ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 504.05 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.157

© А.М. Феофанов[1]
[1]Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка Національної академії наук України, м. Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЗМУ ПРОВАЛОУТВОРЕННЯ НА ВУГЛЕНОСНИХ ТЕРИТОРІЯХ

A. Feofanov[1] https://orcid.org/0000-0003-1455-0938
[1]N. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

CHARACTERISTICS OF THE MECHANISM OF SINKHOLE IN COAL-BEARING REGIONS

Мета. Метою роботи є детальний опис особливостей механізму утворення провалів у вугільнопородному масиві у разі його можливої активізації над покинутими (старими) виробками, що збереглися на малих глибинах, або вибули з експлуатації при ліквідації шахт та приурочених до виходів вугільних пластів під наноси.

Методика. У роботі проаналізовано результати понад 200 архівних даних, що зафіксували пошкодження земної поверхні в різних вугледобувних районах Донбасу. Для аналізу було відібрано як випадки з виходом провалів на поверхню, так і випадки з загасанням куполу обвалення в породному масиві під час проведення гірничих робіт на малих глибинах, що не перевищують 160 м. Використано архівні матеріали, що отримані УкрНДМІ, Донецьким національним технічним університетом та Національним гірничим університетом.

Результати. За результатами досліджень детально розглянуто особливості механізму формування та переміщення куполу обвалення в породному масиві з урахуванням літологічних відмінностей, що його складають. Вказано потенційно небезпечні місця можливого утворення обвалів у гірничих виробках та фактори, що прискорюють або перешкоджають переміщенню куполу обвалення до земної поверхні з утворенням провалу.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає в теоретичному обґрунтуванні залежності висоти куполу обвалення від літології породного масиву, в якому розвивається обвалення, геометрії та кутів залягання гірничих виробок, що прилягають до місця обвалу з урахуванням чинників, що впливають на цей процес. Це дозволить точніше оцінювати небезпеку занедбаних підготовчих виробок (порожнин), що збереглися в приповерхневому вугільнопородному масиві.

Практичне значення. Можливе застосування отриманих результатів для оцінки ступеня небезпеки покинутих на малих глибинах підготовчих виробок (пустот) для земної поверхні і поверхневих об'єктів в зоні їх впливу. Також може бути використано при оцінці можливостей забудови територій, де є покинуті або ліквідовані гірничі роботи на малих глибинах та при грошовій оцінці нерухомості на таких територіях.

Ключові слова: *малі глибини, гірничі виробки, провали, купол обвалення, породні шари, коефіцієнт розпушення, усадка породи, нахил виробки.*

Вступ. Відомо, що гірничі виробки, розташовані поблизу виходів вугільних пластів під наносами (на глибині до 160 м), становлять небезпеку для земної

поверхні [1, 2]. Йдеться як про занедбані старі вугільні рудники, що давно вийшли з експлуатації, так і про колись діючі шахти, ліквідовані в ході реструктуризації.

Небезпека полягає в утворенні на земній поверхні провалів і локальних осідань («мікромульд») над такими виробками. Встановлено, що провали, як найнебезпечніша форма пошкодження, відбуваються над протяжними горизонтальними та вертикальними гірничими виробками, а також над окремими збереженими порожнинами. Локальні осідання у вигляді так званих «мікромульд» характерні для очисних виробок, що збереглися на малих глибинах [3–5]. Очевидно, що поверхневі об'єкти та споруди, які потрапляють у зону впливу подібних пошкоджень, деформуються або повністю руйнуються, втрачаючи свою експлуатаційну придатність.

На невеликих глибинах через низький гірничий тиск існує велика ймовірність збереження занедбаних виробок або порожнин великих розмірів. Цьому також сприяють залишки кріплення, повсюдне застосування стрічкових циліків для захисту виробок та камерно-стовпчаста система відпрацювання, що застосовувалася на дрібних шахтах епохи становлення вугільної промисловості. Згодом під впливом низки факторів відбувається активізація процесу зсуву верхнього масиву з обваленням порід у збережені виробки (порожнини). Створений при цьому купол обвалу поступово переміщується до земної поверхні. Одночасно відбувається накопичення обвалених порід на ґрунті виробки. І якщо породи за рахунок свого розпушення «підбутять» купол (заповнять повністю) ще в породному масиві, тобто спрацює так званий «принцип самопідбучування», то на земній поверхні провалу не буде. В іншому випадку, коли «принцип самопідбучування» не спрацює, купол обвалу вийде на поверхню з утворенням провалу. Власне в цьому й полягає оцінка небезпеки старих виробків, що збереглися на невеликих глибинах. Спочатку проводиться розрахунок можливої максимальної висоти розвитку куполу обвалу над виробкою, виходячи з літології породного масиву, що лежить над нею, а потім ця висота порівнюється з глибиною залягання виробки.

У поданій статті розглядаються особливості механізму утворення провалів у вугільнопородному масиві під дією факторів, що впливають на його розвиток.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На жаль, питаннями пошкоджень земної поверхні над старими гірничими виробками в Україні мало хто займається. Частково це пов'язано з реструктуризацією вугільної промисловості, що проводилася колись, а в більшій мірі — з нинішньою російсько-українською війною. Але це не означає, що проблема старих гірничих виробок через ці події вирішилася сама собою. Вона залишилася і буде нагадувати про себе десятиліттями, а, як показує геоекологія вугледобувних районів, може навіть сотню років, незважаючи на економічну та військово-політичну ситуацію в країні.

