УДК : 622.7, 622.778
№ держреєстрації 0125U003652

Товариство з обмеженою відповідальністю
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
69008, м. Запоріжжя вул. Південне шосе 80

ЗАТВЕРДЖУЮ
проректор з науково-дослідної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
_____Володимир КУХАР
«24» вересня 2026 року

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

«Керування ризиками руйнування об'єктів поверхневої інфраструктури і порід-водоупорів внаслідок підземної газифікації вугілля»
(проміжний)

Етап 1. Визначення впливу підземної газифікації вугілля на осідання поверхні і геомеханічні процеси в породній товщі. Визначення впливу термомеханічних напружень на ширину запобіжного цілина при підземній газифікації вугілля

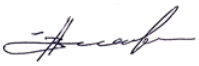
Науковий керівник, к.т.н., доцент _____Світлана САХНО
«18» вересня 2026 року

2026

Рукопис закінчено «18» вересня 2026 року

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», протокол № 1 від «24» вересня 2026 року

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, канд. техн. наук, доцент		Світлана САХНО (вступ, розділ 1,2, висновки)
Відповідальний виконавець, PhD, доцент		Ольга БОГОМАЗ (розділ 1)
Виконавець, д-р техн. наук, професор		Іван САХНО (розділ 1)
Виконавець, д-р техн. наук, професор		Валентин НАЗАРЕНКО (розділ 2-4)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Ганна БРУЙ (розділ 2-4)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Юліан ГРИГОР’ЄВ (розділ 3)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Ігор ГРИГОР’ЄВ (розділ 3)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		В’ячеслав КАМЕНЕЦЬ (розділ 3)
Виконавець, PhD		Марина БАТУР (розділ 2-3)
Виконавець,		Світлана МОЛОКОВА (розділ 3-4)
Виконавець,		Георгій НОВИЦЬКИЙ (розділ 4)

РЕФЕРАТ

ЗВІТ про НДР: 70 с., 65 джерел.

Робота присвячена геомеханічному аналізу впливу підземної газифікації вугілля на осідання земної поверхні.

Ключові слова: підземна газифікація вугілля, газифікаційна порожнина, захисний цілик, осідання, чисельне моделювання.

Об'єкт дослідження – гірський масив у зоні впливу підземної газифікації тонкого вугільного пласта і породна товща над ним.

Мета роботи – визначення впливу ширини захисних цілків між газифікаційними порожнинами на напружено-деформований стан гірського масиву, переміщення порід та осідання земної поверхні.

Предмет дослідження: закономірності формування напружень і деформацій у покривних породах та земній поверхні.

Методи дослідження: чисельне моделювання методом скінченних елементів, натурні спостереження, аналіз, синтез.

Результати та їх новизна: вперше встановлено закономірності впливу ширини захисних цілків на переміщення масиву та осідання поверхні при підземній газифікації тонкого пласта. Показано, що руйнування цілків може спричинити порушення суцільності водоносних горизонтів, притоки води до газифікаційних порожнин та негативний вплив на наземну інфраструктуру.

Інформація щодо впровадження – на етапі виконання дослідження промислове впровадження результатів не передбачалося.

Рекомендації щодо використання – результати можуть бути використані для обґрунтування параметрів технології підземної газифікації вугілля.

Сфера застосування: проєктування підземної газифікації вугілля, прогнозування зрушень і деформацій земної поверхні, забезпечення безпеки водоносних горизонтів та об'єктів поверхневої інфраструктури.

Економічна та соціально-економічна ефективність роботи: застосування результатів дослідження може сприяти зниженню екологічних ризиків газифікації, підвищенню безпеки використання та ефективнішому використанню запасів вугілля.

Значимість роботи: результати мають наукове та практичне значення для обґрунтування безпечних умов підземної газифікації.

Висновки, Встановлено, що безпечна реалізація підземної газифікації тонкого вугільного пласта значною мірою залежить від збереження несучої здатності захисних ціликів між газифікаційними порожнинами. За їх стійкого стану переміщення гірського масиву та осідання земної поверхні залишаються незначними, тоді як руйнування ціликів призводить до різкого збільшення деформацій та підвищення ризику порушення водоносних горизонтів і пошкодження поверхневих об’єктів.

ЗМІСТ

ВСТУП 7

1. ГЕОМЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ НА ОСІДАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ І СТІЙКІСТЬ ПОКРИВНИХ ПОРІД ВУГЛЕПОРОДНОЇ ТОВЩІ 9

1.1 Загальна характеристика сучасного стану ПГВ і формулювання невирішених питань технології 9

1.2 Методи та методики дослідження 11

1.3 Аналіз напружено-деформованого стану масиву і осідань поверхні внаслідок підземної газифікації 15

1.4 Висновки по розділу 1 22

2. ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ОЧИСНИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ НА ЗЕМНУ ПОВЕРХНЮ ЗА ДАНИМИ МАРКШЕЙДЕРСЬКИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ 23

2.1 Загальна характеристика напрямків відпрацювання панелей відносно елементів залягання 23

2.2 Графоаналітичний метод дослідження 23

2.3 Результати досліджень натурних маркшейдерських інструментальних вимірювань 29

2.4 Висновки по розділу 2 34

3. ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕФОРМАЦІЙ ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ В СЛАБКИХ ПОРОДАХ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ 36

3.1. Аналіз експлуатаційного стану гірничих виробок вугільних шахт 36

3.2. Характеристика об'єкта дослідження і методика дослідних робіт 38

3.3 Аналіз результатів досліджень 43

3.4. Висновки по розділу 3 45

4. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНОГО МАРКШЕЙДЕРСЬКО-ГЕОДЕЗИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПІД ЧАС МОНІТОРИНГУ ЗРУШЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ 47
4.1. Аналіз перспектив удосконалення інструментарію моніторинга зрушень земної поверхні 47
4.2. Розрахунок похибки положення віддаленого пункту підземного полігонометричного ходу 52
ВИСНОВКИ 58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 62

ВСТУП

Технологія підземної газифікації вугілля (ПГВ) має більш ніж столітню історію розвитку. Перші згадки про ПГВ відносяться до 1868 року, коли німецький учений та інженер сер Вільям Сіменс запропонував ідею газифікації вугілля безпосередньо в пласті під час виступу перед Британським хімічним товариством. Поштовхом до розробки таких технологій стало суттєве погіршення якості атмосферного повітря у промислових центрах, спричинене масовим спалюванням вугілля в період промислової революції. До останнього часу ПГВ розвивалось достатньо повільно, проте останнє десятиліття характеризується скачком розвитку цієї технології, що пов'язано з підвищенням екологічної відповідальності і політиками нульових викидів. За останній час у Великій Британії, США, країнах Європи та Китаї було реалізовано понад 50 пілотних проєктів ПГВ. Проте широкого промислового впровадження технологія не отримала.

Основною складністю практичної реалізації ПГВ є необхідність керування складними взаємопов'язаними термічними, гідравлічними, хімічними та механічними процесами, що відбуваються в масиві гірських порід навколо підземного реактора. Важливим обмеженням ПГВ є також екологічні ризики, пов'язані з утворенням підземних порожнин. Газифікація вугільного пласта призводить до перерозподілу напружень у навколишньому масиві, розвитку існуючих і формування нових тріщин, деформації та руйнування порід покрівлі. Наслідком цього можуть бути осідання земної поверхні, зрушення масиву, притоки підземних вод до реакторів та порушення гідравлічного зв'язку між водоносними горизонтами. Це створює потенційну загрозу для водних ресурсів і наземної інфраструктури.

Таким чином, безпечна та ефективна реалізація ПГВ потребує комплексного геомеханічного обґрунтування впливу утворених

порожнин внаслідок вилучення вугілля на об’єкти поверхневої інфраструктури і породну товщу. Зокрема актуальним є встановлення залежності між шириною ціликів, розподілом напружень у масиві, деформаціями покривних порід і осіданням земної поверхні.Вивчення цих питань дозволить зменшити екологічні ризики та забезпечити ефективніше використання запасів вугілля.

РОЗДІЛ 1

ГЕОМЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ НА ОСІДАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ І СТІЙКІСТЬ ПОКРИВНИХ ПОРІД ВУГЛЕПОРОДНОЇ ТОВЩІ

1.1 Загальна характеристика сучасного стану ПГВ і формулювання невирішених питань технології

Перший дослідницький проект ПГВ було реалізовано у Британії на початку XX століття, проте через початок Першої світової війни випробування не були завершені. У подальші десятиліття технологія ПГВ активно розвивалися в СРСР, США, країнах Європи та Китаї, де нині реалізується найбільш масштабна програма її впровадження [1, 2]. Загалом у світі було здійснено понад 50 пілотних проєктів з ПГВ [3, 4]. Однак, не дивлячись на це, технологія ПГВ досі не набула широкого комерційного застосування через ряд технічних та екологічних проблем [3–5].

Теоретично технологія підземної газифікації вугілля є відносно простою. Проте досвід великих польових випробувань у різних країнах останніх десятиліть демонструє, що ефективна та стабільна експлуатація на практиці є набагато складнішою [6–7]. Кожен майданчик ПГВ є унікальним, а специфічні для нього кон'юговані термо-гідро-хіміко-механічні процеси у породах, прилеглих до реактора, зазвичай погано вивчені в польових умовах через складність кількісної оцінки всіх реакцій і їх впливу на форму та обсяг реактора [8, 9]. Високі температури (>1000°C) у безпосередній близькості від реактора спричиняють складну термомеханічну поведінку породи та багатофазний потік рідини. Для стабільної роботи ПГВ критично важливо кількісно оцінити

геомеханічні реакції, пов’язані з процесом, зокрема зміну проникності, руйнування порід і реактивацію розломів [10, 11].

Окрім технічних питань, що обмежують застосування ПГВ, значну роль відіграють екологічні небезпеки. Перш за все, існує високий ризик просідання поверхні, затоплення та забруднення води через тріщинуватість та зміщення порід розкриву над порожнинами реактора. Утворення порожнин внаслідок газифікації спричиняє перерозподіл напружень у навколишніх породах, провокує ріст існуючих тріщин та утворення нових, що призводить до руйнування покрівлі реакторів, непружних деформацій порід покрівлі та притоків підземних вод до реакторів.

Для подолання цих проблем важливим є забезпечення стійкості порід над порожнинами реакторів ПГВ. Аналогічно традиційній видобувній практиці з використанням довгих лав, між реакторами ПГВ необхідно залишати захисні цілики. Розміри і несуча здатність ціликів суттєво впливають на розподіл напружень, непружне деформування порід та зсуви товщі порід і зрушення земної поверхні [12]. Окрім цього цілики є бар’єрами, що запобігають гідравлічним зв’язкам між водоносними горизонтами і виробленим простором. Будь-який гідравлічний зв'язок між реакторами ПГВ робить неконтрольованим процес підтримання тиску, температури та балансу маси рідин в процесі газифікації [3]. Таким чином, параметри захисних ціликів одночасно визначають рівень зрушень товщі покривних порід і земної поверхні, а також продуктивність газогенератора.

Наведений аналіз підтверджує важливість геомеханічного обґрунтування параметрів системи «газогенератор-цілик-покривні породи» для забезпечення контрольованого процесу підземної газифікації з одночасним забезпеченням мінімізації її негативного впливу на покривні породи, водоносні горизонти і об’єкти поверхневої інфраструктури. Тому дослідження впливу ширини запобіжних ціликів на

розподіл напружень у покривних породах, величину осідань поверхні та переміщення порід над порожнинами реакторів є актуальною науковою задачею, вирішенню якої присвячене наведене дослідження.

