

УДК 622.1:622.834

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-18>

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ КУТОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗРУШЕННЯ В ЗАХІДНОМУ ДОНБАСІ

Назаренко Валентин Олексійович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри гірничої справи,
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-7704-9270

Бруй Ганна Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи,
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-9527-8889

Кучин Олександр Сергійович,

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри геодезії,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-4031-164X

Під час підземної розробки вугільних пластів відбуваються незворотні зміни в масиві гірських порід, що оточують вугільний пласт, який розробляється. Ці зміни є наслідком обвалення, осідання та горизонтального зсуву гірських порід над очисною виробкою, перерозподілу напружень у вміщуючих породах та їхнього деформування. Зміни в породному масиві спричиняють порушення земної поверхні над очисною гірничою виробкою, що виражається у зрушенні та деформуванні поверхні. Унаслідок цього на кожному гірничому підприємстві виникають завдання з охорони споруд і природних об'єктів від шкідливого впливу гірничих розробок. Гірниче законодавство України регламентує, що під час підробки наявних об'єктів необхідно встановити раціональну виїмку вугілля і, за необхідності, застосувати заходи захисту від впливу гірничих виробок. Правила раціонального виймання вугілля передбачають визначення меж зон впливу гірничих виробок і тривалості процесу зрушення земної поверхні; визначення розрахункових і припустимих показників деформацій земної поверхні для об'єктів, що підробляються; встановлення вимог щодо раціонального виймання вугілля і застосування заходів захисту об'єктів, що підробляються, від впливу гірничих виробок. Тією чи іншою мірою питання раціонального виймання вугілля залежать від надійності методів і способів прогнозу зрушень і деформацій земної поверхні, які, своєю чергою, залежать від точності визначення початкових розрахункових параметрів, до яких відносять кутові параметри процесу зрушення. Ці параметри використовуються для визначення розмірів і положення мульди зрушення на земній поверхні та побудови зон небезпечного впливу гірничих розробок.

У статті наведені результати аналітичних досліджень залежності кутових параметрів від різних гірничо-геометричних чинників, які вказують на неоднозначність і неналежну точність їх визначення. Сформульовано завдання, розв'язання яких дасть змогу збільшити надійність прогнозування впливу гірничих розробок на будівлі, споруди та природні об'єкти.

Ключові слова: вугільні пласти, очисна виробка, осідання поверхні, деформації, будівлі та споруди, мульда зрушення, кутові параметри.

Nazarenko Valentyn, Brui Hanna, Kuchin Oleksandr. Analytical studies of the angular parameters dependence of the displacement process in western Donbass

During underground mining of coal seams, irreversible changes occur in the rock mass. These changes are the result of caving, subsidence and horizontal displacement of rocks above the mine, redistribution of stresses in the host rocks and their deformation. Changes in the rock mass cause disturbance of the ground surface above the mine workings through displacement and deformation of the surface. As a consequence, every mining enterprise faces the task of protecting structures and natural objects from the harmful effects of mining operations. Mining laws of Ukraine regulate that during the mining of existing mines it is necessary to establish rational coal excavation and, if necessary, to apply protection measures against the impact of mining operations. The rules of rational coal excavation provide definition of borders of zones of influence of mine workings and duration of the process of displacement of the earth surface; definition of calculated and allowable indicators of deformations of the earth

surface for the objects under development; establishment of requirements for rational coal excavation and application of measures for protection of under development objects from the influence of mine workings. Reliability of solving the problems of rational coal excavation depends on the reliability of methods and ways of predicting the displacement and deformations of the earth surface. They, in turn, depend on the accuracy of determining the initial design parameters, which include angular parameters of the displacement process. These parameters are used to determine the size and position of the displacement trough and to construct zones of dangerous influence of mining operations. This paper presents the results of analytical studies of the dependence of angular parameters on various mining geometric factors. These studies indicate the ambiguity and insufficient accuracy of their determination. The problems, the solution of which will allow to increase the reliability of forecasting the impact of mining operations on buildings, structures and natural objects, are formulated.