Свого часу дослідження Іофіса М. А. [6], Медянцева С. А. [7], Пальчика В. Д. [8], а також результати відповідних науково-дослідних робіт УкрНДМІ (м. Донецьк) послужили основою для розробки методики прогнозування

провалів на вугленосних територіях, яка увійшла окремим розділом до чинних на сьогодні «Правил підробки… [9]. Однак ці нормативні вимоги мають низку зауважень, які викликають сумніви щодо достовірності отриманих результатів.

Наприклад, на сьогодні у всіх розрахунках використовують вихідні дані, які колись були прийняті для певного масиву порід, і які не відображають реального стану цього масиву на момент оцінки.

Адже правильніше використовувати фактичні на момент оцінки значення опору порід стисненню R_i та відповідні їм коефіцієнти розпушення k_{pi} того чи іншого породного масиву з індивідуальним ступенем обводненості, характерним саме для цього масиву.

При оцінці ймовірності утворення провалу важливою є точність визначення не стільки літологічної приналежності того чи іншого шару, скільки його міцності на стиск на момент оцінки. Це зумовлює значення коефіцієнтів розпушення, що використовуються в розрахунках, і, зрештою, позначиться на точності самої оцінки.

Застосовуваний нині в розрахунках метод пошарового обвалення ґрунтується на принципі самопідбучування куполу обваленими породами, що залягають над локальною виробкою (порожниною), що на практиці трапляється вкрай рідко. Необхідна адаптація цього методу до умов, коли до виробки примикає додатковий простір (частина протяжної виробки, перетин двох або кількох виробок, тощо).

Мета досліджень. В умовах малих глибин розробки більш яскраво виражена диференціація властивостей порід, і суттєве значення має потужність наносів, яка може дорівнювати або бути більше глибини робіт в товщі карбону. Тому метою представлених досліджень є детальний аналіз механізму утворення провалів у породному масиві з урахуванням міцнісних властивостей порід, що обвалюються, їхніх особливостей під час розпушування та накопичення на ґрунті виробки (порожнини) залежно від місця утворення провалу в системі перехресних виробок. Це підвищить достовірність прогнозу процесу утворення провалів при його можливій активізації над покинутими (старими) виробками, що збереглися на малих глибинах, або вибули з експлуатації при ліквідації шахт та приурочених до виходів вугільних пластів під наноси.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо обвал вищележачих порід 2 у локальну виробку 1, що збереглася в приповерхневому масиві 3 (рис. 1). Породи, що обвалюються, накопичуватимуться на ґрунті виробки та в її межах. А оскільки під час обвалення вони розпушуються, збільшуючи свій об’єм за рахунок власного коефіцієнта розпушення k_p, то очевидно, що утворене склепіння (купол) буде переміщатися до земної поверхні доти, доки на висоті H не буде підтиснуте обваленими розпушеними породами.

Тобто:

$$V_1 k_p = V_1 + V_2, \quad (1)$$

де V_1 – об’єм куполу обвалення; V_2 – об’єм виробки, що збереглася; k_p – коефіцієнт розпушення вищележачих порід.

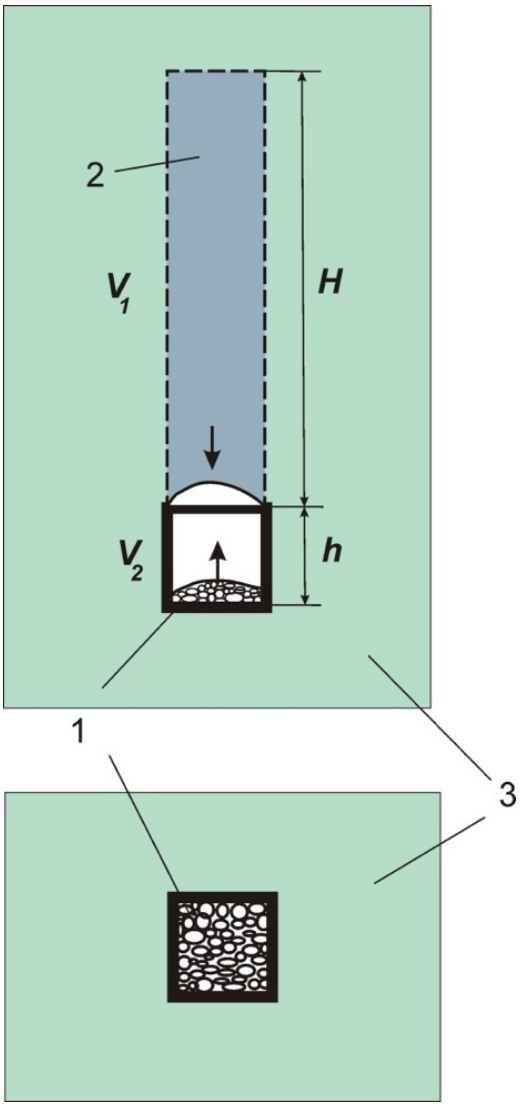


Рис. 1. Схема до розрахунку висоти куполу обрушення над локальною виробкою (пустотою): 1 – виробка (пустота); 2 – купол обвалення; 3 – породний масив

Якщо взяти в розрахунок висоти купола обрушення H кубічну виробку в 2 м, що найбільш характерно для старих покинутих виробок епохи становлення вугільної промисловості Донбасу, то $V_1 = 4H$, а $V_2 = 8$ м^3. Підставляючи ці дані у вираз (1) і вирішуючи його щодо H, отримаємо граничну висоту купола обрушення, на якій він повністю підбутиться обрушеними породами, тобто спрацює «принцип самопідбучування»:

$$H = \frac{h}{(k_p - 1)} = \frac{2}{(k_p - 1)}. \qquad (2)$$

Варто зауважити, що подібних одиночних виробок практично немає. Таке можливе лише за збереження локальних пустот після обрушення (погашення) протяжних ділянок гірничих виробок. Будь-яка гірнича виробка проводилася з певним функціональним призначенням, і є частиною мережі гірничих виробок, пов'язаних між собою. На рис. 2 представлені варіанти потенційно небезпечних місць розвитку провалів, що часто зустрічаються в занедбаних гірничих виробках на малих глибинах.