Метою роботи є визначення оптимальних параметрів циліків, що забезпечують безпечну реалізацію підземної газифікації вугілля, запобігають руйнуванню порід покрівлі, знижують екологічні ризики та одночасно забезпечують ефективне використання ресурсу вугільного пласта.

1.2 Методи та методики дослідження

У цьому дослідженні було розглянуто метод паралельного керованого переміщення точки дуття (КПТД) (рис. 1.1). КПТД є найбільш популярним і сучасним методом реалізації ПГВ. В цьому методі шляхом направленого буріння проводяться дві свердловини, що розгортаються паралельно одна одній у вугільному пласті. Дуттьова свердловина використовується для подачі дуттьової суміші (кисню, повітря, пари, тощо), а газовідвідну використовується для виведення газу на поверхню. Вони з'єднуються між собою в кінцевій точці, утворюючи первинний реакційний канал. Лайнер з пальником на кінці, що знаходиться всередині дуттьової свердловини, забезпечує контрольоване переміщення точки подачі дуття по мірі вигазування вугілля і падіння якості газу. Цей метод значно більш ефективний за лінійну схему газифікації з послідовним переміщенням вогневого вибою [13, 14].

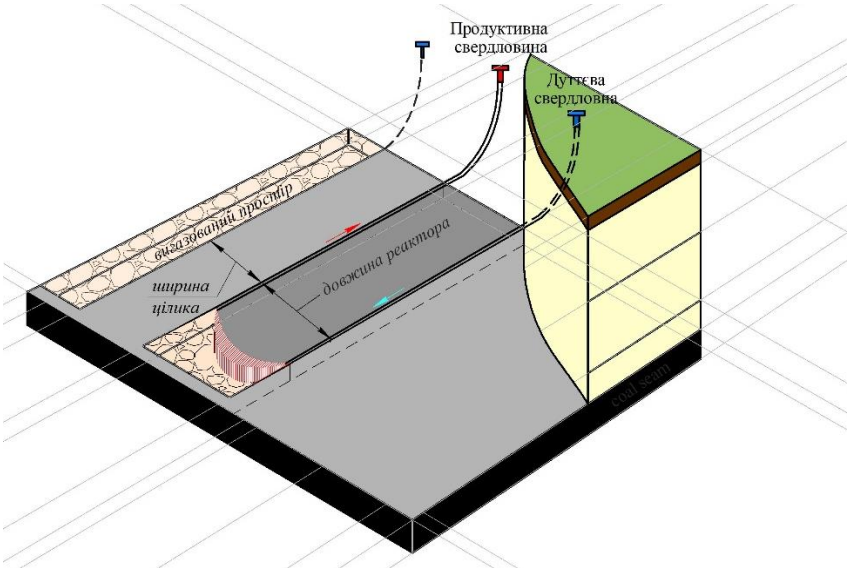


Рисунок 1.1 – Метод керованого переміщення точки дуття

У цьому дослідженні основним методом дослідження було чисельне моделювання. Було змодельовано кілька порожнин, що утворились в процесі газифікації з застосуванням методу КПТД. Довжина реактора завжди становила 30 м, а ширина цілiків змінювалась. Було змодельовано два сценарії: у першому ширина захисного цілика становила 15 м, у другому – 3,75 м (рис. 2б), що відповідає мінімальним і максимальним значенням раціонального діапазону ширини цілика [15-19]. У першому випадку панель газифікації мала 7 порожнин та 6 цiликів (70% вилучення вугілля), у другому випадку – 9 порожнин та 8 цiликів (90% вилучення вугілля). Над газифікаційною порожниною було змодельовано зону обвалення у формі склепіння висотою 8,4 м, що у 8 разів перевищує потужність вугільного пласта [20, 21]. Вироблений простір був заповнений продуктами горіння та обваленими породами покрівлі.

Метою моделювання було дослідження осідання земної поверхні та переміщення гірничого масиву над порожнинами газифікації при різній ширині цiликів. Окрім означених сценаріїв моделювання включало песимістичний сценарій, який демонстрував геомеханічну ситуацію, яка

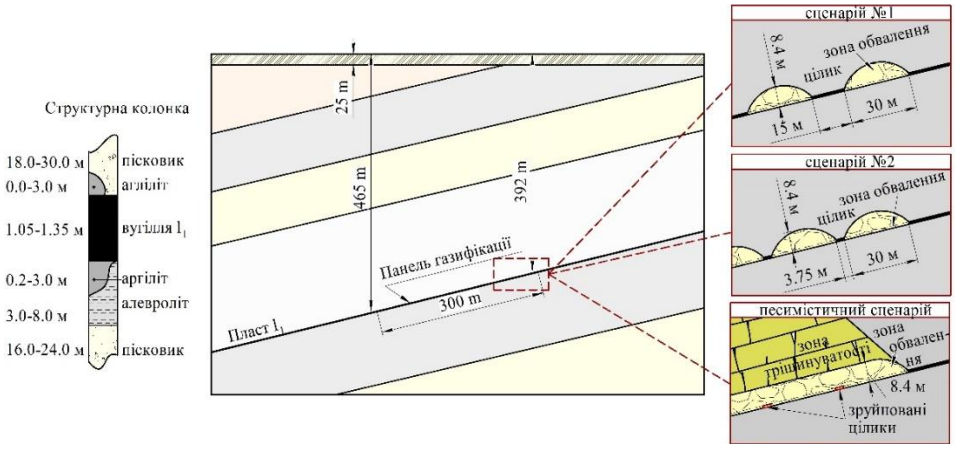
формується у випадку руйнування захисних циліків між порожнинами реактора та наслідки такої аварії для стійкості покривних порід і земної поверхні.

Об'єктом дослідження в цій роботі була шахта «Котляревська», яка розташована в західно-південній частині Покровського району Донецької області. Наразі видобуток вугілля на шахті зупинено через окупацію території та руйнування наземної інфраструктури. Запаси вугілля шахти містяться у двох пластах l_1, який розроблявся у довоєнний період, та k_8, запаси якого майже вичерпані. Залишкові запаси пласта k_8 оцінюються в 34,6 млн тон кам'яного вугілля тому його доцільно розглядати для реалізації проєкту підземної газифікації.

Гірничо-геологічні умови шахти типові для південного Донбасу. Потужність вугільного пласта становила 1,05-1,35 м, кут падіння змінювався від 11 до 13 градусів. Безпосередня покрівля вугільного пласта на досліджуваній ділянці представлена слабким аргілітом потужністю до 3,0 м. Основна покрівля – пісковик потужністю до 30 м. Підошва вугільного пласта представлена аргілітом потужністю 3,0 м та алевролітом потужністю до 8,0 м, під яким знаходиться масивний пісковик (Рис. 1.2а). За панель газифікації вугілля прийнято частину пласта l_1 з довжиною падіння 300 м. Верхня межа згаданої панелі розташована на глибині 392 м, нижня – на глибині 465 м (Рис. 1.2б).

Гірничий масив у шахтному полі характеризується осадовими відкладенями пісковиків, алевролітів, аргілітів, вапняків та вугільними пластами. Кам'яновугільна товща знаходяться під чохлом четвертинних та палеоген-неогенових покладів. Палеогенові поклади зустрічаються на кам'яновугільних породах з кутовою невідповідністю і представлені кварцовими пісками, глинами, уламковими породами з прошарками залізистих пісковиків і кварцитів. Неогенові поклади зустрічаються у вигляді окремих масивів у західній та південно-західній частинах Донбасу і представлені переважно глинами та пісками. Четвертинні

поклади представлені глинами та суглинками потужністю від 10-20 до 50 м і поширені майже повсюдно.



а б

Рисунок 1.2 – Геологічні та інженерні умови газифікації: (а) структурна колонка пласта; (б) схема розташування панелі газифікації

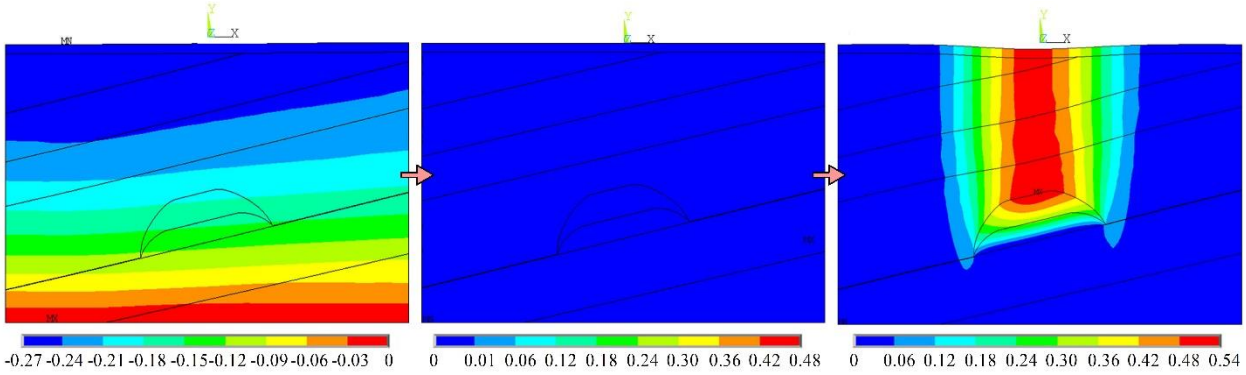
Опис методу дослідження. Було використано метод скінченних елементів, реалізований у програмному комплексі Ansys, при цьому моделі були тривимірними. На першому етапі моделювання геометричні розміри моделі становили 900 м у ширину, 620 м у висоту та 100 м у довжину. Бічні межі моделі були зафіксовані від горизонтальних переміщень, нижня межа – від вертикальних, а також враховано дію сили тяжіння.

Шари гірничих порід були об'єднані в групи за критерієм середньозваженої міцності на стиск. Якщо міцність окремого літотипу породи відрізнялася більше ніж на 20% від середнього значення групи, цей літотип виділяли в окрему групу, причому враховувалися лише шари потужністю понад 1,0 м. Після цього процес групування повторювався. Для моделювання поведінки порід використовувалася ортотропна модель, яка дозволяє враховувати анізотропні властивості осадових порід [22-24]. Зміна фізико-механічних властивостей гірничих порід вздовж та впоперек шаруватості визначалася за допомогою

калібрувальної числової моделі відповідно до методики, запропонованої Сахно та ін. [25]. Отримані результати калібрування загалом узгоджуються з висновками проф. Ржевського.

1.3 Аналіз напружено-деформованого стану масиву і осідань поверхні внаслідок підземної газифікації

Песимістичний сценарій. На рис. 1.3 показано еволюцію вертикальних переміщень у моделі під час покрокового моделювання просідання поверхні та зсуву гірничого масиву над панеллю газифікації. Вертикальний масштаб переміщень на рис. 3 становить 1:20. Відповідно до песимістичного сценарію всі порожнини в панелі були відпрацьовані, а захисні цілики зруйнувались, не витримавши навантаження. Таким чином, механізми просідання поверхні та переміщення гірничого масиву спрощуються до аналогічних механізмів, характерних для очисного виймання лавами.



а б в

Рисунок 1.3 – Еволюція вертикального переміщення в послідовності процесу моделювання за песимістичним сценарієм: (а) Крок 1 (стадія попереднього напруження); (б) Крок 2 (стадія початкового напруження –деформації); (в) Крок 3 (стадія після газифікації)

Цю модель було використано для остаточного калібрування властивостей гірничих порід. Для цього результати розрахунку просідання поверхні в моделі порівнювали з результатами моніторингу просідання над південною лавою пласта l_1 шахти «Котляревська». Процедура також описана в роботі [20]. Відповідні графіки просідання поверхні показано на рис. 4. Як видно з рис. 1.4, після калібрування чисельної моделі графік кривої просідання поверхні близький до кривої просідання, отриманої за результатами моніторингу.

