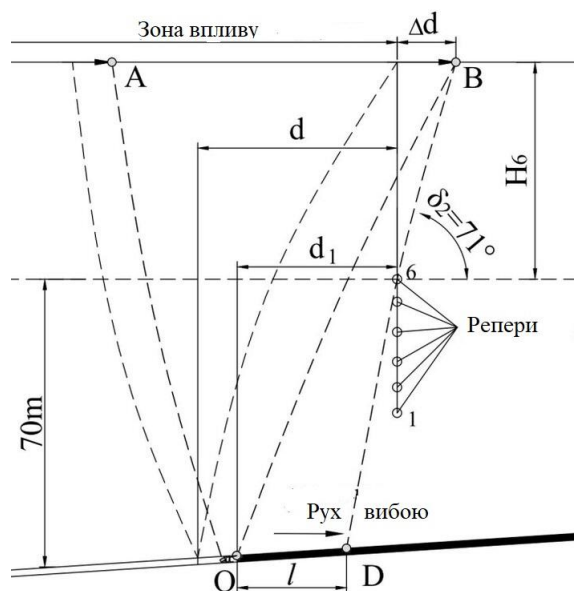


Рис. 1. Схема до визначення межі зони підвищеного гірського тиску з боку незайманого масиву.

У разі підходу вибою на відстань d_1 репер 6 на глибині H_6 починає опускатися. Отже, відстань $\Delta d = d - d_1$ характеризуватиме відхилення межі зони підвищеного гірського тиску від вертикальної лінії на горизонті H_6 (рис. 1, лінія BD). Кут δ_2 , що характеризує це відхилення, можна обчислити за формулою:

$$d_2 = \arctg \frac{\partial H_1}{\partial D d} \frac{\partial}{\partial t} \text{ градус.} \quad (1)$$

Оскільки опускання земної поверхні якісно відображає опускання масиву гірських порід, кути δ_2 можна отримати за вимірними значеннями осідання земної поверхні та глибинних реперів. Такий спосіб визначення меж зони підвищеного гірського тиску можна використовувати тільки за умов ведення спостережень, коли свердловина знаходилася над незайманим масивом.

За результатами аналізу вимірів (здійснено вісім спостережень у двох спостережних свердловинах), що відповідають вищеописаним вимогам, встановлено, що значення кута δ_2 становить близько 71° (в умовах рухомого очисного вибою). Діапазон зміни значень δ_2 становив $70\text{--}73^\circ$, а середньквдратичне відхилення – $0,75^\circ$. З достатньою для практичного застосування точністю межу BD

(рис. 1) можна замінити лінією, що з'єднує межу зони впливу на земній поверхні й точку в покровілі вугільного пласта, в якій вертикальні напруги відповідають напругам незайманого масиву (осідання дорівнюють нулю).

Аналогічно можна одержати межу зони підвищеного гірського тиску ОА з боку виробленого простору. Критерієм визначення цієї межі є момент, коли вертикальні напруження товщі гірських порід переходять із навантаженого стану в стан розвантаження. Цей момент характеризується різким зниженням вертикальних стиснень та подальшим інтенсивним розвитком деформацій розтягування, спричинених згинанням шарів та їх опусканням у вироблений простір. Це показано на рис. 2.