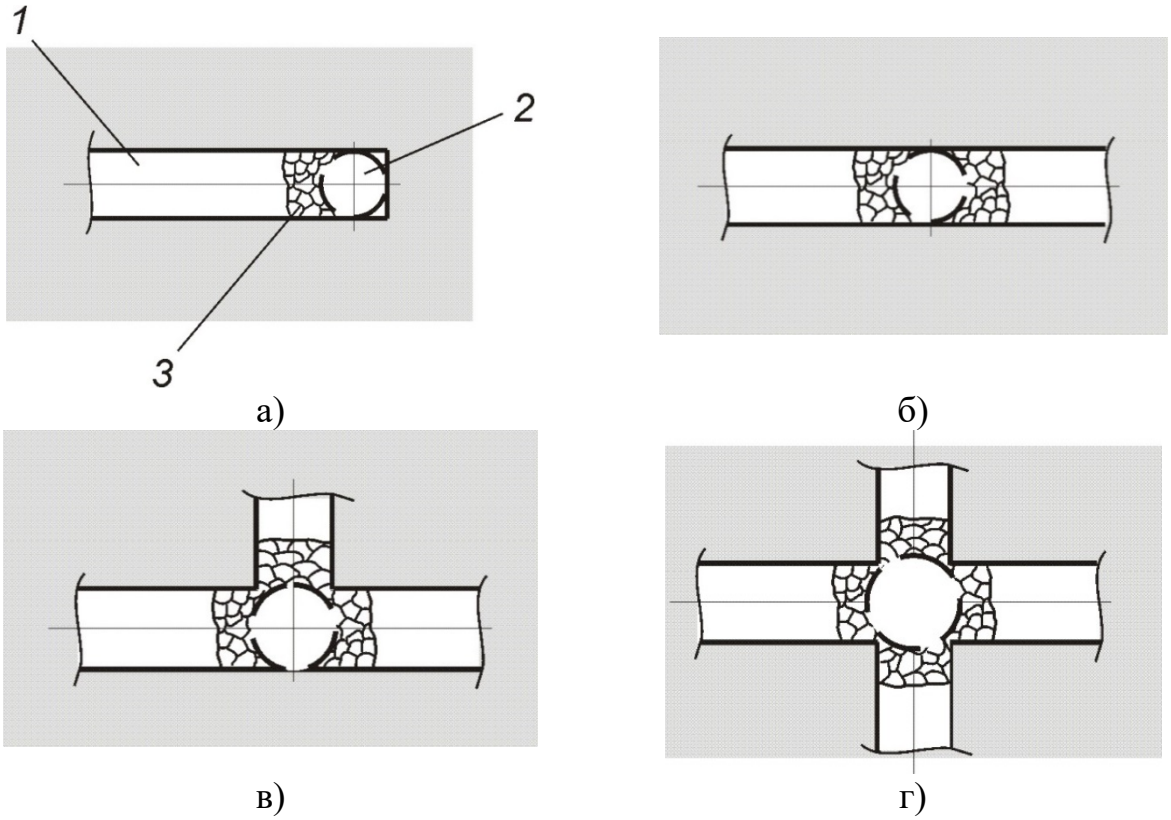


Рис. 2. Варіанти потенційно небезпечних місць розвитку провалів у занедбаних гірничих виробках у плані: а) тупикова частина виробки; б) протяжна ділянка; в) та г) перетин двох і більше виробок: 1 – виробка; 2 – купол обрушення; 3 – перерозподіл обрушеної гірської маси

Розрахункові схеми для варіантів а) та б) представлені на рис. 3 і 4. У цих умовах породи, що обрушуються, будуть накопичуватися не тільки на ґрунті виробки, але і в сусідньому просторі під кутом природного укосу ρ, у вигляді об'ємів V_3.

Розв'язання задачі щодо визначення максимальної висоти поширення куполу обрушення в прийнятих умовах призводить до наступних результатів: − для тупикової частини виробки (див. рис. 2 а та рис. 3):

$$H = \frac{3}{k_p - 1};$$

− для протяжної ділянки з двома примиканнями до місця провалу (див. рис. 2 б та рис. 4):

$$H = \frac{4}{k_p - 1};$$

− для т-подібного перетину виробок із трьома примиканнями до місця провалу (див. рис. 2 в):

$$H = \frac{5}{k_p - 1};$$

– для перетину двох виробок із чотирма примиканнями до місця провалу (див. рис. 2 г):