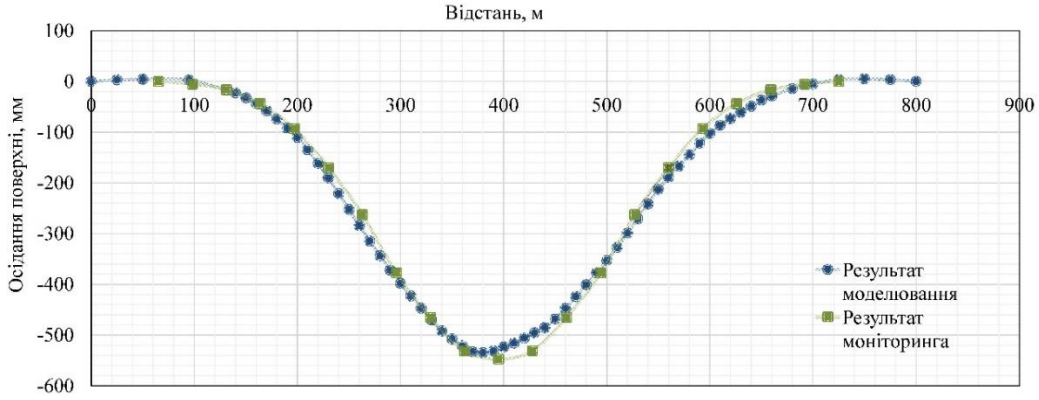


Рисунок 1.4 – Просідання поверхні відповідно до результатів моделювання та моніторингу (песимістичний сценарій)

Максимальне вертикальне переміщення в чисельній моделі становить 543 мм, тоді як за даними моніторингу – 550 мм. Ширина мульди осідання в чисельній моделі становить 660 м, а за результатами моніторингу – 630 м.

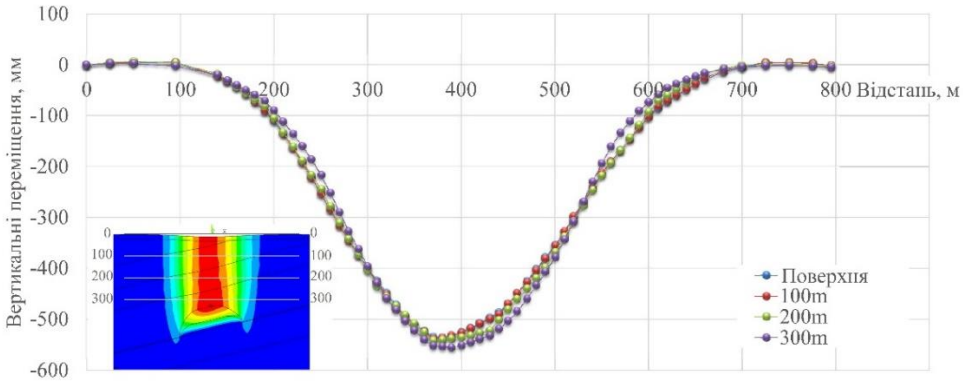
Точність числової моделі оцінювалася на основі вимірювань похибки. Відсоткова похибка для максимального осідання становила 1,27%, а для ширини мульди осідання – 4,72%. Отримані показники похибки свідчать про достатню точність моделі.

Вертикальні та горизонтальні переміщення гірського масиву на глибинах 100, 200 і 300 м, а також на поверхні для песимістичного сценарію наведені на рис. 1.5.

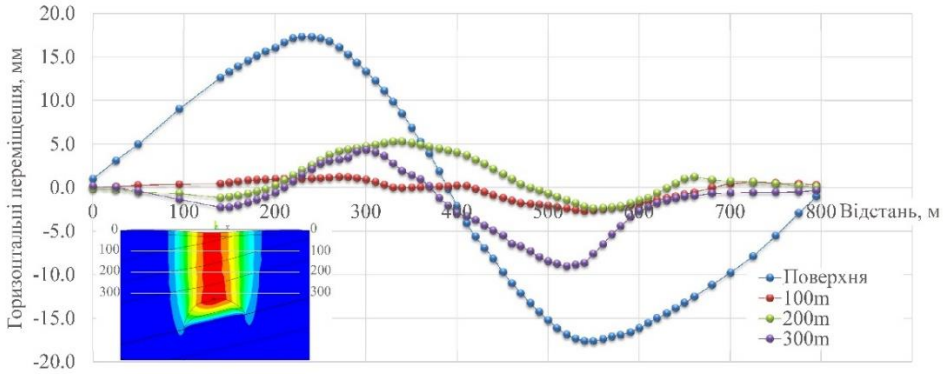
Аналіз результатів моделювання показує, що осідання поверхні та переміщення гірничого масиву перевищують граничні значення, характерні для пружного вигину шарів без їх руйнування. Це свідчить про високий ризик розриву суцільності перекриваючих порід, утворення тріщин над панеллю газифікації, зміни режиму гідрологічного режиму ґрунтових вод та значного притоку води в порожнини газифікації. Таким чином, руйнування ціликів між порожнинами реактора становить загрозу для наземної інфраструктури та стабільності режиму ґрунтових вод, що обумовлює необхідність детального обґрунтування параметрів захисних ціликів при проєктуванні технології ПГВ.

Перший та другий сценарій. На рис. 1.6 наведено вертикальні переміщення в моделі над панеллю газифікації за сценарієм №1 та сценарієм №2. Вертикальний масштаб переміщень на рис. 6 становить 1:20.

Точки максимальних вертикальних переміщень розташовані в центральній частині панелі газифікації. Графіки вертикальних та горизонтальних перміщень поверхні та гірничого масиву на глибинах 100, 200 та 300 м наведені на рис. 1.7. Аналіз цих графіків показує, що переміщення порід є незначними. Просідання поверхні не перевищує 27 мм у сценарії №1 та 46 мм у сценарії №2, при цьому вертикальне зміщення незначно зростає з глибиною (рис. 1.7а, в).

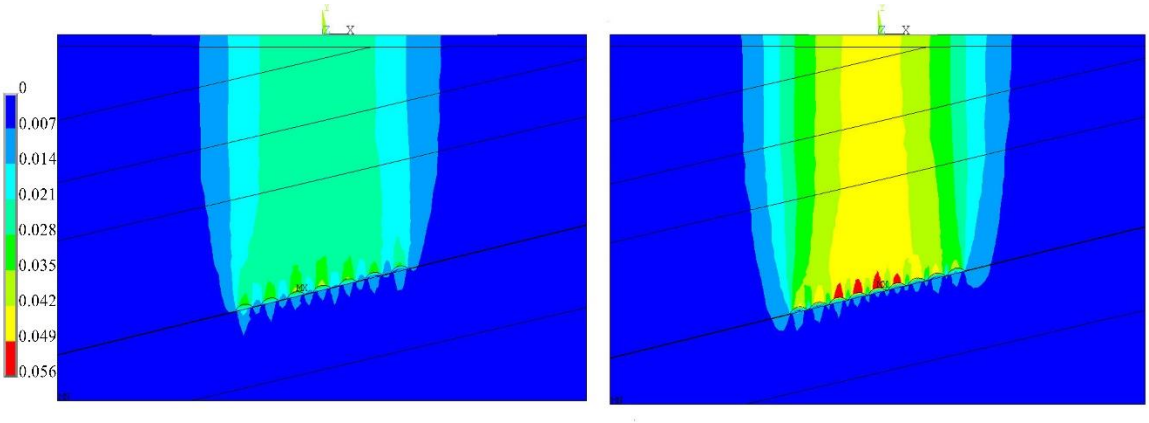


а



б

Рисунок 1.5 – Вертикальні (а) та горизонтальні (б) переміщення гірничого масиву і земної поверхні в песимістичному сценарії



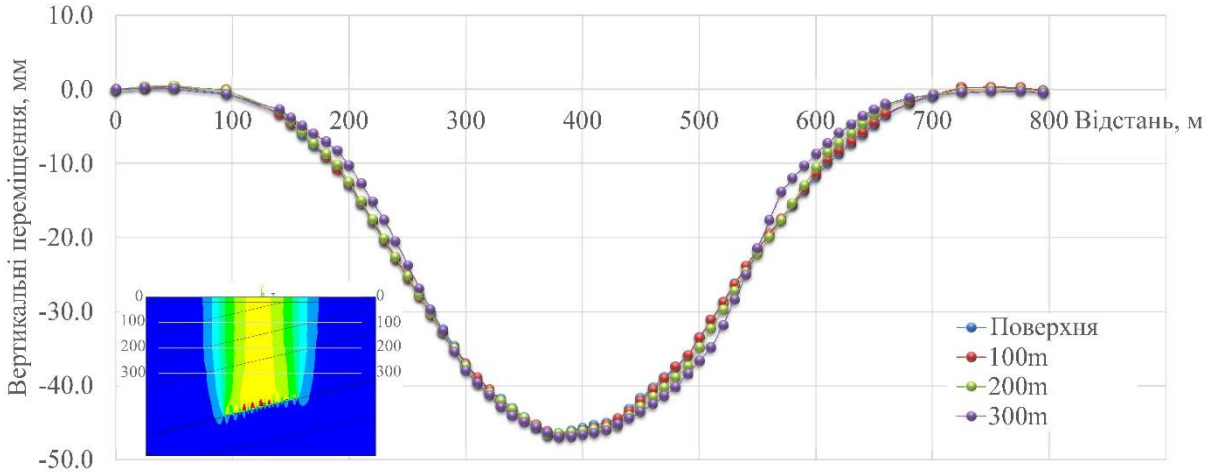
а б

Рисунок 1.6 – Розподіл вертикальних переміщень: (а) сценарій №1; (б) сценарій №2

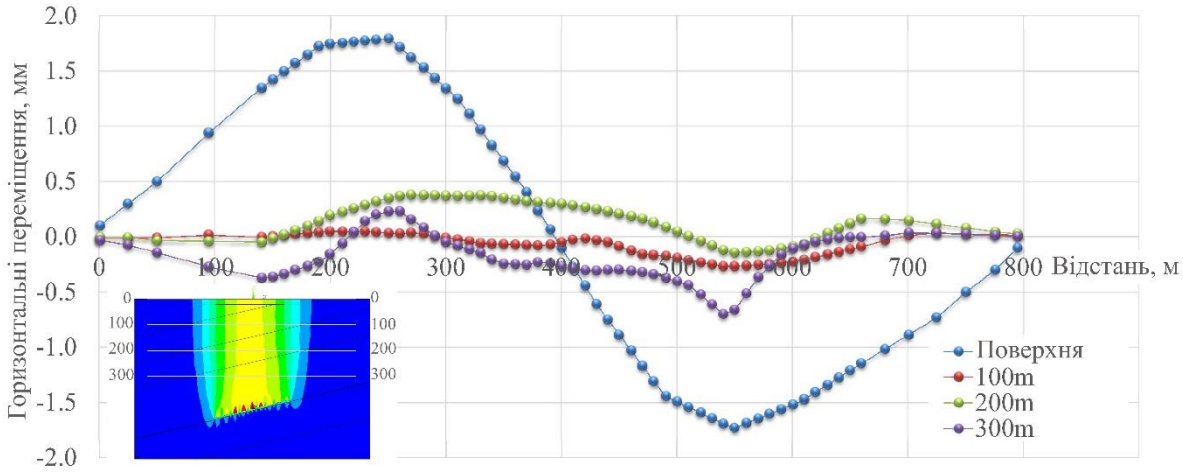
В обох сценаріях (№1 і №2) встановлено, що горизонтальні переміщення на поверхні перевищують їх значення на глибині, окрім цього відсутня тенденція до зростання горизонтальних переміщень із глибиною. Як у сценарії №1, так і у сценарії №2, на глибині 100 м горизонтальні переміщення близькі до нуля, далі незначно зростають на глибині 200 м і знову зменшуються на глибині 300 м. Вісь переміщень зміщується вправо (у напрямку підняття пластів на глибинах 100-200 м), а потім повертається до початкового положення на глибинах 200-300 м.