Key words: coal seam, mine workings, surface subsidence, deformations, buildings and structures, displacement trough, angular parameters.

Тенденції видобутку та використання вугілля у світовій економіці свідчать про те, що його роль підвищуватиметься, особливо в паливно-енергетичному комплексі. Нині частка вугілля в електроенергетиці України становить 20–25% за середньосвітового показника 40%. Для зменшення залежності економіки України від імпорту нафти і газу передбачається подальше нарощування видобутку вугілля та збільшення його використання.

Видобуток вугілля в Західному Донбасі здійснюється ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Із 25 млрд т розвіданих запасів вугілля на балансі підприємств «ДТЕК Павлоградвугілля» перебуває понад 1 млрд т. Протяжність розроблюваної нині частини родовища за простяганням становить 58 км, а за падінням у середньому приблизно 10 км, охоплюючи площу 600 км². Значна частина цієї площі припадає на заплави річок регіону, промислові та цивільні об'єкти.

Запаси вугілля в зонах впливу гірничих робіт під об'єктами, що охороняються (цивільні та промислові будівлі та споруди, залізниці, трубопроводи тощо), становлять 412 млн т. У зону підробки потрапляють населені пункти: Благодатне, Вербки, Тернівка, Богданівка, Богуслав, Самарське, Мар'їн гай, Катеринівка, Сонцеве, Тельмана, Маломиколаївка, Миколаївка, Першотравенськ із населенням приблизно 15 тис. осіб.

Вилучення запасів вугілля під переліченими об'єктами неминуче спричинить зрушення гірських порід і деформування земної поверхні, що може негативно позначитися на стані поверхневих об'єктів у зоні впливу гірничих розробок. Гарантування безпечної підробки будівель, споруд і природних об'єктів – одне із пріоритетних завдань маркшейдерії.

Успішне розв'язання цих питань значною мірою залежить від надійності застосовуваних методів і способів прогнозу зрушень і деформацій земної поверхні, відповідності вихідних параметрів, що використовуються, для інженерних розрахунків. Значення цих параметрів визначають із результатів натурних маркшейдерських

інструментальних спостережень за зрушенням земної поверхні на спостережних станціях, які закладають над очисними виробками.

У Західному Донбасі розбіжності між фактичними, установленими за результатами маркшейдерських спостережень, і прогнозованими за нормативною методикою «Правил підробки будівель, споруд і природних об'єктів у процесі видобутку вугілля підземним способом», зрушеннями та деформаціями поверхні досягають 30% і більше. Це пояснюється тим, що вихідні параметри, які використовуються для прогнозування, установлені за результатами досліджень, які проводилися в Західному Донбасі в ранній період освоєння родовища (1963–1970 рр.).

Останніми роками значною мірою зросла глибина розроблення вугільних пластів, накопичено великий обсяг інформації про зрушення земної поверхні в нових умовах. Ці дані дають змогу розширити знання про процес зрушення земної поверхні над очисними виробками шахт Західного Донбасу й уточнити значення кутових параметрів зрушення.

Отже, уточнення кутових параметрів зрушення гірських порід і земної поверхні над очисними виробками, удосконалення методики прогнозування величин зрушень і деформацій у мульдї зрушення є актуальним науково-практичним завданням.

Розташування кутових параметрів зрушення від очисної виробки вугільного пласта показано на рис. 1 [1].

На наведеній схемі подано кутові параметри, у яких розрізняють: граничні кути ($\varphi_0, \delta_0, \gamma_0, \beta_0$); кути повних зрушень (ψ_1, ψ_2, ψ_3); кут максимального осідання θ ; кути зрушення ($\varphi, \delta, \gamma, \beta$); кути розривів ($\delta'', \beta'', \gamma''$).