$$H = \frac{6}{k_p - 1}.$$

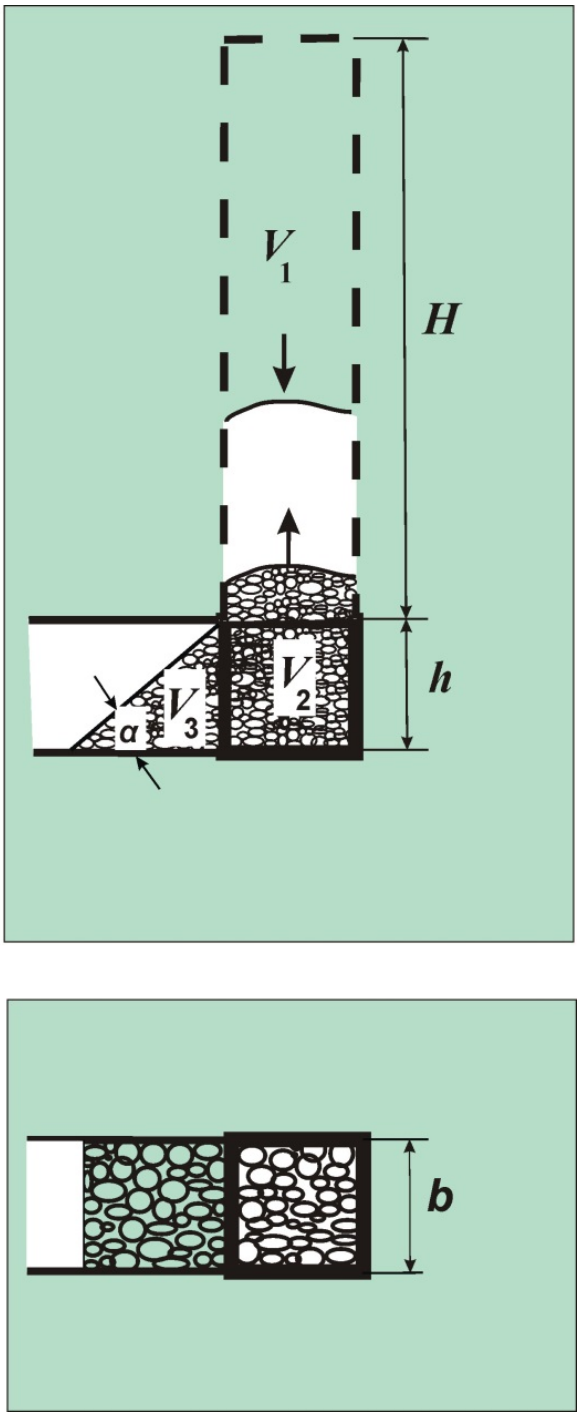


Рис. 3. Схема до розрахунку висоти куполу обрушення над тупиковою частиною виробки: 1 – виробка (пустота); 2 – купол обвалення; 3 – породний масив.

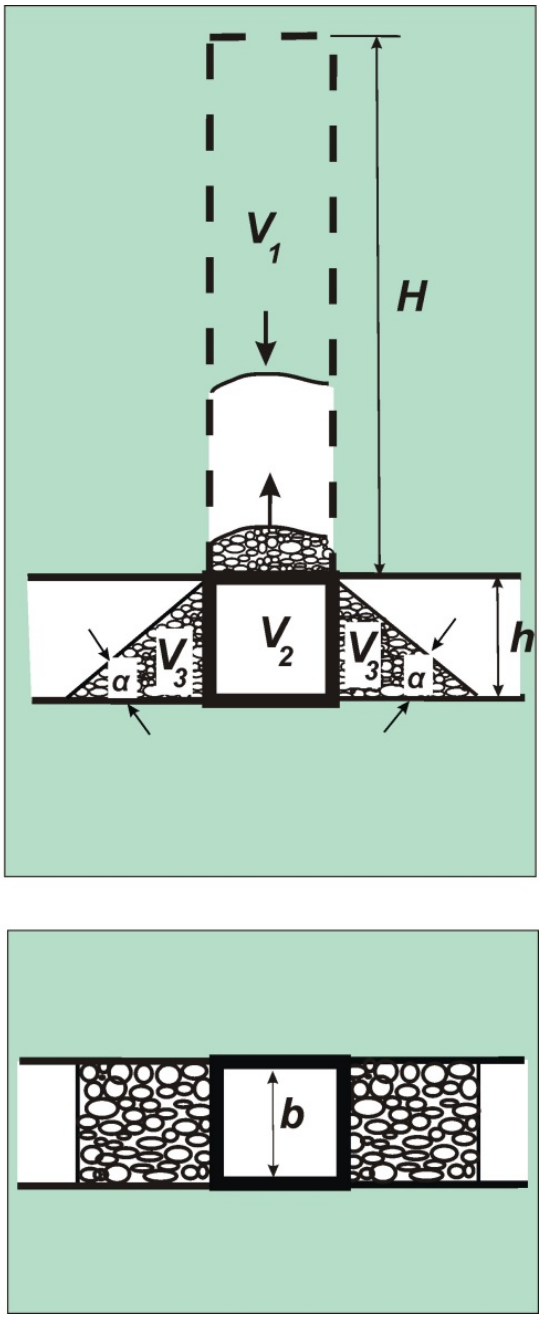


Рис. 4. Схема до розрахунку висоти куполу обрушення над протяжною ділянкою виробки: 1 – виробка (пустота); 2 – купол обрушення; 3 – породний масив

Відомо, що породний масив Донбасу складений переважно піщаниками, алевролітами та аргілітами з включеннями окремих пластів та пропластків вапняку, вуглистих сланців та власне самого вугілля. Кожен з них має свій коефіцієнт розпушення, пропорційний його міцності. Більш міцні породи мають вищий $k_р$ (табл. 1).