Отримані результати свідчать про низьку ймовірність утворення тріщин у гірському масиві та на поверхні.

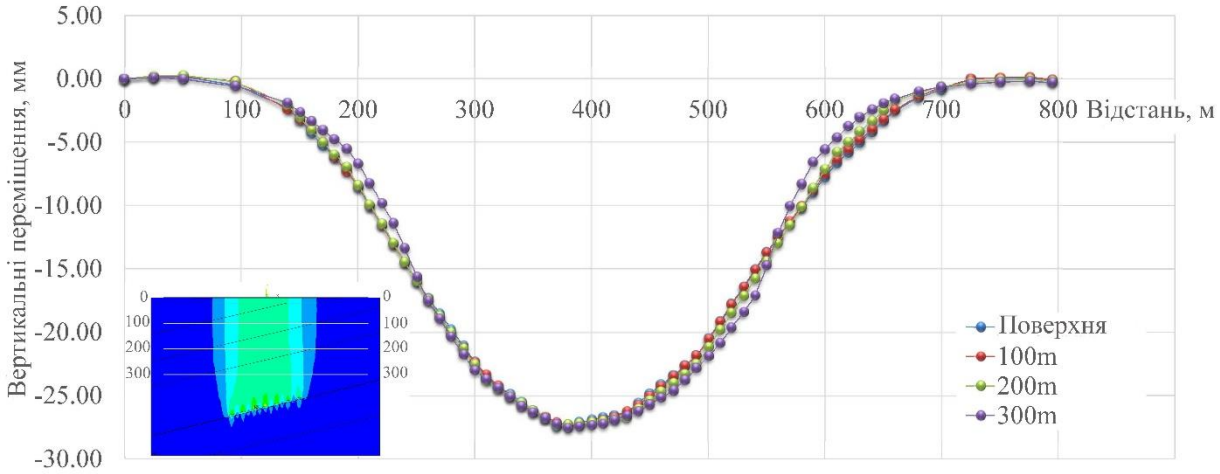
Найбільш інтенсивні переміщення не виходять за межі основної покрівлі (рис. 1.6). Це також підтверджується аналізом розподілу мінімальних головних напружень (рис. 1.8). Якщо не враховувати напруження в ціликах на межах панелі газифікації, руйнування гірничого масиву та земної поверхні в обох сценаріях є малоймовірним, оскільки напруження, що утворюються в породах, значно нижчі за їхню граничну міцність. Напруження на висоті 70 м над панеллю газифікації не відрізняються від напружень у гірничому масиві поза зоною впливу газифікації.



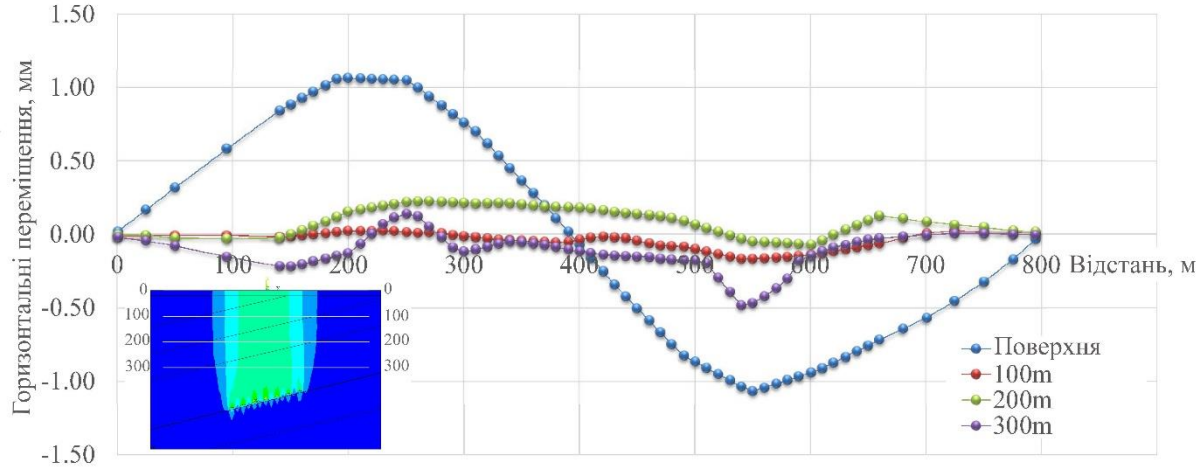
а



б



в



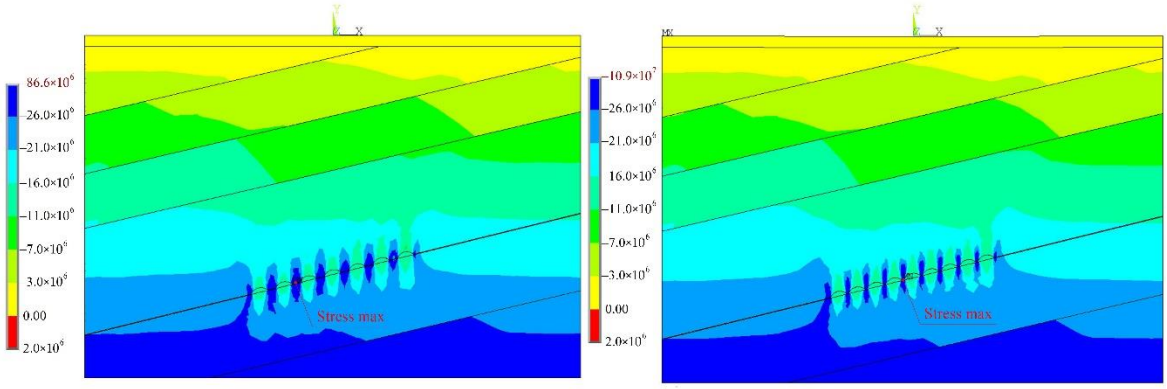
г

Рисунок 1.7 – Вертикальні та горизонтальні зміщення гірських порід та земної поверхні за сценарієм №1 (а, б); сценарієм №2 (в, г)

За результатами проведеного аналізу можна зробити наступні висновки. Під час підземної газифікації тонкого вугільного пласта (потужністю 1,05 м) на глибині 392-465 м методом КПТД при довжині вогневого вибою 30 м за сценарієм №1 та сценарієм №2 осідання земної поверхні та переміщення гірничого масиву є незначними. Найбільш інтенсивні переміщення локалізуються над порожниною вигазовування в межах основної покрівлі. Аналіз вертикальних та горизонтальних переміщень свідчить про низьку ймовірність утворення тріщин у

гірському масиві та на земній поверхні. Однак, передумовою для цього є забезпечення стійкості цілiків між порожнинами вигазовування.

Що стосується напружень у цілiках, їх максимальні значення спостерігаються в центральній частині панелі газифікації (рис. 1.8). За результатами першого етапу моделювання в обох сценаріях напруження перевищують граничну межу міцності гірничих порід. Так, за сценарієм №1 максимальні стискальні напруження становлять 86,6 МПа, а за сценарієм №2 – 109 МПа.



а б

Рисунок 1.8 – Розподіл мінімальних головних напружень: (а) сценарій №1; (б) сценарій №2

У разі руйнування цілiків між порожнинами вигазовування (песимістичний сценарій) існує висока ймовірність виникнення тріщин та руйнування порід розкриву. Аналіз вертикальних та горизонтальних переміщень показує, що в такому випадку осідання поверхні та деформації масиву перевищують граничні значення, характерні для безрозривного вигину шарів. Це створює загрозу для наземної інфраструктури, а також може призвести до руйнування водоносних пісковиків і проривів води в газифікаційні порожнини.

Максимальні стискаючі напруження локалізуються в цілiках розташованих в центральній частині панелі газифікації, при цьому головні напруження перевищують граничну міцність порід. Водночас

для обґрунтованої оцінки стійкості ціликів необхідне більш детальне масштабне дослідження з урахуванням усіх припущень. Таке дослідження буде метою подальших досліджень авторів.

1.4 Висновки по розділу 1

Це дослідження зосереджено на визначенні негативного впливу ПГВ на розкривні породи та земну поверхню. Було досліджено підземну газифікацію тонкого вугільного пласта паралельним методом КПТД. Для вивчення напружено-деформованого стану та розподілу температури в навколишніх породах було використано метод скінченних елементів реалізований в ANSYS.

На основі результатів цього дослідження встановлено, що осідання поверхні та переміщення порід над порожниною вигазовування знаходяться у допустимих межах у випадку збереження несучої здатності запобіжних ціликів. Це забезпечує низьку ймовірність негативного впливу газифікації. Для умов цього дослідження, газифікації вугільного пласта товщиною 1,05 м на глибині 392–465, вертикальні осідання поверхні не перевищувало 46 мм при ширині цілика 3,75 м та 27 мм при ширині цілика 15,0 м. У цьому випадку висота області зміни напружень над порожниною газифікації не перевищує 70 м. Руйнування ціликів між порожнинами вигазовування призводить до збільшення осідання в 11,7 та 19,9 рази для ширини ціликів 3,75 та 15,0 м відповідно. Переміщення розкривних порід збільшується аналогічним чином, що ставить під загрозу суцільність водоносних горизонтів та наземну інфраструктуру.

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ОЧИСНИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ НА ЗЕМНУ ПОВЕРХНЮ ЗА ДАНИМИ МАРКШЕЙДЕРСЬКИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ

2.1 Загальна характеристика напрямків відпрацювання панелей відносно елементів залягання

Сучасні технології видобутку корисних копалин дозволяють відпрацьовувати пологі вугільні пласти лавами за напрямом падіння (повстання). Дослідження зрушення земної поверхні при відпрацюванні довгих виїмкових стовпів вхрест простягання показують, що на поверхні утворюється мульда зрушення, характер розподілу деформацій в якій відрізняється від випадку відпрацювання лав за простяганням. Це пояснюється значним перепадом глибин ведення гірничих робіт у межах однієї очисної виробки (зміна глибини залежить від кута падіння пласта, що розробляється, і довжини виїмкового стовпа). У нормативній методиці визначення очікуваних зрушень та деформацій земної поверхні [26] варіант відпрацювання лав хрест простягання не розглядається, а розрахунки деформацій, виконані за традиційною схемою, можуть призвести до суттєвих похибок прогнозування. Розглянемо наведену в "Правилах підробки..." [26] методику розрахунку очікуваних зрушень для умов відпрацювання вугільних пластів довгими стовпами вхрест простягання.

2.2 Графоаналітичний метод дослідження

Під час виконання роботи застосовано графоаналітичний метод дослідження геометричних параметрів зрушення земної поверхні над очисними виробками шахт Західного Донбасу, отриманих методом

натурних маркшейдерських інструментальних вимірювань на спеціальних спостережних станціях.