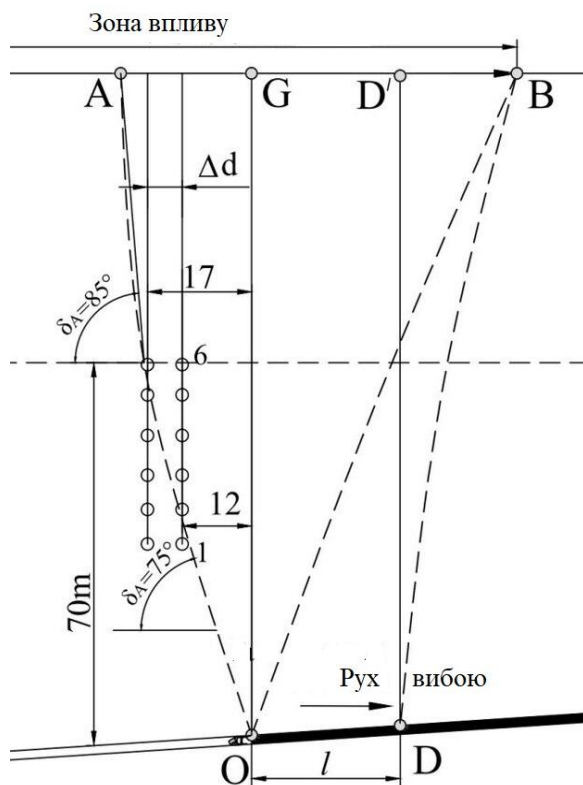


Рис. 2. Схема визначення межі зони підвищеного гірського тиску з боку виробленого простору.

Для нижніх глибинних реперів спостережної свердловини № 35 такий момент настав за віддалення вибою від осі свердловини на відстань 12 м, для верхніх – 17 м. Примітка: на рис. 2 для зручності відображення положення очисного вибою, що рухається, зафіксовано, а положення глибинних реперів зображено двічі – як результати двох спостережень, між якими вибій просунувся на відстань $\Delta d = 5$ м.

На земній поверхні межею зони ОАВ є точка із нульовими горизонтальними деформаціями та максимальним нахилом (точка А). Отже, межу зони підвищеного гірського тиску можна зобразити лінійними елементами, відкладеними від точки (лінія очисного вибою) у бік виробленого простору (рис. 2).

На рис. 2 видно, що межа ОА зони ОАВ складається із двох лінійних ділянок, що становлять з горизонталом кути δ_A : нижній – 75° , верхній – 85° . Аналогічні результати отримано за результатами геофізичних досліджень на глибині 360 м і спостережень за деформацією другого західного магістрального відкотного штрека шахти Благодатна на глибині 290 м. $\delta_A = 85^\circ$. Отже, залежності, отримані внаслідок опрацювання результатів інструментальних спостережень під час підроблення глибинних реперів, добре корелюють із результатами аналізу положення характерних точок мульди зрушення на земній поверхні.

Вага породних шарів у межах зони ОАG формує підвищений гірський тиск на ділянці OD. В умовах незайманого гірського масиву вага порід, що здійснює тиск на вугільний пласт у межах відрізка OD, визначається площею чотирикутника $S_{ODD'G}$ і щільністю порід, що вміщують γ . У результаті розроблення вугільного пласта в зоні опорного тиску спостерігається приріст вертикальних напружень за рахунок обсягу гірських порід у межах контуру ОАG, який також визначається площею S_{OAG} та щільністю гірських порід. Отже, загальний приріст гірського тиску ΔP на ділянці OD можна визначити за формулою:

$$\Delta P = \frac{S_{OAG} \times \gamma_{OAG}^{av}}{S_{ODD'G} \times \gamma_{ODD'G}^{av}}. \quad (2)$$

Враховуючи, що показники щільності гірських порід у суміжних зонах ідентичні, загальний приріст гірського тиску дорівнюватиме відношенню площ $S_{OAG}/S_{ODD'G}$. Для умов спостережної свердловини № 35 співвідношення цих площ становило $\Delta P = 1550/2970 = 0,52$ (52 %), а для умов розроблення пласта шахти Героїв Космосу (на глибині 360 м) – 0,38.

Дослідження розподілу збільшення вертикальної напруги у зоні опорного тиску

Очевидно, що значення ΔP у межах зони опорного тиску розподілено нерівномірно. Враховуючи взаємозв'язок між осіданнями гірського масиву та підвищеним гірським тиском, можна стверджувати, що функція розподілу опорного тиску ідентична до функції розподілу осідань над крайовою частиною пласта.