Результати розрахунку максимальної висоти купола обрушення у цих породах з урахуванням їх усередненого коефіцієнта розпушення та розташування місця обрушення у виробці представлені у таблиці 2.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів розпушування основних літологічних різниць Донбасу

Порода	Коефіцієнт розпушення		Усадка
	k_P свіжообрушеної породи середній	k_{PO} залишковий середній	гранична середня, %
Піщаник	1,50–1,80 1,65	1,25–1,30 1,28	17–28 22,5
Алевроліт (піщаний сланець)	1,20–1,80 1,5	1,10–1,20 1,15	8–33 20,5
Аргіліт (глинистий сланець)	1,15–1,55 1,35	1,10–1,15 1,13	4–26 15

Таблиця 2

Максимальна висота куполу обрушення в породах покрівлі

Місце провалу	Літологія покрівлі	Середній коефіцієнт розпушення свіжообрушеної породи k_p	Висота куполу обрушення	
			у свіжообрушених породах, м	після усадки порід, м
Локальна пустота	Піщаник	1,65	3,1	7,1
	Алевроліт	1,50	4,0	13,3
	Аргіліт	1,35	5,7	15,3
Тупикова частина виробки	Піщаник	1,65	4,6	10,7
	Алевроліт	1,50	6,0	20,0
	Аргіліт	1,35	8,6	23,1
Протяжна ділянка	Піщаник	1,65	6,1	14,3
	Алевроліт	1,50	8,0	26,7
	Аргіліт	1,35	11,4	30,8
Т-подібний перетин виробок	Піщаник	1,65	7,7	17,9
	Алевроліт	1,50	10,0	33,3
	Аргіліт	1,35	14,3	38,5
Перетин двох виробок	Піщаник	1,65	9,2	21,4
	Алевроліт	1,50	12,0	40,0
	Аргіліт	1,35	17,1	46,1

Діаграми максимальних висот розвитку куполів обрушення в основних породних шарах покрівлі (піщаник, алевроліт, аргіліт) до їх повного підбучування як при свіжообрушених породах (k_P), так і після їх усадки (k_{PO}**)** представлені на рис. 5, 6 та 7.

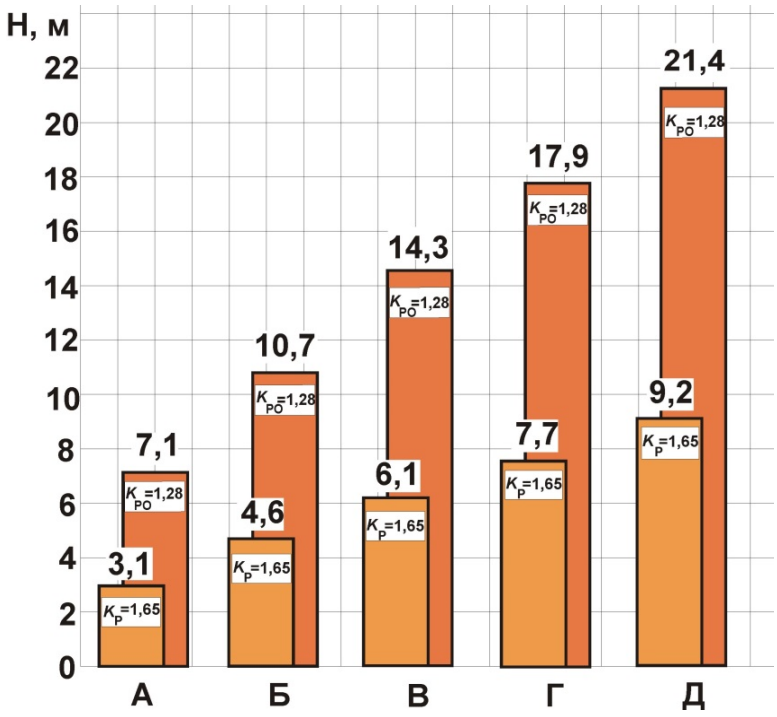


Рис. 5. Максимальний розвиток висоти купола обрушення в піщанику до його повного підбучування у свіжообрушених породах ($k_р$) та після усадки ($k_{ро}$): А – локальна пустота; Б – тупикова частина виробки; В – протяжна ділянка з двома примиканнями; Г – Т-подібний перетин виробок; Д – перетин двох виробок

Очевидно, що в міцних породах, що відрізняються вищим значенням коефіцієнта розпушення, механізм підбучування обрушеними породами відбувається швидше, і відповідно на меншу висоту переміщується купол обрушення в породному масиві. Власне цим у першу чергу пояснюється той факт, що у вугледобувних районах з високим ступенем метаморфізму (катагенезу порід, що вміщають) провали, як правило, походять від виробок, що залягають на глибинах не більше 50–60 м.

Це райони Східного Донбасу з антрацитовим (А) та напівантрацитовим (ПА) вугіллям. І навпаки, у маломіцних породах через низький коефіцієнт розпушення обрушені породи не встигають підбутити купол в масиві, і він переміщається до поверхні, утворюючи провал. У районах Західного Донбасу, де переважно залягає низькометаморфізоване вугілля марок Д, Г, покинуті виробки, як показує практика, можуть становити небезпеку з глибин до 160 м.