Результати графоаналітичних досліджень. Очікувані зрушення та деформації розраховуються в межах напівмульд: за падінням – L_1, за повстанням - L_2 та за простяганням – L_3. Значення довжин напівмульд визначаються графічно на вертикальних розрізах, відповідних перерізам мульди. Напівмульди L_1, L_2 обмежені з боку виробленого простору лініями, що проведені під кутами ψ_1, ψ_2, з боку масиву – кутами φ_0, β_0, γ_0; межі напівмульди L_3 визначаються кутами φ_0, δ_0 та ψ_3 (рис. 2.1). При повній підробці у напрямку вхрест простягання пласта (коефіцієнт, що характеризує підробленість земної поверхні вхрест простягання N_1>1) у мульді зрушення між точками X_1 і X_2 формується плоске дно. До меж плоского дна примикають напівмульди L_1 та L_2, довжини яких однозначно визначаються глибинами $H_П$ і $H_В$ відповідно.

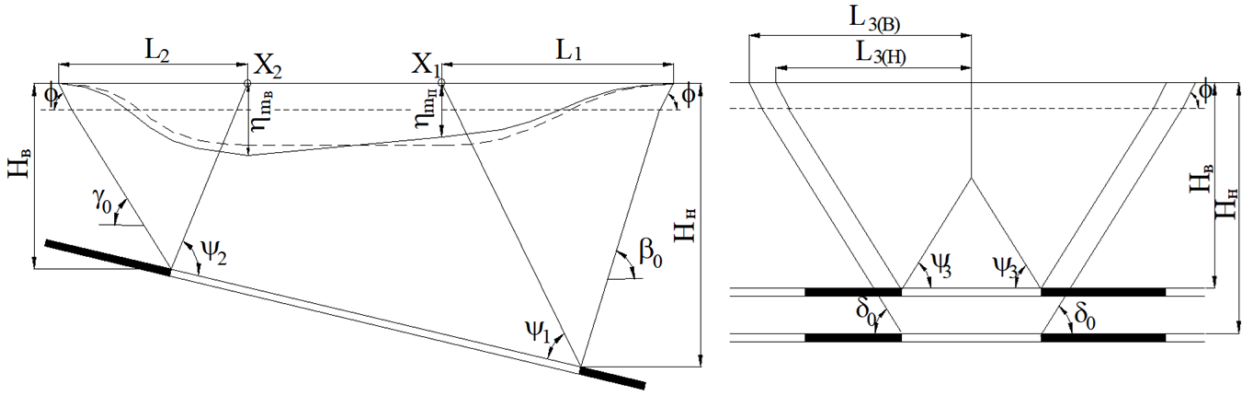


Рисунок 2.1 – Схема визначення довжин напівмульд для випадку відпрацювання лави вхрест простягання

Довжина напівмульди L_3 - відстань у головному перерізі на розрізі по простяганню між краєм мульди і точкою перетину із земною поверхнею лінії, проведеної від межі виробки під кутом ψ_3. Головним називається вертикальний перетин, що проходить через точку з максимальним осіданням земної поверхні.

Коефіцієнт N_2, що характеризує підробленість земної поверхні за простяганням, має функціональну залежність від глибини залягання пласта в головному перерізі за простяганням і впливає на величину максимального осідання η_m:

$$\eta_m = mq_0 N_1 N_2 \cos\alpha, \qquad (2.1)$$

де m - потужність пласта; q_0 - відносна величина максимального осідання; α – кут падіння пласта; N_1 та N_2 – коефіцієнти.

Відповідно до вищесказаного виникає неоднозначність визначення величини η_m, тому що на ділянці плоского дна (X_1X_2) головного перерізу вхрест простягання змінюється глибина розробки, а отже, змінюються довжина напівмульди за простяганням L_3 і коефіцієнт N_2. Показник η_m є одним з основних при розрахунку очікуваних зрушень та деформацій і неоднозначність його визначення неминуче призведе до неоднозначності прогнозування впливу гірничих робіт на земну поверхню. Більш того, в залежності від коефіцієнта N_2 вибираються відповідні функції розподілу зрушень і деформацій (типові криві) в напівмульді L_3, а так як N_2 змінюється, то змінюватиметься і характер розподілу зрушень та деформацій на ділянці плоского дна. Це суперечить основним прийнятим положенням методики [26].

Напрошується висновок про непостійність осідань земної поверхні на ділянці плоского дна в головному перерізі вхрест простягання пласта при відпрацюванні пологих вугільних пластів лавами за повстанням (падінням). Це підтверджується даними натурних спостережень [27, 28, 29]. Для умов, що розглядаються, потрібно уточнити поняття "плоське дно", яке слід розглядати як ділянку мульди осідання, обмежену точками перетину земної поверхні лініями, проведеними від меж виробки під кутами ψ_1 та ψ_2, і на якому осідання досягли максимально

можливих (але не постійних) значень для даних умов підробки земної поверхні.

Максимальне осідання в *i*-му перерізі на ділянці X_1X_2 можна обчислити за формулою (1), підставивши значення коефіцієнта N_2, що визначається відповідно до [26, 28], але в залежності від глибини H_i для даного перерізу.

Простежимо розподіл осідань на ділянці X_1X_2, досліджуючи залежність максимальних осідань η_m від глибини H_i. Відомо, що коефіцієнт N_2 пов'язаний із глибиною H виразом

$$N_2 = \sqrt{0{,}9\frac{D_2}{Hi}}, \tag{2.2}$$

де D_2 – довжина лави у напрямку вхрест простягання пласта.

При постійному куті падіння пласта α на досліджуваній ділянці глибина H_i у точці на деякій відстані y від т. X_1 визначається як

$$Hi = H_{\text{В}} + y\,sin\,\alpha. \tag{2.3}$$

Тоді формула (1) з урахуванням (2) та (3) запишеться у вигляді

$$\eta_{m_i} = mq_0N_1\sqrt{0{,}9\frac{D_2}{H_{\text{В}}+y\,sin\,\alpha}}\,cos\,\alpha. \tag{2.4}$$

Враховуючи, що довжина напівмульди L_3 непостійна, для визначення зрушень і деформацій можна виділити три зони I, II і III (рис. 2.2).

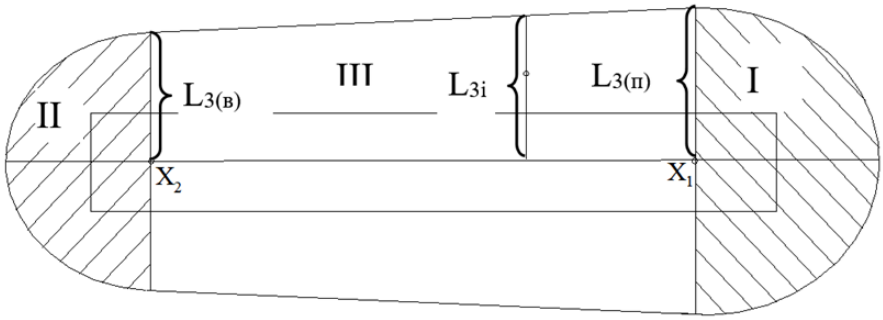


Рисунок 2.2 – Зони розрахунку зрушень та деформацій при відпрацюванні вугільного пласта довгими стовпами вхрест простягання

Для зон I та II при розрахунку зрушень та деформацій пропонується використовувати напівмульди по простяганню відповідно $L_{1(п)}$ і $L_{2(в)}$. Довжини напівмульд визначаються в перерізах, що проходять через точки X_1 і X_2. Таким чином буде враховано фактор зміни глибини за повстанням і падінням пласта. У кожній з цих зон матиме місце свій коефіцієнт, що характеризує підробленість земної поверхні: у зоні I – $N_{2(п)}$, у зоні II – $N_{2(в)}$ та відповідні значення максимального осідання: $\eta_{m(п)}$ и $\eta_{m(в)}$.

Район Центрального Донбасу	
Розмір лави вхрест простяганню, D_2, м	1000
Розмір лави за простяганням, D_1, м	200
Кут падіння пласта, град.	10
Глибина над центром лави, м	300
Потужність пласта, м	0,8
Потужність наносів, м	25
Підробка первинна	
Лава з усіх боків обмежена масивом	

У зоні III для розрахунку зрушень та деформацій у кожному конкретному перерізі, що проходить через відповідну точку на прямій X_1X_2, приймається напівмульда $L_{3(i)}$, яка визначається з урахуванням

глибини в цій точці. Якщо кут падіння пласта в межах очисної виробки не змінюється, L_{3i} можна визначити графічно (рис 2).

Нижче наведено результати порівняння розрахунків зрушень та деформацій земної поверхні, виконані за нормативною методикою [26] та з урахуванням викладених пропозицій щодо її уточнення. Розрахунки виконані для наступних гірничо-геологічних умов відпрацювання лави у напрямку вхрест простягання.

Розрахунок виконаний у головних перерізах за простяганням, що проходять через точки X_1 і X_2 (рис. 2.1). Результати розрахунку зведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку

Параметр	За методикою “Правил підробки…” [1]		За новою методикою	
	Повстання	Падіння	Повстання	Падіння
H, м	246	356	246	356
L_3, м	209	209	189	229
N_2	0,866	0,866	0,947	0,8
η_m, мм	512	512	560	473

Для кількісної оцінки обчислені абсолютні та відносні відхилення зрушень та деформацій земної поверхні за відповідними точками досліджуваних ліній (перетинів) (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Відхилення обчислених параметрів зрушення

Найменування параметру	Відхилення, %	
	Повстання	Падіння
Осідання	9	7
Нахил	28	20
Горизонтальна деформація	49	37
Кривизна	60	41
Горизонтальне зрушення	17	13

2.3 Результати досліджень натурних маркшейдерських інструментальних вимірювань

Розглянемо питання зміни параметрів зрушення земної поверхні під час повторної підробки. Аналіз результатів вивчення зрушення земної поверхні на вугільних родовищах показує, що параметри її зрушення при повторній підробці відрізняються від таких при первинній підробці. Такий же висновок можна зробити і з загальних закономірностей формування зони впливу гірничих розробок на земну поверхню [30, 31, 32]. Залежності кутових параметрів від показників міцності гірських порід описується формулами:

$$\delta_0 = 90° - arctg\sqrt{\frac{\mu}{1-\mu}};$$

$$\beta_0 = (90° - \alpha) - \left(cos^2\alpha - \frac{\mu}{1-\mu}sin^2\alpha\right)(90° - \delta_0);$$

$$ctg\delta_0 = ak_0 H\gamma\sigma_0^{-1},$$

де β_0, δ_0 – кутові параметри: μ – коефіцієнт Пуассона для гірських порід; σ_0 – міцність порід на одноосьовий стиск; a, k_0 – коефіцієнти пропорційності.

Очевидно, що в наведених виразах показники міцністних властивостей порід виступають у ролі узагальнюючих показників властивостей підроблюваного породного масиву. Якщо розглядати вже приоблений масив, то міцністні властивості гірських порід "у куску" залишаються такими ж, як і до підробки, але масив у цілому перетерпить істотні зміни і, виходячи з наведених виразів, варто очікувати зміни кутових параметрів зрушення земної поверхні.

До такого ж висновку приводить аналіз залежностей, що характеризують загальні закономірності формування мульди зрушення:

$$\eta_{(x)} = -\frac{\eta_0}{2}\left[\Phi\left(\frac{D_p+x}{C_p H}\right) + \Phi\left(\frac{D_p-x}{C_p H}\right)\right];$$

$$\eta = \frac{k}{\pi\, c^2 z^2} exp\left[-\frac{(X-x)^2+(Y-y)^2}{c^2 z^2}\right],$$

де C_p і c – коефіцієнти, що залежать від фізико-механічних властивостей підроблюваної товщі.

Фізико-механічні властивості підробленого і непідробленого породного масиву різні, отже і коефіцієнти C_p і c, що їх характеризують, повинні відрізнятися. А це неминуче приведе до зміни закону розподілу зрушень і деформацій у мульді зрушення.