Дослідимо характер розподілу осідань земної поверхні у зоні впливу, обмеженій точками G та B (рис. 2). Інтерес становлять не самі значення осідань земної поверхні, а лише їх розподіл на ділянці, яка підлягає дослідженню. Для аналізу використано результати інструментальних спостережень на земній поверхні за спостережними станціями № 5, 8–10, 13 (Західний Донбас), а також результати опускання глибинних реперів у спостережних свердловинах № 35 та № 2. Для зведення графіків осідань до одиничних планових розмірів вико-

ристано коефіцієнт масштабування, що дорівнює $1/L_{GB}$ (де L_{GB} – довжина відрізка GB за даними інструментальних спостережень). Межу напівмульди з боку масиву (точка B) визначено за відомими критеріями [Кучин, 2011]. Оскільки інтерес становить лише розподіл, масштабування графіків по осі осідань здійснимо для збігу кривих за різними спостереженнями. Загалом проаналізовано 11 результатів спостережень, розподіл осідань за якими наведено на рис. 3, а. Коефіцієнти типової функції осідань визначено за методикою [Правила..., 2003].

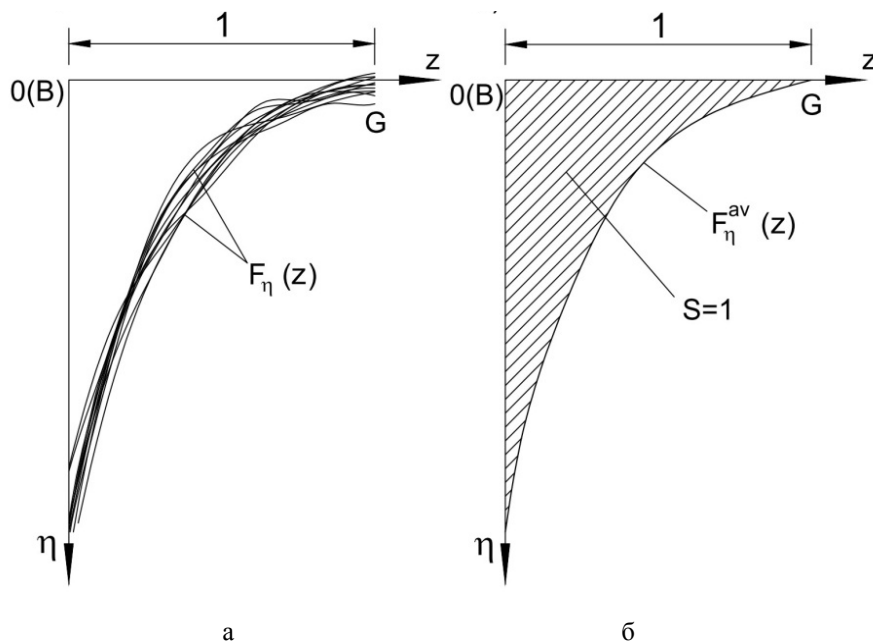


Рис. 3. Функція розподілу осідань над крайовою частиною вугільного пласта: а – за результатами спостережень, б – усереднена.

Усереднену криву (рис. 3, б) відмасштабуємо по осі осідань так, щоб площа S дорівнювала 1 (рис. 3, б). Унаслідок таких перетворень функція $F_η^{av}(z)$ визначає приріст гірського тиску за рахунок ваги порід контуру OAG у межах зони опорного тиску. Коефіцієнти цієї функції наведено у таблиці.

Коефіцієнти функції $F_η^{av}(z)$

z	$F_η^{av}(z_i)$	z	$F_η^{av}(z_i)$
0	3,651	0,6	0,428
0,1	2,587	0,7	0,293
0,2	1,868	0,8	0,185
0,3	1,297	0,9	0,090
0,4	0,886	1	0,000
0,5	0,615		

Розподіл відносного приросту гірського тиску в довільній точці на ділянці OD можна отримати за формулою:

$$DP_i = F_η^{av}(z_i) \times \frac{S_{OAG}}{S_{ODD'G}}, \quad (3)$$

де $z_i = x_i/l$ (рис. 4), $F_η^{av}(z_i)$ – коефіцієнти функції приросту гірського тиску (див. таблицю).