Граничні кути і кути повних зрушень визначають розміри напівмульдї, отже, величини та розподіл розрахункових зрушень і деформацій у мульдї зрушення. За кутами зрушення, що визначають межу зони небезпечних деформацій, будуються запобіжні цілики під спорудами на земній поверхні. Відповідно до цього, похибки

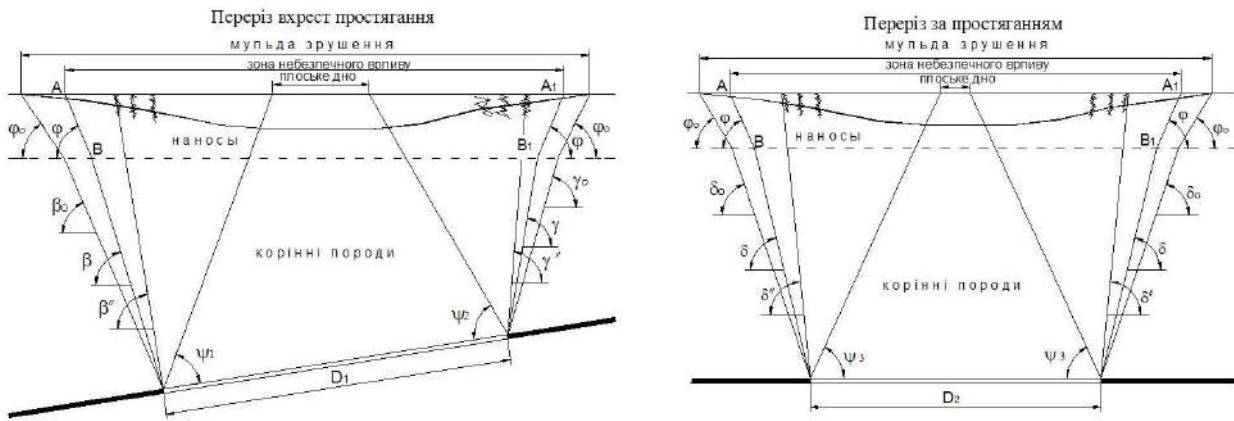


Рис. 1. Схема кутових параметрів і зон зрушення земної поверхні під час повної підробки

визначення названих кутів можуть призвести до не виправдано завищених втрат вугілля в запобіжних ціликах або до недооцінки шкідливого впливу гірничих розробок на об'єкти, що підробляються.

Прямо або побічно значення граничних кутових параметрів використовують під час розрахунків зрушень і деформацій земної поверхні. Це видно з наведеного нижче огляду найбільш відомих способів розрахунку.

Найповніше кутові параметри використовуються в методі розрахунку зрушень і деформацій земної поверхні, який отримав найбільше практичне застосування. Він базується на застосуванні типових кривих. Зокрема, методика розрахунку, викладена в чинних «Правилах підробки <...>» [1], ґрунтується на залежностях між експериментально встановленими кривими зрушень і деформацій та параметрами підробки (глибина розробки вугільного пласта, його потужність і кут падіння, наявність наносів у товщі тощо).

Метод типових кривих вирізняється простотою й універсальністю, але унеможливорює оцінку впливу гірничо-геологічних умов розробки вугільних пластів, що постійно змінюються, на процес зрушення. У результаті такого підходу дані розрахунку за методикою [1] відрізняються від фактичних параметрів процесу зрушення.

Закономірності й особливості формування мульди зрушення в різних умовах розробки пластів, що виявлені натурними маркшейдерськими спостереженнями на вугільних родовищах, послужили основою для створення аналітичних і аналітико-емпіричних методів розрахунку.

Доведено [2], що однією з головних причин недостатньої точності способів розрахунку зрушень і деформацій є прийняті на цей час критерії визначення меж мульди зрушення ($\varepsilon=i=0,5 \cdot 10^{-3}$).

В умовах пологого залягання пластів і за глибини розробки 200–500 м похибка визначення довжини напівмульди в Донбасі становить $\pm 18\%$, що призводить до значних помилок розрахованих величин.