Цілеспрямовані натурні дослідження параметрів зрушення в умовах породного масиву, що порушений гірничими роботами, виконувалися на багатьох родовищах і, зокрема, на шахтах Донецького і Львівсько-Волинського басейнів. В узагальненому вигляді результати цих досліджень віддзеркалені в "Правилах підробки…" [26] і стосовно до основних показників зрушення земної поверхні зводяться до наступного.

Розподіл зрушень і деформацій земної поверхні в мульді зрушення. В нормативному документі [26] вказується на зміну характеру розподілу і величин зрушень і деформацій земної поверхні і товщі при повторних підробках у зв'язку з активізацією процесу зрушення в порівнянні зі зрушеннями і деформаціями від одиночної виробки при первинній підробці. У цілому ж, зміна характеру розподілу зрушень і деформацій поверхні при повторній підробці не відзначається.

Кутові параметри зрушення земної поверхні. Правила [26] регламентують зміну граничного кута β_0, що визначає границю впливу гірничих робіт на земну поверхню з боку падіння, при її повторній підробці. Ці зміни виражаються в зменшенні величин граничних кутів на 5º і стосуються районів Донбасу (за винятком Західного Донбасу) з марками вугілля: Д, ДГ, Г, ГЖ, ГЖО, Ж, ДО, КЖ, КС, ОС, Т, ТС. У

районах залягання вугілля марки А при повторній підробці всі граничні кути (β_0, δ_0, γ_0) у корінних породах приймаються крутіше на 5º.

Зміни кутів зрушення β, δ, γ при повторній підробці відзначені в антрацитових районах Донбасу і у Львівсько-Волинському басейні, причому в останньому на 5º зменшується кут зрушення й у мезозойських відкладеннях $\delta_{м.}$

Відносна величина максимального осідання q_0 при повторній підробці земної поверхні для умов Львівсько-Волинського басейну регламентується на 10% більше, ніж при первинній підробці. При повторній підробці і кутах падіння від 0° до 25° у Донбасі відносна величина максимального осідання q'_0 обчислюється за формулою

$$q'_{0n} = q_0 \left[1 + (1 - q'_0)\frac{H_1}{H}\right]$$

де q_0 – відносна величина максимального осідання при первинній підробці.

На інших вугільних родовищах України зміна відносної величини максимального осідання при повторних підробках не відзначена.

Аналіз даних, наведених у Правилах [26] указує на неоднозначне висвітлення залежності параметрів зрушення земної поверхні від умов її підробки. Очевидно, що в наведених даних відсутній загальний логічний зв'язок. Це виражається в тім, що ті самі параметри на різних родовищах по-різному змінюються при повторній підробці. На наш погляд, причина полягає не стільки в геологічних і геомеханічних розходженнях родовищ, скільки у відсутності відповідної інформації про закономірності зрушення земної поверхні в умовах повторної підробки [33-35]. А це, у свою чергу, є наслідком відсутності системних досліджень на родовищах, для яких у даний час не встановлені параметри зрушення в умовах породного масиву, що порушений

гірничими роботами.

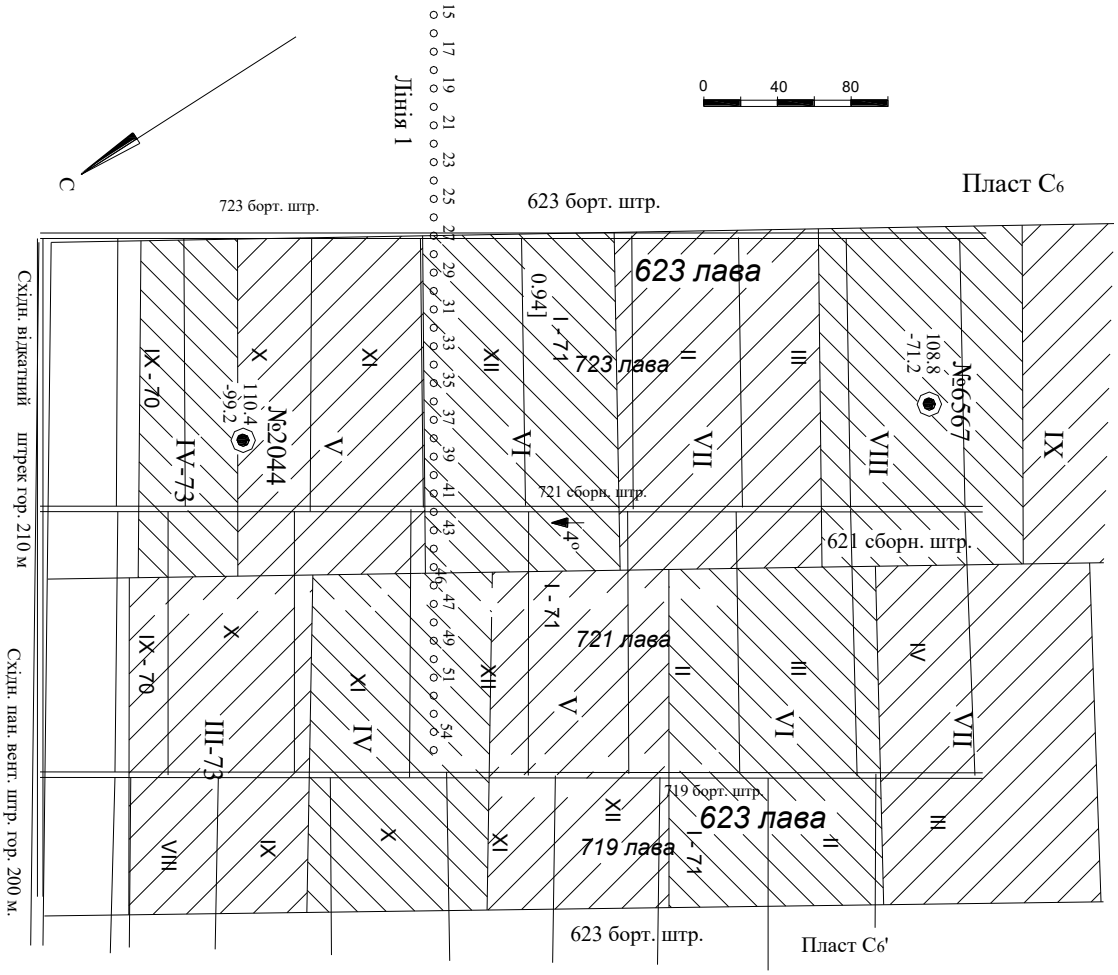


Рисунок 2.3 – Суміщений план гірничих робіт і спостережної станції №7

Як приклад розглянемо результати натурних спостережень за зрушенням земної поверхні в Західному Донбасі на шахті "Степова", де спостережна станція №7 була підроблена лавами №721, №723 пласту $с'_6$ і лавами №621, №623 пласту $с_6$. Глибина гірничих робіт під спостережною станцією по пласту $с'_6$ складає 190 м, а по пласту $с_6$ – 202 м. Границі гірничих робіт в обох пластах (623-й і 723-й бортові штреки) у плані збігаються і знаходяться під 27-им репером профільної лінії №1 (рис. 2.3). Розрив у часі між підробками склав 2,5 роки.

На рис. 2.4 наведені графіки осідань, нахилів і горизонтальних деформацій земної поверхні, отримані за спостереженнями переміщень

реперів спостережній станції №7 на моменти закінчення процесу зрушення після первинної підробки гірничими роботами по пласту c'_6 і після повторної підробки пластом c_6. Аналіз графіків показує, що величини зрушень і деформацій земної поверхні після первинної і повторної підробок значно відрізняються. При практично однаковій потужності пластів (для c'_6 m = 0,90 м, для c_6 m = 0,94 м) осідання при повторній підробці на 50% більше, нахили і розтягання поверхні – у двічі більше ніж при первинній підробці.

Границі впливу очисних робіт від обох пластів на земній поверхні збігаються. Це спостерігається як за критерієм розтягання земної поверхні $\varepsilon = 0{,}5\cdot10^{-3}$ (точка 1 на рис. 2) так і за критерієм нахилу $i = 0{,}5\cdot10^{-3}$ (т. 2), але при цьому точки 1 і 2 знаходяться на відстані 40 м друг від друга. Границі небезпечного впливу за критеріями $\varepsilon = 2\cdot10^{-3}$ (точки 3 і 4) і $i = 2\cdot10^{-3}$ (точки 5 і 6), рознесені уздовж профільної лінії, що свідчить про відмінність кутів зрушення δ при первинній і повторній підробках.

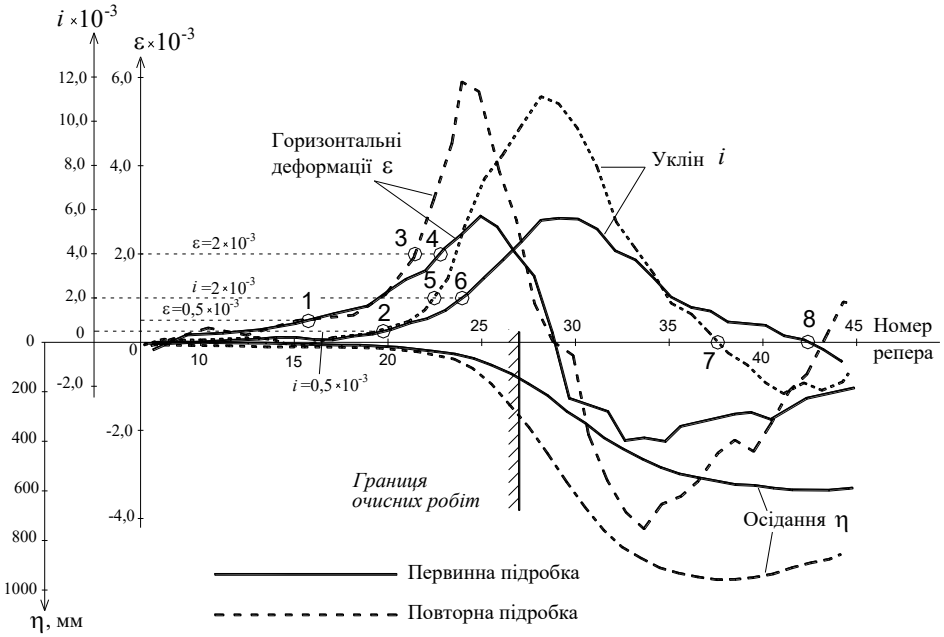


Рисунок 2.4 – Графіки зрушень і деформацій земної поверхні по профільній лінії спостережної станції №7 після первинної і повторної підробок

Важливою особливістю, що не знайшла відображення в [26], є факт розбіжності точок початку плоского дна при первинній і повторній підробках (точки 7 і 8). Положення цих точок визначає значення кутів повних зрушень ψ і свідчить про те, що при повторній підробці кут повних зрушень крутіше, ніж при первинній підробці.

2.4 Висновки по розділу 2

У разі відпрацювання пластів довгими стовпами хрест простягання:

1. Мульда зрушення у плані приймає “грушоподібну”, а не еліптичну форму, через невідповідності напівмульд у головних перерізах за простяганням у зонах падіння і повстання пласта.

2. Відмінність коефіцієнтів, що характеризують підробленість земної поверхні N_2 у основних перетинах по простяганню на ділянці “плоського дна” призводить до поступового зростання максимального осідання у бік повстання пласта.

3. Істотна відмінність коефіцієнтів N_2 у зонах з боку падіння та повстання пласта (зони I та II) призводить до зміни характеру розподілу зрушень та деформацій у межах напівмульд.