Оскільки залягаючий над занедбаною виробкою породний масив є багатошаровий «пиріг» з літологічних різниць, згаданих вище, і сам процес обрушення відбувається поступово від шару до шару протягом тривалого часу з усадкою обрушених порід, то в розрахунках висоти куполу обрушення логічно застосовувати залишковий коефіцієнт розпушення ($k_{РО}$), який менший за звичайний коефіцієнт розпушення ($k_Р$) і найбільш адекватний механізму провалоутворення. При цьому висоти куполів обрушення збільшуються, отже, збільшується глибина, з якою на поверхні може утворитися провал.

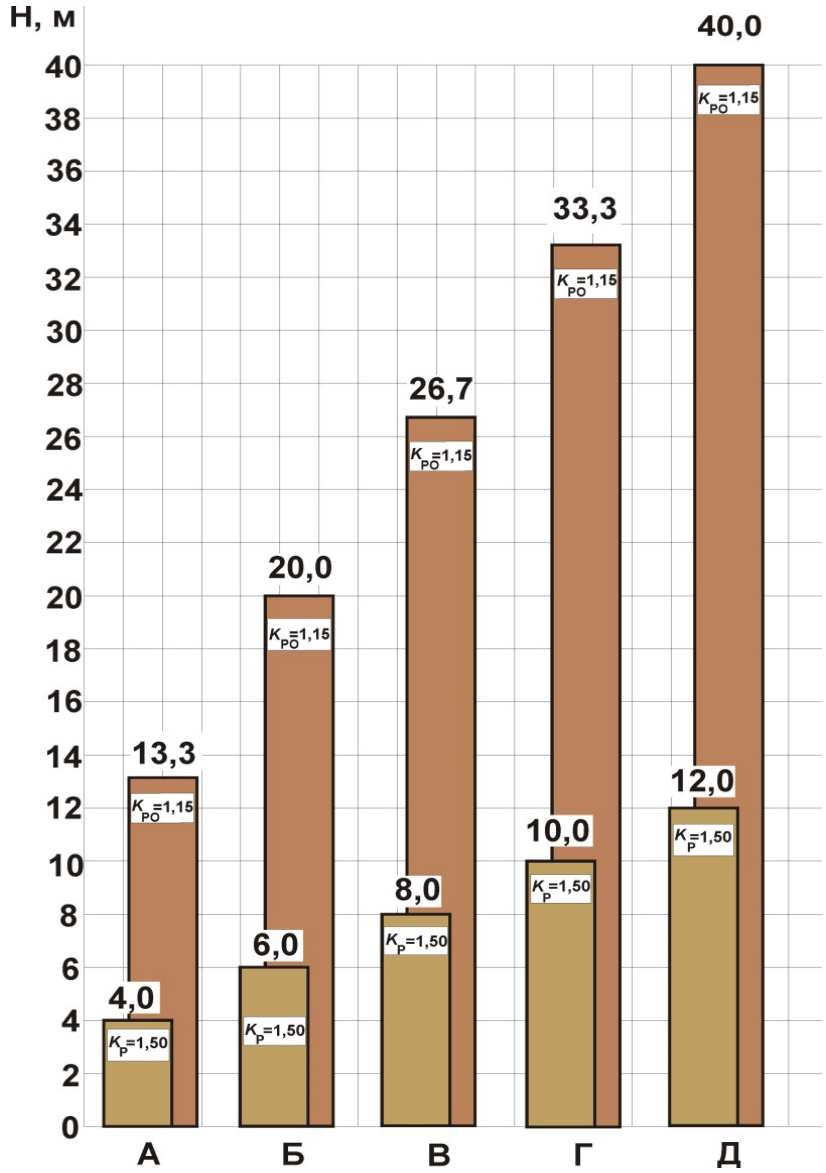


Рис. 6. Максимальний розвиток висоти купола обрушення в алевроліті до його повного підбучування у свіжообрушених породах ($k_р$) та після усадки ($k_{ро}$): А – локальна пустота; Б) – тупикова частина виробки; В – протяжна ділянка з двома примиканнями; Г – Т-подібний перетин виробок; Д – перетин двох виробок.

Варто зазначити, що провалоутворюючі процеси над занедбаними гірничими виробками приурочені до малих глибин (0–160 м). А це здебільш зона вивітрювання з потужністю від 0 до 100 м з розпушеними, розущільненими породами різного ступеня вивітреності. Тобто породи однієї літологічної приналежності, але залягають на різних глибинах можуть мати різні коефіцієнти розпушення. Тому при розрахунку висоти куполу обрушення важливо визначати коефіцієнт розпушування кожного шару окремо.