Граничні кути за фізичним змістом мають бути узагальненими показниками фізико-механічних властивостей усієї товщі гірських порід, що зсувається. На їхні величини за тих самих геологічних умов не повинні впливати потужність пласта, що виймається, глибина його розроблення та розміри очисної виробки. Однак дослідження процесу зрушення земної поверхні, що проводилися на вугільних родовищах, вказує, що граничні кути в існуючій їхній інтерпретації залежать від багатьох чинників [3–6].

У цій суперечності закладено джерела похибок, що виникають під час визначення граничних кутів, що, своєю чергою, є причиною похибок під час розрахунків зрушень і деформацій земної поверхні з використанням граничних кутів.

Граничні кути, що визначаються за прийнятими критеріями, є суто умовними технічними поняттями, які не мають визначеного фізичного змісту [5], а значення деформацій, прийняті як критерії для визначення меж зони впливу гірничих розробок на земну поверхню, встановлені, виходячи з похибок інструментальних спостережень, і приймаються постійними за будь-яких гірничо-геологічних умов розроблення пластів [1].

Залежність граничних кутів від глибини розробки та потужності виймання пласта встановлено експериментальними й аналітичними дослідженнями [3; 6; 7]. Зокрема, зазначається, що така залежність впливає з найсуттєвішого способу розрахунку зрушень і деформацій, але ненадійність результатів розрахунку у крайових частинах мульди не дає можливості використовувати методикою [1] для визначення кутових параметрів.

У результатах досліджень граничних кутів і кутів зрушення, наведених у [8], як основний чинник, що впливає на величини кутів, вказується кратність підробки H/m . Цю залежність встановлено за результатами натурних інструментальних маркшейдерських спостережень за зрушенням земної поверхні на шахтах Донбасу [2], її ілюструють графіки на рис. 2.

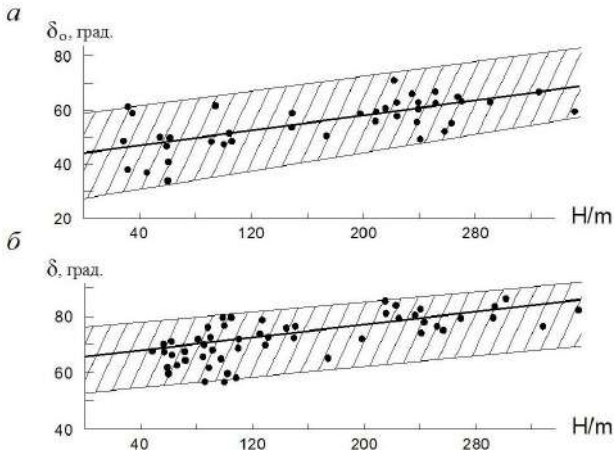


Рис. 2. Графіки залежності граничних кутів (а) і кутів зрушення (б) від кратності підробки

Натурними спостереженнями за зрушенням земної поверхні встановлено зв'язок між основними параметрами зрушення та механічними властивостями порід. На рис. 3 показано граничні кути δ_0 під час первинної підробки залежно від опору порід стисненню $\sigma_{ст}$.

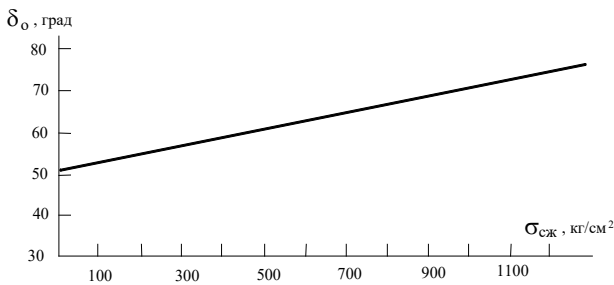


Рис. 3. Залежність зміни кута δ_0 від опору порід стисненню $\sigma_{ст}$

Залежність зміни δ_0 від $\sigma_{ст}$ виражається формулою:

$$\delta_0 = 50^\circ + 2^\circ f,$$

де $f = \frac{\sigma_{ст}}{1000 \text{ кг/см}^2}$ – коефіцієнт міцності за ММ. Протодьяконовим.