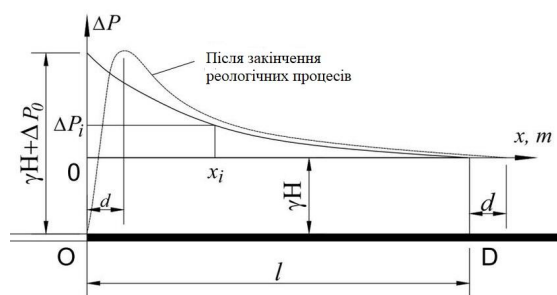


Рис. 4. Схема визначення приросту вертикальної напруги ΔP у зоні опорного тиску.

Для умов спостережної свердловини № 35 (спостережна станція № 13) максимальне значення відносного приросту гірського тиску, обчислене за формулою (3), становило $\Delta P_0 = 3,651 \cdot 1550 / 2970 = 1,90$. Внаслідок перерозподілу гірського тиску навантаження на крайову частину вугільного пласта зросло в 2,9 разу щодо навантажень в умовах незайманого масиву. Це значення відповідає класичному уявленню про максимальну напругу в зоні опорного тиску, яка перевищує напругу в незайманому масиві в 2–5 разів. Для умов розроблення вугільного пласта на глибині 360 м максимальне значення ΔP_0 становило 1,47.

Зменшення приросту гірського тиску пов'язане зі збільшенням обсягу гірських порід у межах контуру OAG, що мають більшу об'ємну вагу. Отже, об'єктивніше обчислити значення функції ΔP можна з урахуванням щільності порід у межах контурів OAG та ODD'G:

$$\Delta P_i = F_h^{av}(z_i) \times \frac{S_{OAG} \times \gamma_{OAG}^{av}}{S_{ODD'G} \times \gamma_{ODD'G}^{av}}. \quad (4)$$

Спосіб урахування об'ємної ваги гірських порід, реалізований у формулі (3), дає змогу підвищити достовірність розрахункових значень ΔP , але істотно збільшує трудомісткість математичних операцій з визначення середньозваженого значення γ^{av} .

Функція розподілу величин ΔP (4) справедлива для умов очисного вибою, що рухається, коли розвиток реологічних процесів здійснюється повільно. Як зазначено вище, зниження швидкості просування вибою або його зупинка призводить до руйнування крайової частини вугільного пласта і порід покрівлі, що спричиняє зниження вертикальних напружень і утворення області розвантаження. Максимум опорного тиску зміщується на відстань d (рис. 4) від межі виробленого простору, а дальність l зони опорного тиску збільшується. І навпаки, великі швидкості просування очисного вибою призводять до переміщення точки з максимальною вертикальною напругою у бік виробленого простору. Про це свідчить зміна значень осідань земної поверхні над лінією очисного вибою η_3 зі збільшенням швидкості його просування v [Кучин, 2011]. Зі збільшенням v осідання земної поверхні над вибоєм знижуються, а точка перегину кривої осідань переміщується у бік виробленого простору.

Отже, відстань d можна визначити на основі залежності положення точки перегину кривої осідань від швидкості просування очисного вибою. Наприклад, за швидкості просування лави 60 м/міс

точка перегину кривої осідань розташована на відстані $0,22H$ від очисного вибою, що рухається. Після зупинки ця відстань зменшується до $0,11H$. За глибини підробки $H = 360$ м відстань d становитиме $(0,22-0,11) \cdot 360 = 39$ м. За результатами дослідження [Мониторинг состояния выработок..., 2011], прояви гірського тиску у вентиляційному штреку № 3 пл. с₁₀ шахти Героїв Космосу ($H = 360$ м), відстань від межі виробленого простору до точки з максимальним опорним тиском становила 30–40 м, що добре узгоджується із вищезазначеним результатом.