4. Порівняльний аналіз показав, що значення зрушень та деформацій, обчислених за діючою методикою [26] дає дещо завищені величини з боку падіння пласта та занижені – з боку повстання.

Встановлені відмінності параметрів зрушення земної поверхні при первинній і повторній підробках властиві умовам підробки спостережної станції №7. Але вони дозволяють зробити висновок, що подібні відмінності мають місце і вони на стільки істотні, що докорінно змінюють представлення про закономірності зрушення земної поверхні при веденні очисних робіт в умовах порушеного гірничими роботами породного масиву. Це, у свою чергу, указує на необхідність проведення

системних досліджень процесу зрушення земної поверхні в Західному Донбасі з метою встановлення параметрів зрушення при повторній і наступних підробках.

РОЗДІЛ 3

ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕФОРМАЦІЙ ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ В СЛАБКИХ ПОРОДАХ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

3.1. Аналіз експлуатаційного стану гірничих виробок вугільних шахт

Технології підземної газифікації можуть бути реалізовані як на перспективних ділянках, в межах залишених запасів шахт, які зупинили свою роботу, так і в рамках діючих шахт, що ведуть видобуток за традиційною технологією. В останньому випадку надуває актуальності питання підтримання в експлуатаційному стані гірничих виробок діючих шахт.

Технологія збереження підготовчих виробок для повторного використання найбільш повно відповідає сучасним вимогам економічно ефективного та безпечного підземного видобутку вугілля. Відмова від повторного використання підготовчих виробок призводить до збільшення довжини і вартості виробок, необхідних для підготовки шахтного поля, в 2 рази. Тому безціликова технологія відпрацювання вугільних пластів, яка передбачає підтримання гірничих виробок за лавою з метою їх повторного використання, є актуальною гірничотехнічною проблемою.

Існує ряд методик, що дозволяють розраховувати зміщення покрівлі виробок, в тому числі і для умов шахт Західного Донбасу [36-43]. Але результати цих розрахунків не відображають реального стану гірничих виробок після проведення лав. Розрахунки не враховують багато факторів, основними з яких є зволоження гірських порід та їх реологічні властивості.

Незадовільний стан підготовчих виробок є проблемою, яка

стримує розвиток виробництва. Погіршення умов проведення та підтримання підготовчих виробок викликано збільшенням глибини розробки вугільних пластів та інтенсивності їх відпрацювання, що призводить до зростання гірничого тиску і напружень масиву [44, 45]. Існуючі способи і засоби забезпечення стійкості виробок в зоні впливу очисних робіт у багатьох випадках є недостатніми. У наукових публікаціях розглядаються різні способи кріплення гірничих виробок: аркове кріплення [46-48], використання сталевих і канатних анкерів [49-52], рамне анкерне кріплення [53-56], торкретування [57, 58], попереднє розвантаження [59] або застосування гідравлічних систем [60]. Разом з тим, питання підтримки виробок в зоні підвищеного гірничого тиску від ведення гірничих робіт на сусідніх пластах і додаткового впливу динамічного тиску з боку лави, що рухається, в слабких водонасичених породах вивчені недостатньо.

Нормативні документи при розрахунку навантаження на кріплення враховують форму і площу виробки, систему розробки, спосіб управління гірським тиском [36-39]. У роботах [61-63] виконано спільний аналіз просідання земної поверхні в зоні проведення гірничих виробок і в свердловинах перед лавою, що рухається. Отримані закономірності використовуються для прогнозування деформацій об'єктів, що охороняються, на земній поверхні і в надрах [64-65]. Таким чином, навантаження на кріплення виробки залежить від ряду факторів, без урахування яких коректне визначення цієї величини неможливе.

Передбачається, що переміщення породного контуру гірничої виробки має постійний і рівномірний характер у часі. Однак деформація і зміна контурів реальних гірничих виробок спростовують це твердження.

Метою виконаних досліджень є проведення натурних вимірювань для визначення основних закономірностей поведінки покрівлі, ґрунту і бортів гірничих виробок в зоні впливу очисних робіт. Подальше

використання результатів натурних експериментів дозволить в умовах слабких вміщуючих порід своєчасно вжити необхідних заходів щодо зміцнення необхідної ділянки підготовчих виробок, які використовуються багаторазово. Експериментальні дослідження проводилися на двох шахтах Західного Донбасу.

3.2. Характеристика об'єкта дослідження і методика дослідних робіт

На шахті «Степова» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» (Україна) пройдено підготовчі виробки 157-ї та 161-ї лав (рис. 3.1). 157-й і 161-й бортові штреки погашаються після очисного вибою, 159-й і 163-й монтажні штреки підтримуються для відведення газоповітряної суміші в водовідливний штрек.

На шахті ім. Героїв Космосу ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» (Україна) під час відпрацювання 1061-біс лави (рис. 3.2) виникла проблема з охороною 1061-біс монтажного та бортового штреків попереду лави, що рухається.

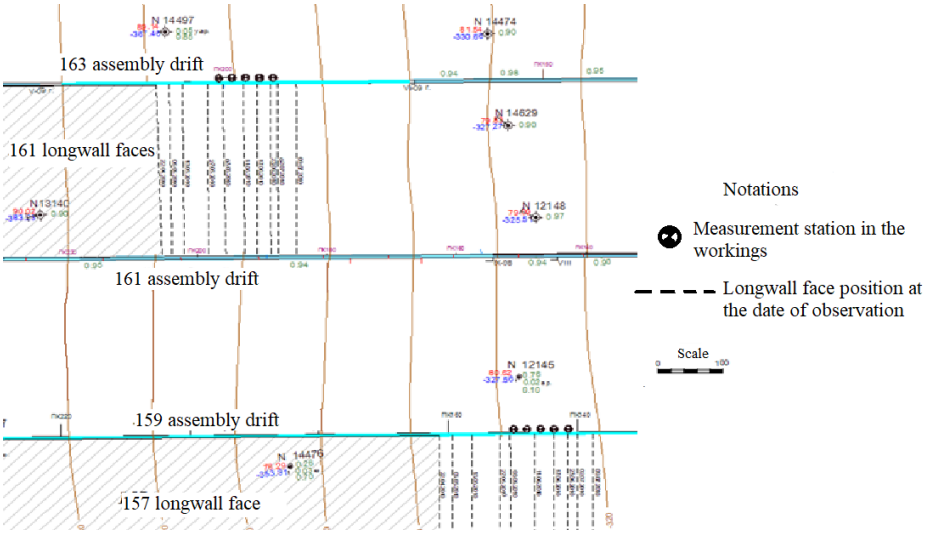


Рисунок 3.1. – Викопіювання з плану гірничих виробок шахти «Степова»

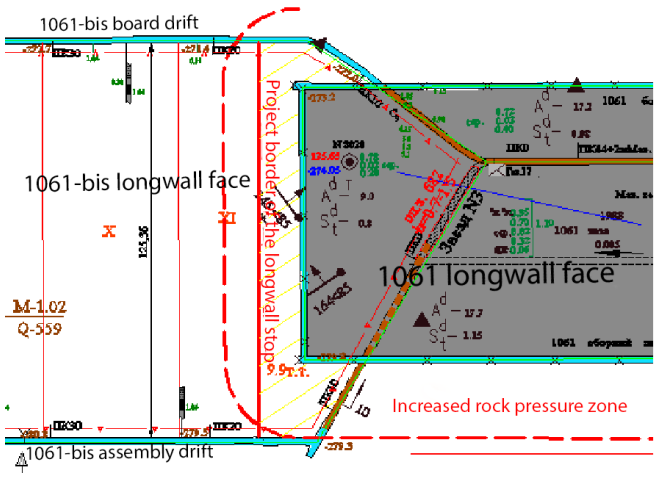


Рисунок 3.2 – Викопіювання з плану гірничих виробок пласта c_{10} шахти ім. Героїв Космосу

Підготовчі виробки 157-ї, 161-ї і 1061-біс лав розташовані в ідентичних гірничо-геологічних умовах, що розширює можливості дослідження загальних закономірностей деформування січень виробок у зоні впливу лави.

Довжина виїмкових стовпів 900-1200 м, довжина лави 250 м, середня глибина розробки 350-420 м, кут падіння пласта 3º. Вугільний пласт переважно простої будови, геологічна потужність в середньому становить 0,9-1,05 м. Вугільний пласт небезпечний за газом і пилом, не схильний до самозаймання.

У зоні впливу лав 157-ї і 161-ї лав створені спеціальні спостережні пункти для вивчення деформацій ділянок підготовчих виробок, що підтримуються.

Інструментальні спостереження в 159-му монтажному штреку.

У 159-му монтажному штреку було закладено 5 вимірювальних спостережних станцій, розташованих на пікетах ПК142, ПК144, ПК146, ПК148 і ПК150. На кожній станції було виконано ряд вимірів для оцінки геометричних параметрів розрізу, їх зміни за часовий інтервал між спостереженнями і деформацій порід контуру. Схема вимірювань на спостережній станції показана на рисунку 3.3.

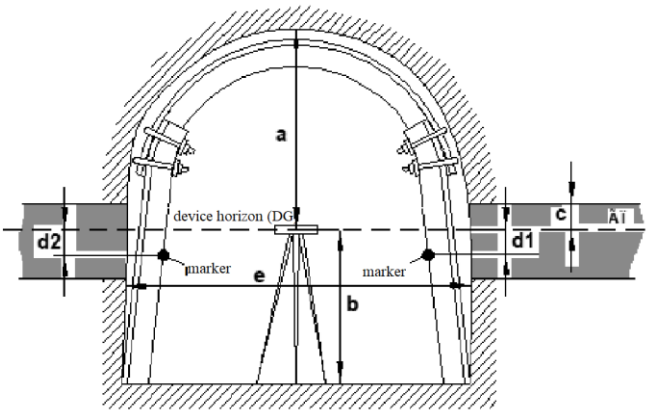


Рисунок 3.3 – Схема маркшейдерських вимірювань на спостережній станції. Відстань від горизонту приладу (ГП): а - до покрівлі виробки; б - до підошви виробки; в - до покрівлі пласта; d1, d2 - до відміток на опорних стояках; д - ширина виробки на рівні ГП

Всього було виконано 10 серій інструментальних спостережень на спостережних пунктах 159-го монтажного штреку в різних положеннях вибою на дати спостережень відносно пунктів спостережень.

За виміряними даними були розраховані величини опускання (підняття) ґрунту і покрівлі виробки відносно покрівлі пласта і загальної вертикальної конвергенції, а також побудовані графіки опускання (підняття) ґрунту і покрівлі виробки відносно покрівлі пласта і загальної вертикальної конвергенції (рис. 3.4).

Всі графіки мають спільний момент часу: перетин лавою ділянки, на якій закладено спостережну станцію (значення відстані від лави до спостережної станції дорівнює 0).