В узагальненому вигляді залежність граничних кутів і кутів зрушення від міцності порід відображено і в чинних «Правилах підробки <...>» [1]. Якщо систематизувати вугільні родовища України за ступенем метаморфізму порід, що становлять вугленосну товщу, то тенденція зростання кутових параметрів зі збільшенням міцності порід стає очевидною (табл. 1).

Дослідження [9] показали, що кутові параметри процесу зрушення залежать від того, з якого боку очисної виробки вони визначаються. Зокрема, встановлено, що під час підходу очисного вибою граничні кути крутіші, ніж у разі відходу його від цілика на $10\text{--}15^\circ$; кути повних зрушень під час відходу крутіші, ніж під час підходу, на ту саму величину.

Такого самого висновку дійшов О.С. Кучин під час дослідження граничних кутів над гірничими розробками в Західному Донбасі [4]. Він показав, що граничні кути з боку виїмкових штреків набувають проміжних значень між кутами під час відходу і підходу очисного вибою (табл. 2).

Таблиця 2

Значення кутових параметрів для шахт Західного Донбасу

Параметр	Напрямок руху лави		
	Відхід	Прохід	Підхід
<u>Граничні кути</u> δ_0 , град. Середнє значення, град.	$\frac{48-67}{57}$	$\frac{54-79}{65}$	$\frac{60-70}{66}$
<u>Кути повних зрушень</u> ψ , град. Середнє значення, град	$\frac{48-60}{52}$	$\frac{46-61}{53}$	$\frac{40-50}{44}$

Друга особливість граничних кутів, встановлена автором [10–12], полягає в залежності

Таблиця 1

Кутові параметри зрушення земної поверхні на вугільних родовищах України

Родовище, марка вугілля	Граничні кути (у корінних породах за простяганням пласта, d)	Кути зрушення (у корінних породах за простяганням пласта, d)
Донбас, марка вугілля А	75	85
Донбас, марки вугілля: Д, ДГ, Г, ГЖ, ГЖО, Ж, К, КЖ, КС, ОС, Т, ТС	70	80
Західний Донбас	65	75
Львівсько-Волинський басейн	55	75
Дніпровський буровугільний басейн	45	55

граничних кутів від глибини розробки: зі збільшенням глибини збільшуються значення граничних кутів і кутів повних зрушень. Загалом ця залежність має логарифмічний характер. Під час проведення досліджень було прийнято, що кутові параметри в наносах і корінних породах (карбоні) різняться. Як кутові параметри в наносах приймалися постійні значення кутів, регламентовані «Правилами охорони» [1].

У Західному Донбасі кутові параметри досліджувалися цілеспрямовано та комплексно. На етапі освоєння родовища О.В. Онищенко встановив відмінність граничних кутів у наносах і карбоні [5]. Запропонований метод ґрунтується на розв'язанні систем із двох лінійних рівнянь із двома невідомими. Рівняння складаються за результатами спостережень, кожне за окремою профільною лінією реперів, закладених у головному перерізі мульди на земній поверхні.

Аналогічні дослідження виконано В.О. Назаренком [5; 6]. В основу цих досліджень покладено статистичний метод, а саме регресійний аналіз результатів натурних інструментальних маркшейдерських спостережень. Автор так само показав, що кути повних зрушень варто розділяти в наносі та карбоні за аналогією із граничними кутами. Варто зазначити, що водночас не використовувалися загальноприйняті критерії деформацій земної поверхні для визначення меж впливу гірничих розробок на земну поверхню, а використовувалися загальні закономірності розподілу осідань у напівмульдах.