Для використання формули (3) в умовах процесу зрушення, що вже закінчився, початок координат (рис. 4) необхідно перемістити в бік незайманого масиву на відстань $0,11H$.

Приріст гірського тиску із віддаленням від покрівлі пласта пропорційно зменшується, водночас збільшується розмір зони підвищеного гірського тиску. Для визначення довжини зони підвищеного гірського тиску на висоті h від покрівлі пласта, що розробляється, можна скористатися отриманими раніше геометричними параметрами області підвищеного тиску (рис. 5).

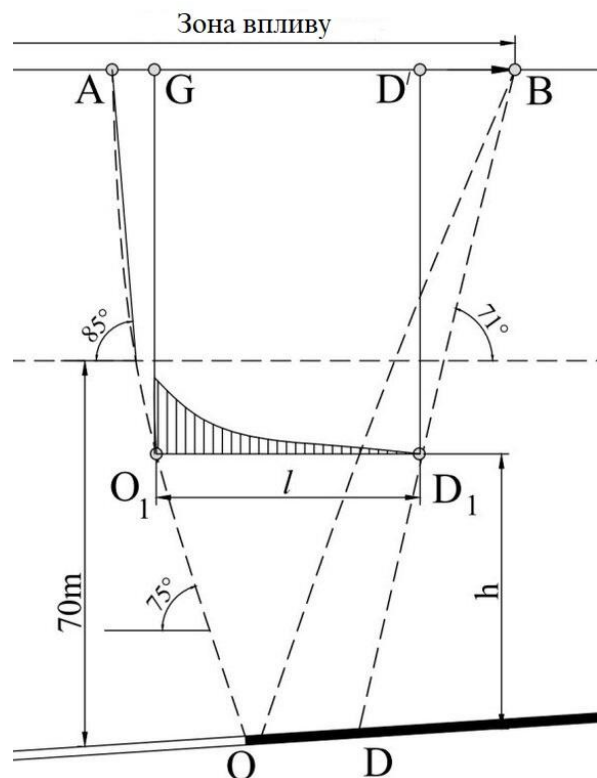


Рис. 5. Схема для визначення приросту гірського тиску ΔP на висоті h від покрівлі вугільного пласта.

Для умов спостережної станції № 13 максимальне значення приросту гірського тиску ΔP_0 на

висоті $h = 50$ м від покрівлі вугільного пласта становило 0,36. На висоті 70 потужностей, які виймають, величина ΔP_0 зменшується до значення 0,1, що свідчить про практично повне припинення приросту гірського тиску в цих гірничо-геологічних умовах.

Необхідно зазначити, що запропонована схема розрахунку та кутові параметри справедливі тільки для перерізу, паралельного до напрямку просування очисного вибою.

Наукова новизна і практична значущість

Встановлено емпіричні коефіцієнти функції розподілу вертикального напруження у межах зони опорного тиску.

На основі аналізу маркшейдерських інструментальних спостережень за зрушенням масиву, що підробляється, уточнено геометричні параметри зони підвищеного гірського тиску. Запропоновано методику визначення коефіцієнта приросту напруження над рухомим очисним вибоєм у разі умов шахт Західного Донбасу.

Висновки

1 Виконано аналіз результатів геодезичних спостережень за опусканням земної поверхні та маркшейдерських замірів зрушення масиву гірських порід.

2. Встановлено взаємозв'язок між опусканням земної поверхні попереду очисного вибою, що рухається, і значеннями приросту напружень у крайовій частині очисної виробки.

3. Достовірність отриманих результатів підтверджують геофізичні дослідження у Західному Донбасі, а також результати натурних спостережень.

4. Плановані майбутні дослідження – розроблення методики визначення коефіцієнта приросту напруження із боку виїмкових штреків та динаміки його змінення під час проходження вибою лави.