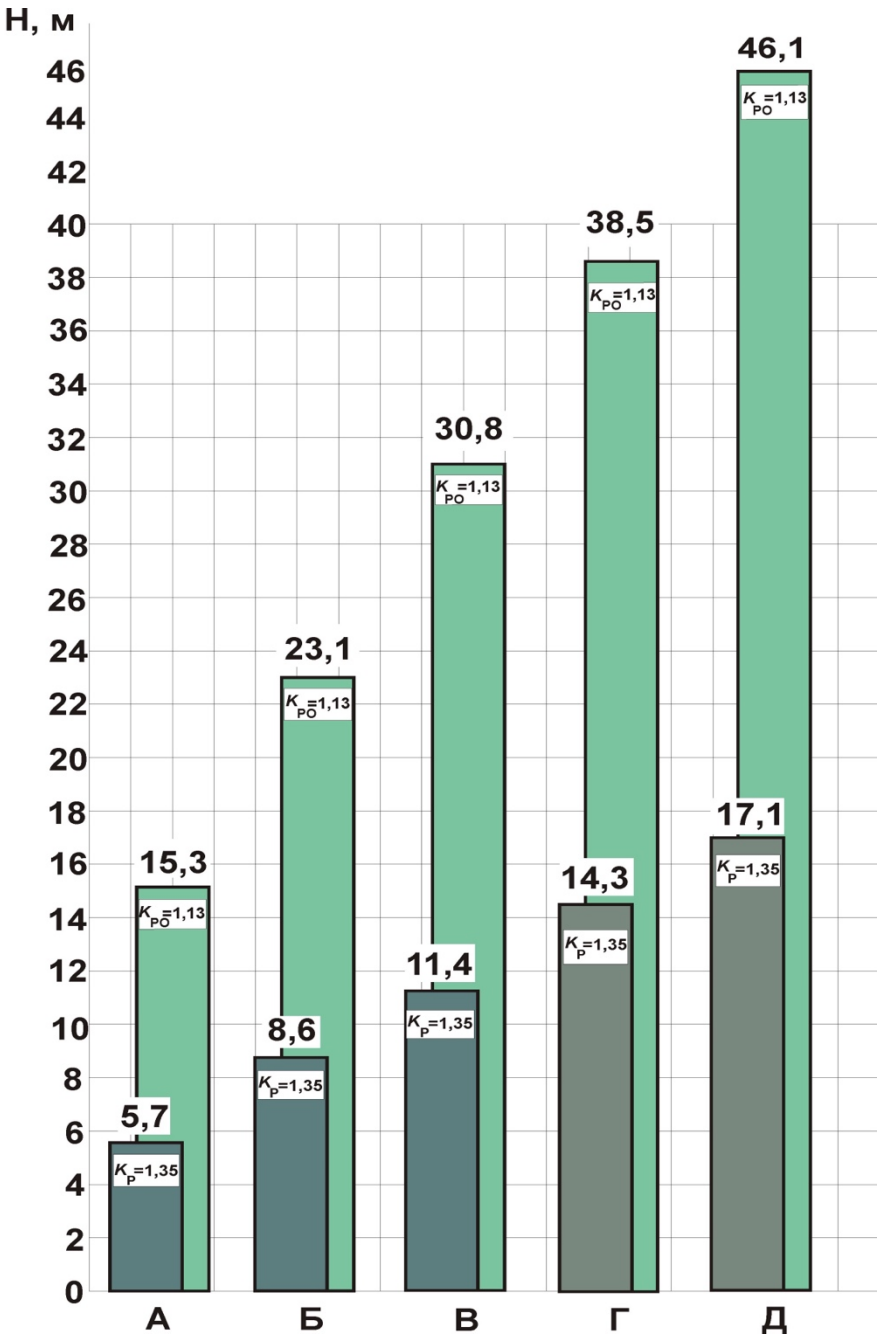


Рис. 7. Максимальний розвиток висоти купола обрушення в аргіліті до його повного підбучування у свіжообрушених породах ($k_р$) та після усадки ($k_{ро}$): А – локальна пустота; Б – тупикова частина виробки; В – протяжна ділянка з двома примиканнями; Г – Т-подібний перетин виробок; Д – перетин двох виробок.

Важливим фактором, що впливає на висоту розвитку куполу обрушення при активізації занедбаних гірничих виробок, є наявність або відсутність додаткового простору для прийому обрушеної гірської маси. Одна справа, коли породи, що обрушуються, скупчуються тільки на ґрунті локальної виробки або порожнечі і в межах утвореного куполу (див. рис. 1). При цьому збільшується ймовірність самопідбучування, а отже, менше шансів утворення воронки провалу на поверхні.

Зовсім інша справа, коли до місця провалу примикає одне або кілька (див. рис. 2 в, г і див. рис. 3, 4), додаткових просторів (місця перетину двох або кількох виробок). У таких випадках породи, що обрушуються, спочатку будуть розподілятися в цих просторах під кутом природного укосу, а після почнуть заповнювати купол обрушення, що утворився, який за цей час встигне переміститися ближче до земної поверхні. При цьому ймовірність його самопідбучування зменшується, а ймовірність виходу на поверхню з утворенням провалу збільшується в залежності від глибини залягання і міцності порід, що обрушуються.

Ще один істотний фактор, що впливає на розвиток куполу обрушення − кут падіння порід і самої виробки, над якою відбувається обрушення. Зі збільшенням кута залягання виробки і (або) простору, що примикає, збільшується час заповнення цього простору обрушеними масами до того моменту, поки вони не почнуть заповнювати купол обрушення, що утворився. При цьому малоймовірне самопідбучування куполу і велика ймовірність його виходу на поверхню з утворенням провалу. Цим пояснюється той факт, що на крутозалягаючих пластах (Центральний Донбас, Горлівсько-Єнакіївська агломерація) найбільш небезпечними по провалах є ділянки, розташовані вздовж ліній виходів пластів під наноси, де одночасно відбувається сповзання запобіжних циліків, і переміщення обрушених порід на нижчі горизонти.

Не варто забувати, що на шляху руху купола обрушення до земної поверхні деякі фактори можуть перешкоджати або зупиняти його подальший розвиток (міцні пласти вапняків і пісковиків), прискорювати його переміщення і збільшувати розміри майбутнього провалу (обводненість, зони розмивів, дрібної тріщинуватості, пливуни, виробки і пустоти, що залягають вище) і навіть змінювати напрямок переміщення куполу обрушення при зустрічі з тектонічним порушенням.