Великі дослідження кутових параметрів на шахтах Західного Донбасу виконані проф. Є.Г. Петруком [2]. Під час вивчення закономірностей розвитку процесу зрушення в часі було встановлено, що характерні точки кривих зрушень і деформацій мають у динамічній мульді певне положення, яке характеризується відповідними кутовими параметрами. Загальну схему цих кутів наведено на рис. 4.

В.О. Назаренко на шахтах Західного Донбасу досліджував розвиток процесу зрушення земної поверхні за площею мульди. Установлені ним закономірності не вказують на залежність розподілу осідань і нахилів поверхні від потужності наносів [5], а як основний чинник, що впливає, зазначається глибина гірничих розробок.

У роботі [12] виконано аналітичні дослідження щодо виявлення параметрів зони зсуву, спричиненого гірничими роботами під час відпрацювання запасів кам'яного вугілля. На підставі аналізу результатів чисельного моделювання встановлено загальну висоту зони зсуву за відпрацювання лави. Також встановлено, що кут обвалення покрівлі в досліджуваних умовах

становить 52° , що визначає зону впливу на топографічну поверхню в діапазоні 160 м.

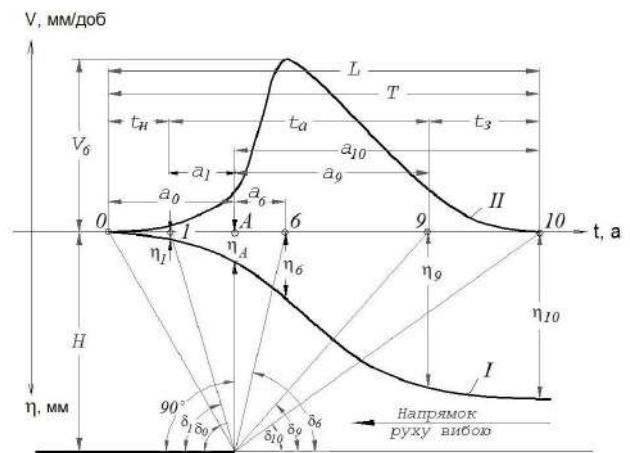


Рис. 4. Схема кутових параметрів у напівмульді над рухомим вибоєм: I – крива осідань; II – крива швидкостей осідань

Як виявляється з викладеного, кутові параметри процесу зрушення є функцією багатьох показників і повинні змінюватися зі зміною умов ведення гірничих робіт і властивостей підроблюваного масиву.

Використання сталих критеріїв і відсутність надійної методики визначення граничних кутів, кутів зрушень і повних зрушень неминуче призводять до значних похибок прогнозування впливу очисних робіт на земну поверхню й об'єкти, розташовані на ній.

Зрушення земної поверхні вивчали практично на всіх родовищах, що розробляються підземним способом. Інтерес дослідників до цієї проблеми пояснюється необхідністю забезпечення збереження та безпечної експлуатації споруд і об'єктів, розташованих у зоні впливу підземних розробок. Ці завдання актуальні і для родовища вугілля в Західному Донбасі, де під різними поверхневими об'єктами залягає понад 412 млн т вугілля.

Маркшейдерськими службами шахт і спеціалізованих організацій накопичено великий обсяг інформації про зрушення гірських порід і земної поверхні. Ці знання лягли в основу розроблених схем зрушення гірських порід і численних способів і методик прогнозування впливу очисних робіт на земну поверхню. За всього розмаїття способів розрахунку зрушень і деформацій земної поверхні в їхній основі лежать геометричні параметри, що визначають положення меж і характерних точок мульди зрушення на земній поверхні.

Особливе місце серед цих параметрів посідають граничні кути і кути зрушення, які використовують для визначення розмірів і положення

мульди зрушення на земній поверхні та побудови зон небезпечного впливу гірничих розробок. Через значущість куткових параметрів їх досліджували багато вчених, які встановили залежність граничних кутів і кутів зрушення від фізико-механічних властивостей порід масиву, що підробляється, глибини розробки, розмірів виробленого простору, напрямку ведення гірничих робіт тощо. Але, незважаючи на це, кути граничні та зрушення дотепер приймаються постійними в різних гірничо-геологічних умовах.