Список літератури

Chen, B., Li, Z., Yu, C., Fairbairn, D., Kang, J., Hu, J., & Liang, L. (2020). Three-dimensional time-varying large surface displacements in coal exploiting areas revealed through integration of SAR pixel offset measurements and mining subsidence model. *Remote Sens. Environ.*, 240, 111663. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111663>

Chen, L., Zhang, L., Tang, Y., & Zhang, H. (2018). Analysis of mining-induced subsidence prediction by

exponent Knothe model combined with INSAR and leveling. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, (4)3, 53–59. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-53-2018>

Dai, H., Li, P., Marzhan, N., Yan, Y., Yuan, C., Serik, T., Guo, J., Zhakypbek, Y., & Seituly, K. (2022). Subsidence control method by inversely-inclined slicing and upward mining for ultra-thick steep seams. *Int J Min Sci Technol.*, 32(1), 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.10.003>

Elashiry, A. A., Gomma, W. A., & Imbaby, S. S. (2009). Numerical modeling of surface subsidence induced by underground phosphate mines at Abu-Tatur area. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, (37) 3, 699–709.

Holla, L., & Barclay, E. (2000). Mine subsidence on the Southern Coalfield New South Wales. Publications of the *New South Wales Department of Mineral Resources*, Sydney, 118 p.

Junker, M. (2006). Gebirgsbeherrschung von Flözstrecken. *Glückauf, Essen*, Germany, 172 p.

КД 12.01.01.503-2001. Управление кровлей и крепление в очистных забоях на угольных пластах с углом падения до 35°. 141 с.

Khalymendyk, Yu., Bruy, A., & Zabolotnaya, Yu. (2013). *The results of instrumental observations on rock pressure in order to substantiate complete excavation of coal reserves*. Annual Scientific-Technical Colletion. Mining of Mineral Deposits, 165–168.

Кучин, А. С. (2011). Сдвигение массива горных пород над движущимся очистным забоем в Западном Донбассе. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*, (9), 10–19. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/99673/01-Kuchin.pdf?sequence=1>

Кучин, А. С. (2011). Движение массива горных пород в Западном Донбассе. Проблемы гірського тиску: зб. наукових праць. *Донецьк: ДонНТУ*, (19), 38–61.

Kuchin, O. S., Chemakina, M. V., & Balafin I. E. (2017). Displacement of undermining rock mass above the moving longwall. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (1), 55–60. <http://nvngu.in.ua/index.php/en/component/jdownloads/finish/66-01/8599-01-2017-kuchin/0>

Lee, F. T., Abel, J. F. (1983). Subsidence from underground mining environmental analysis and planning considerations. Geological survey circular (876), 28 p. <https://www.osti.gov/biblio/6149371>

Ma, S., Li, J., & Li, Z. (2022). Critical support pressure of shield tunnel face in soft-hard mixed strata. *Transp. Geotech.*, 37, 100853. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100853>