Обговорення результатів та висновки. Механізм утворення провалів на територіях, підроблених старими (занедбаними) гірничими виробками, що збереглися на малих глибинах і приурочених до виходів вугільних пластів під наноси, неоднозначний і, залежно від гірничо-геологічної ситуації, що склалася на момент оцінки, має ряд характерних особливостей.

А саме:

1. Утворення куполу обрушення в породному масиві над збереженою виробкою (порожнечею) відбувається одночасно з накопиченням на ґрунті виробки (порожнечі) обрушених порід. Обрушені породи збільшуються в об’ємі, і залежно від літологічної приналежності мають свій коефіцієнт розпушення. Чим більше міцних породних шарів з високим коефіцієнтом розпушення залягає над виробкою (порожнечею), тим швидше спрацює принцип самопідбучування, тим менша ймовірність утворення провалу на поверхні. І навпаки, у маломіцних породних масивах, що відрізняються низькими коефіцієнтами розпушення, склепіння обрушення не встигає підбутитись, що збільшує шанси його виходу на поверхню.

2. Будь-який вільний простір, що примикає до місця обрушення, накопичуватиме в собі обрушені породи, віддаляючи тим самим самопідбучування купола обрушення і збільшуючи можливість утворення провалу на поверхні. Важлива не тільки глибина залягання та розміри оцінюваної на можливість провалу

виробки, а й детальне вивчення гірничо-геологічної ситуації, що склалася в породному масиві, що залягає над виробкою. Вона може суттєво відрізнятися у прилеглих ділянок та змінюватися з часом.

3. Коефіцієнти розпушення свіжообрушених порід, що застосовуються в розрахунках, не гарантують точності результату оцінки. Так як формування куполу обрушення в породному масиві та переміщення його до поверхні є тривалим процесом, то логічніше застосовувати залишкові коефіцієнти розпушування, що відображають реальний стан масиву на момент оцінки.

Перелік посилань

1. Medyantsev, S.A. (1983). Sdvizheniye zemnoy poverkhnosti nad vyrabotkami starykh shakht v Donbasse. *Ugol' Ukrainy,* 7, 20–22.
2. Medyantsev, S.A. (1993). Prognoz sdvizheniya gornykh porod nad vyrabotkami. *Ugol' Ukrainy,* 12, 25–26.
3. Feofanov A.N. (2013). O parametrakh povrezhdeniy zemnoy poverkhnosti nad zabroshennymi gornymi vyrabotkami. *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukrainy: zb. nauk. pr. Donets'k*, (12), 62–82.
4. Феофанов А.М., Стрельник, Ю.В. (2023). Покинуті гірничі виробки як геоекологічний фактор вуглепородного видобутку в Донбасі. *Наукові праці ДонНТУ, Серія гірничо-геологічна*, 1(29), 39–48. https://doi.org/1031474/2073-9575-2023-1(29)-39-48
5. Феофанов А.М. (2025). Кількісна оцінка деформацій земної поверхні над покинутими очисними виробками. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (83), 105−115. https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.105
6. Iofis M.A., Shmelev A.I. (1985). Inzhenernaya geomekhanika pri podzemnykh razrabotkakh. *Nedra*, 248.
7. Medyantsev S.A. (1986). Otsenka vliyaniya na zemnuyu poverkhnost starykh gornykh vyrabotok ugol'nykh shakht. *Razrabotka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh: pecn. mezhved. nauch.-tekhn. sb.* (73), 55–59.
8. Pal'chik V.D. (1993). O vysote zony obrusheniya porod nad starymi vyrabotkami pod Donetskom. *Ugol' Ukrainy*. (6), 53.
9. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом (2004). *ГСТУ 101.00159226.001–2003.* (Нормативний документ Мінтопенерго України), 128.

ABSTRACT

Purpose. The aim of this study is to provide a detailed description of the mechanism of sinkhole formation in the coal-rock massif – specifically regarding potential activation above abandoned (old) workings located at shallow depths or left behind during mine decommissioning – where coal seams subcrop beneath the overburden.ps under deposits.

Methodology. This study analyzes data from over 200 archival records documenting surface damage in various coal-mining areas of the Donbas. The analysis included cases where sinkholes reached the surface as well as instances where the collapse arch stabilized within the rock mass during mining operations at shallow depths (not exceeding 160 m). Archival materials obtained from UkrNDMI, Donetsk National Technical University, and the National Mining University were utilized.

Results. Based on the research results, dependencies were obtained for determining the maximum deformations (inclinations, curvatures, and horizontal deformations) of the earth's surface in the zone of influence of abandoned mining workings depending on the degree of metamorphism of the undermined coal massif.

Scientific novelty. Based on the study results, the specific features of the mechanism governing the formation and upward migration of a collapse arch within the rock mass are examined in detail, taking into account the constituent lithological varieties. Potential hazard zones for collapse formation in mine workings are identified, along with the factors that accelerate or impede the migration of the collapse arch toward the surface and the subsequent formation of a sinkhole.

Practical significance. The obtained results can be used to assess the hazard posed to the land surface and surface structures within the zone of influence by abandoned shallow-depth development workings (voids). They can also be applied when evaluating the development potential of areas containing abandoned or decommissioned shallow mine workings, as well as for the monetary valuation of real estate in such areas.

Keywords: *shallow depths, mine workings, sinkholes, collapse dome, rock strata, bulking factor, rock subsidence, inclination of the working.*

дата першого надходження статті до видання	14.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	17.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. A. Feofanov
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.