Зазначені факти не створюють передумов для розроблення та створення надійної, об'єктивної методики розрахунку зрушень і деформацій земної поверхні, унаслідок чого страждає безпека експлуатації підроблюваних будівель і споруд, необґрунтовано залишають у надрах розкриті запаси вугілля, створюють несприятливі й навіть шкідливі умови для довкілля.

Для усунення виявлених суперечностей і необхідно виконати комплексні дослідження куткових параметрів і вирішити такі завдання:

1) дослідити відповідність фіксованих нормативних куткових параметрів мульди зрушення фактичному положенню меж впливу та небезпечного впливу очисної виробки на земній поверхні в умовах шахт Західного Донбасу;

2) виконати дослідження впливу потужності наносів і корінних порід на позиціонування критичних деформацій, що визначають кутові параметри мульди зрушення;

3) дослідити вплив основних гірничо-геологічних і гірничо-геометричних параметрів підробки земної поверхні на положення межі зони впливу та зони небезпечного впливу очисної виробки;

4) установити закономірності зміни куткових параметрів зрушення гірських порід і земної поверхні в умовах розроблення вугільних пластів Західного Донбасу та розробити рекомендації щодо їх застосування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Правила підробки споруд, будівель та природних об'єктів при видобутку вугілля підземним способом. Галузевий стандарт / Мінпаливенерго України. 2004. 127 с.
2. Про вплив властивостей підроблюваного масиву на зрушення земної поверхні в Західному Донбасі / В.О. Назаренко та ін. *Збірник наукових праць НГА України*. 2002. № 15. С. 18–25.
3. Kratzch H. Mining subsidence engineering. Berlin : Springer Verlag, 1983. 546 S. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81923-0>.
4. Кучин О.С., Пінковський Г.С. Аналіз куткових параметрів процесу зрушень у зоні відходу лави від розрізної печі. *Науковий вісник НГА України*. 2003. № 7. С. 33–36.
5. Методика визначення куткових параметрів зрушення гірських порід на родовищах з великою потужністю наносів / В.О. Назаренко та ін. *Розробка родовищ корисних копалин*. 1992. № 91. С. 41–48.
6. Назаренко В.О., М'якенький В.І. Графо-аналітичний метод визначення куткових параметрів мульди зрушення. *Розробка родовищ корисних копалин*. 1994. № 91. С. 23–26.
7. Knothe S., Sroka A. Stochastyczna ocena wpływu eksploatacji na obiekty budowlane w procesie planowania eksploatacji górnictwa. *Bezpieczeństwo i ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych : 2nd Conference Ustroń – Zawodzie, 4–6 October 2010, Główny Instytut Górnictwa Katowice*. 2010. S. 155–173.
8. Кучин О.С. Планове положення точок з максимальними деформаціями земної поверхні. *Вісник Житомирського державного технічного університету*. 2011. Вип. III (58). С. 179–184.
9. Kratzch H. Bergschadenkunde. Deutscher Markscheider: Verein e.V., 2013. 948 S.
10. Кучин О.С. Вплив напрямку руху очисного вибою на процес зрушення у Західному Донбасі. *Вісник Житомирського державного технічного університету*. 2003. № 3. С. 196–200.
11. Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline / O. Bazaluk et al. *Scientific Reports*, 2023. № 13. P. 19327. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46814-5>.
12. The relationship between lowering the Earth's surface and bearing pressure above the advancing longwall face / O. Kuchin et al. *JGD*. 2023. № 1 (34). P. 28–36. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.028>.
13. Vu T.T., Do S.A. Determination of the rock mass displacement zone by numerical modeling method when exploiting the longwall at the Nui Beo Coal Mine, Vietnam. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. № 17. P. 59–66. <https://doi.org/10.33271/mining17.01.059>.