- Мониторинг состояния выработок в зонах ПГД глубоких шахт ВАТ “Павлоградуголь” и разработка рекомендаций по поддержке выработок в этих зонах (2011). Заключительный отчет по исследовательскому проекту № 050128 /10-11/4677-U.
- Назимко, И. В. (2008). Экспериментальная оценка длины зависимости породных консолей. *Научная практика УкрНДМИ НАН Украины*, (2), 118–124.
- Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом: ГСТУ 101.00159226.001-2003 [Чинний від 2003–11–22]. Київ: Мінпаливенерго України, 2003. 126 с. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pravila_pidrobki_budivel_sporud_i_prirodnikh_obektiv_pri_vido.pdf
- Расположение, охрана и поддержка горных выработок при обработке угольных пластов на шахтах. Руководящий нормативный документ (2001). Стандарт. Київ: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України
- Sdvyzhkova, O. O., Babets, D. V., Kravchenko, K. V., & Smirnov, A. V. (2016). Determination of the displacements of rock mass nearby the dismantling chamber under effect of plow longwall. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (2), 34–42. <http://nvnгу.in.ua/index.php/en/component/jdownloads/finish/60-02/8483-2016-02-sdvyzhkova/0>
- Sepehri, M., Apel, D. B., & Hall, R. A. (2017). Prediction of mining-induced surface subsidence and ground movements at a Canadian diamond mine using an elastoplastic finite element model. *Int. J. Rock Mech. Min.*, 100, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.10.006>
- Shahsenko, O. M., Khoziaikina, N. V., & Tere-shchuk, R. M. (2017). Distribution of displacements around a single mine working driven in stratified rock mass. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 40–46. http://nvnгу.in.ua/jdownloads/pdf/2017/06/6_2017_Shashenko.pdf
- Subsidence from coal mining activities. Background review. (2014). Department of the Environment, Commonwealth of Australia, 67 p.
- Subsidence Monitoring Program ULN SD PLN 0061 (2007). Environment & Community Management, Ulan Coal Mines Ltd, 52 p.
- Tereschuk, R., Grigoriev, O., Tokar, L., & Tikhonenko, V. (2014). Control of stability of mine workings equipped with roof bolting. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 411-415.
- Yang, D., Qiu, H., Ma, S., Liu, Z., Du, C., Zhu, Y., & Cao, M. (2022). Slow surface subsidence and its impact on shallow loess landslides in a coal mining area. *CATENA*, 209, 105830. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105830>
- Zhao, J., & Konietzky, H. (2020). Numerical analysis and prediction of ground surface movement induced by coal mining and subsequent groundwater flooding. *Int. J. Coal Geol.*, 229, 103565. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103565>
- Zheng, M., Li, S., Zhao, H., Huang, X., & Qiu, S. (2021). Probabilistic analysis of tunnel displacements based on correlative recognition of rock mass parameters. *Geosci. Front.*, 12(4), 101136. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.12.015>

Oleksandr KUCHIN¹, Hanna BRUI¹, Oleksandr YANKIN¹, Hanna ISHUTINA²

^{1*} Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskoho str., Dnipro, 49000, Ukraine
askuchin77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4031-164X>; Brui.h.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-9527-8889>;
yankin.o.ye@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0003-3208-3253>;

² Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov str, Dnipro, 49005, Ukraine; ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0665-3040>

THE RELATIONSHIP OF LOWERING THE EARTH'S SURFACE AND SUPPORTING PRESSURE ABOVE ADVANCING LONGWALL FACE

This work aims to develop a method for determining the increase in stresses above an advancing longwall face of Western Donbas mines. The paper presents a solution to the problem. It is based on the analysis of geodetic instrumental observations of the earth's surface lowering and rock mass deformation above the advancing longwall face. Length and propagation in the roof and floor of the extracted seam are the main geometrical parameters of the zone of high rock pressure. Currently, the quantitative parameters of this zone are not considered. And its length under the conditions of Western Donbas is determined with an accuracy of 50 %.

Thus, research in this direction is relevant. The experimental basis for the research includes the results of observations performed at two vertical borehole extensometers and the results of data processing obtained at more than 30 observation stations on the Earth's surface. Thus, the research specified the geometrical parameters of the zone of high rock pressure and the nature of the vertical stress distribution within this zone. The paper introduces a method to determine a coefficient of stress increase above the advancing longwall face of Western Donbas mines. We also established the empirical coefficients of the vertical stress distribution function within the abutment pressure zone. There is a relationship between the lowering of the earth's surface and the values of the stress increase in the borehole edge part. The reliability of the obtained results is confirmed by geophysical studies in Western Donbas, as well as by the results of field observations.

Key words: Earth's surface; subsidence; high rock pressure; rock pressure increment; surveying instrumental observations; borehole extensometer.

Надійшла 16.03.2023 р.