REFERENCES:

1. Pravyla pidrobky sporud, budivel ta pryrodnykh ob'ektiv pry vydobutku vuhillia pidzemnym sposobom [Rules for undermining buildings, structures and natural objects during underground coal mining] (2003). DSTU 101.00159226.001-2003. Kyiv: Minpalyvenerho Ukrainy. 127 p. [in Ukrainian].
2. Nazarenko, V.O., Petruk, E.H., Kuchin O.S. (2002). Pro vplyv vlastyvostei pidrobliuvanoho masyvuv na zrushennia zemnoi poverkhni v Zakhidnomu Donbasi. [On the influence of the properties of the fake

massif on the earth's surface displacement in the Western Donbass]. *Zbirnyk naukovykh prats NHA Ukrainy*. № 15. P. 18–25 [in Ukrainian].

3. Kratzch, H. (1983). Mining subsidence engineering. *Springer Verlag, Berlin*. 546 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81923-0>.

4. Kuchin, O.S., Pinkovskiy, H.S. (2003). Analiz kutovykh parametriv protsesu zrushen u zoni vidkhodu lavy vid rozriznoi pechi. [Analysis of the angular parameters of the displacement process in the zone of the longwall from the cutting furnace]. *Naukovyi visnyk NHA Ukrainy*. № 7. P. 33–36 [in Ukrainian].

5. Nazarenko, V.O., Miakenkyi, V.I., Onyshchenko, O.V. (1992). Metodyka vyznachennia kutovykh parametriv zrushennia hirsykykh porid na rodovyshchakh z velykoiu potuzhnistiu nanosiv [Methodology for determining angular parameters of rock displacement in deposits with high sediment capacity]. *Rozrobka rodovyshch korysnykh kopalyn*. № 91. P. 41–48 [in Ukrainian].

6. Nazarenko, V.O., Miakenkyi, V.I. (1994). Hrafo-analitychnyi metod vyznachennia kutovykh parametriv muldy zrushennia. [Graphical-analytical method for determining the angular parameters of the displacement trough]. *Rozrobka rodovyshch korysnykh kopalyn*. № 91. P. 23–26 [in Ukrainian].

7. Knothe, S., Sroka, A. (2010). *Stochastyczna ocena wpływu eksploatacji na obiekty budowlane w procesie planowania eksploatacji górniczej*: 2nd Conference “Bezpieczeństwo i ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych”, Ustroń – Zawodzie, 4–6 October 2010, Główny Instytut Górnictwa Katowice, P. 155–173.

8. Kuchin, O.S. (2011). Planove polozhennia tochok z maksimalnymy deformatsiamy zemnoi poverkhni [Planned position of points with maximum deformations of the earth's surface]. *Visnyk ZhDTU*. № III (58). P. 179–184 [in Ukrainian].

9. Kratzch, H. (2013). *Bergschadenkunde*, Deutscher Markscheider: Verein e.V. 948 p.

10. Kuchin, O.S. (2003). Vplyv napriamku rukhu ochysnoho vyboiu na protses zrushennia u Zakhidnomu Donbasi. [Influence of the direction of movement of the working face on the process of displacement in Western Donbass]. *Visnyk ZhDTU*. № 3. P. 196–200 [in Ukrainian].

11. Bazaluk, O., Kuchin, O., Saik, P., Soltabayeva, S., Brui, H., Lozynskiy, V. & Cherniaiev, O. (2023). Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline. *Scientific Reports*, № 13. 19327. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46814-5>.

12. Kuchin, O., Brui, H., Yankin, O. & Ishutina, H. (2023). The relationship between lowering the Earth's surface and bearing pressure above the advancing longwall face”, *JGD*. № 1 (34). Pp. 28–36. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.028>.

13. Vu, T.T., Do, S.A. (2023). Determination of the rock mass displacement zone by numerical modeling method when exploiting the longwall at the Nui Beo Coal Mine, Vietnam. *Mining of Mineral Deposits*. № 17. Pp. 59–66. <https://doi.org/10.33271/mining17.01.059>.