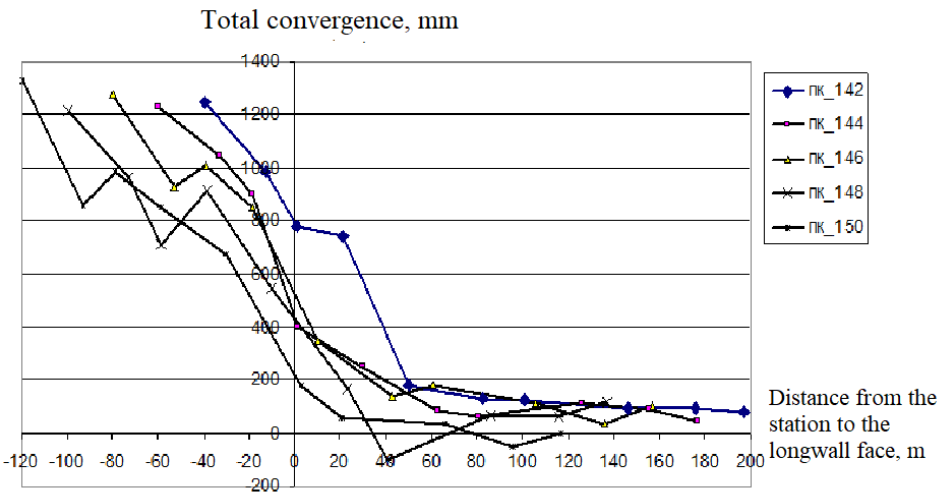


Рисунок 3.4 – Зведений графік загальної конвергенції 159-го збірного штреку

Спостереження у 163-му монтажному штреку

У 163-му монтажному штреку закладено 5 вимірювальних спостережних станцій, розташованих на пікетах ПК192, ПК194, ПК196, ПК198, ПК200. Схема вимірювань на спостережній станції показана на рисунку 3. Перше спостереження на станціях було проведено при положенні163-ї лави на відстані 140 м від пікету ПК200. На спостережних пунктах 163-го монтажного штреку було виконано 10 серій інструментальних спостережень.

Зведені графіки для 159-го і 163-го монтажних штреків мають загальний характер розподілу деформацій виробок і їх співмірні значення. Подібність гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов 157-ї і 161-ї лав дає підстави для спільного аналізу результатів натурних вимірювань на спостережних пунктах 159-го і 163-го монтажних штреків (рис. 3.5-3.7).

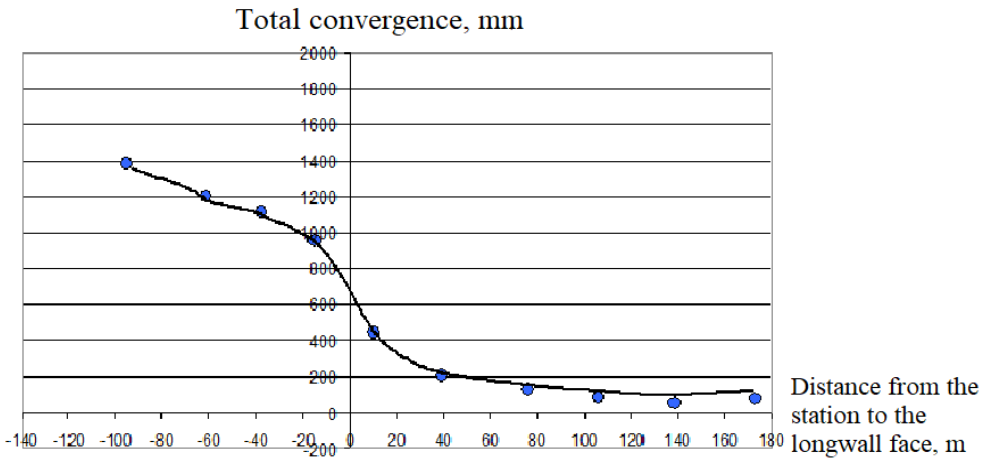


Рисунок 3.5 – Згладжений графік конвергенції 159-го та 163-го збірних штреків

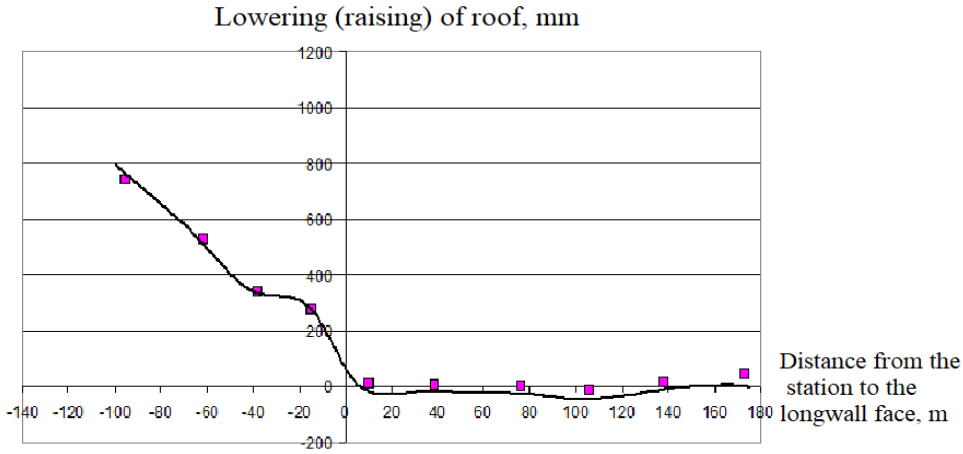


Рисунок 3.6 – Згладжений графік опускання покрівлі 159-го і 163-го збірних штреків

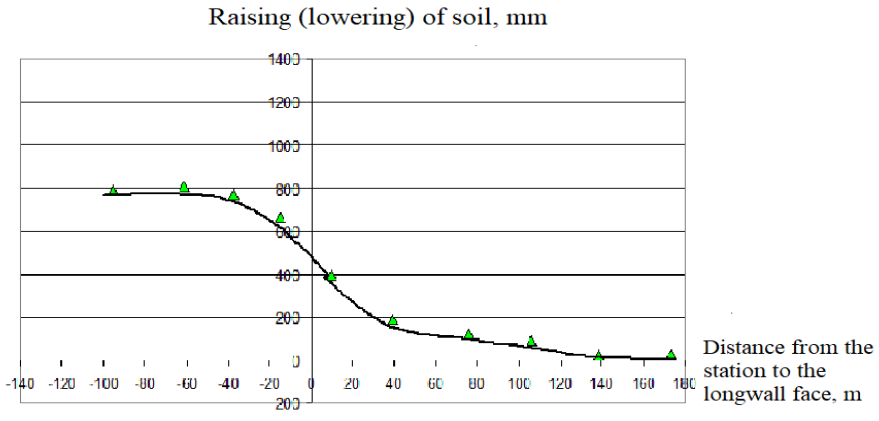


Рисунок 3.7. – Згладжений графік підняття підошви 159-го та 163-го збірних штреків

Спостереження в 1061-біс бортовому штреку і 1061-біс монтажному штреку.

Моніторинг стану виробки включав візуальні спостереження за поведінкою кріплення, а також періодичні вимірювання на контурних спостережних станціях, закладених у 1061-біс бортовому штреку (ПК10 і ПК15) і в 1061-біс монтажному штреку (ПК10). Контурна станція (рис. 3.8) являє собою дерев'яний кілок, забитий у породу в покрівлі та боках очисного вибою.

Під час замірів поперечного перерізу виробки визначали загальну вертикальну конвергенцію (Н) і горизонтальну конвергенцію лави (В) залежно від положення лави.

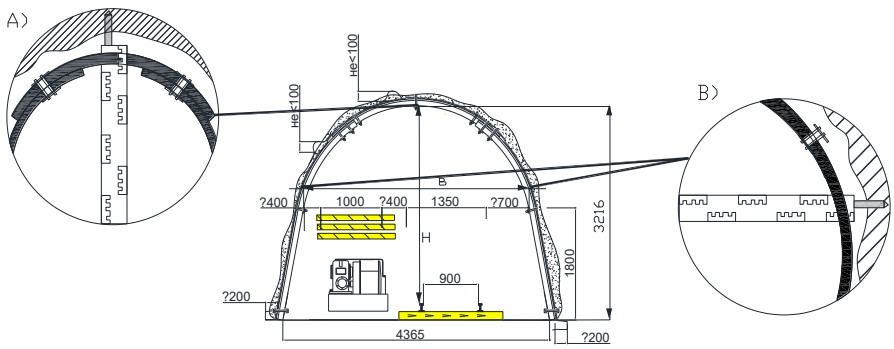


Рисунок 3 – Кріплення підготовчої виробки 1061-біс лави і схема виконання замірів; А - вимір вертикальної конвергенції; Б - вимір горизонтальної конвергенції

3.3 Аналіз результатів досліджень

Систематизовані та узагальнені результати спостережень на контурних станціях за вертикальним і горизонтальним зближенням представлені на рисунку 3.9.

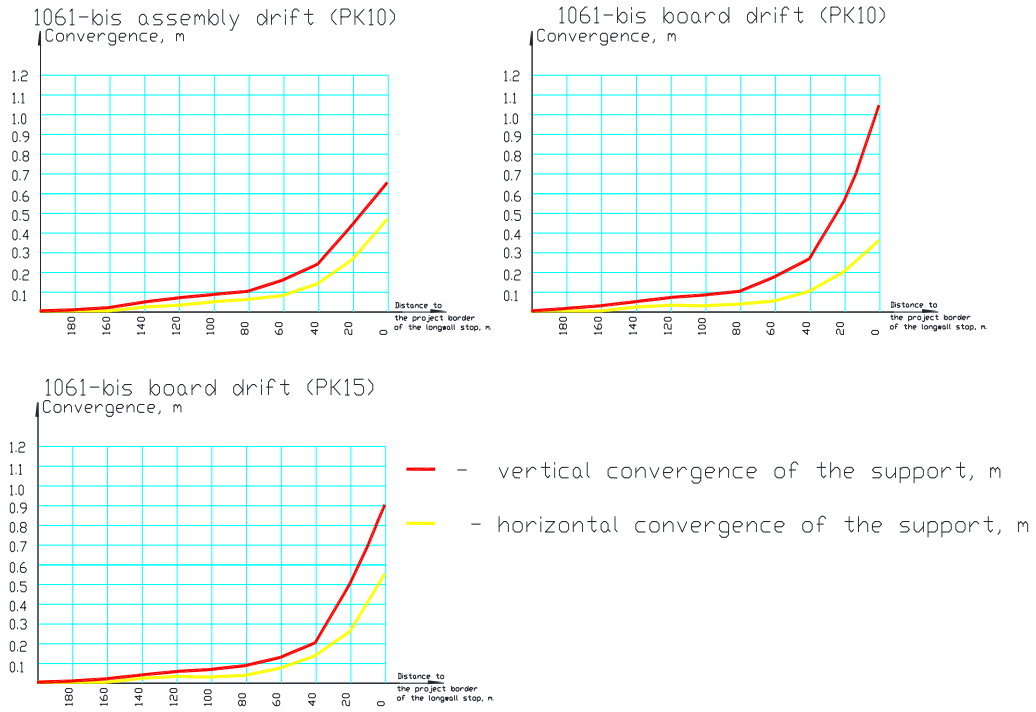


Рисунок 3.9 – Графіки вертикальної і горизонтальної деформації кріплення в залежності від відстані до лави

Результати спостережень за зближенням свідчать про такі закономірності: при наближенні лави на відстань 20 м до проектної межі зупинки лави кріплення істотно не деформується і зближення не перевищує фонового для даних гірничо-геологічних умов. По мірі просування лави підготовчі виробки значно деформуються через збільшення горизонтальних напружень масиву. Це призводить до деформації однієї з виробок з боку лави (рис. 3.10).

Спостереження за вертикальною конвергенцією після зупинки лави (рис. 3.11) дозволили встановити, що в перші 10-18 діб тиск на кріплення підготовчої виробки і, відповідно, його деформація максимальні. Затухання спостерігається з 25-30 доби зупинки. Підготовчі виробки на 30-ту добу втратили близько 60% свого початкового перерізу. Деформовані ділянки виробок почали перекріплюватися на 45-ту добу після зупинки лави 1061-біс.

PK0 PK10



Рисунок 3.10 – Моніторинг стану бортового штреку 1061-біс.

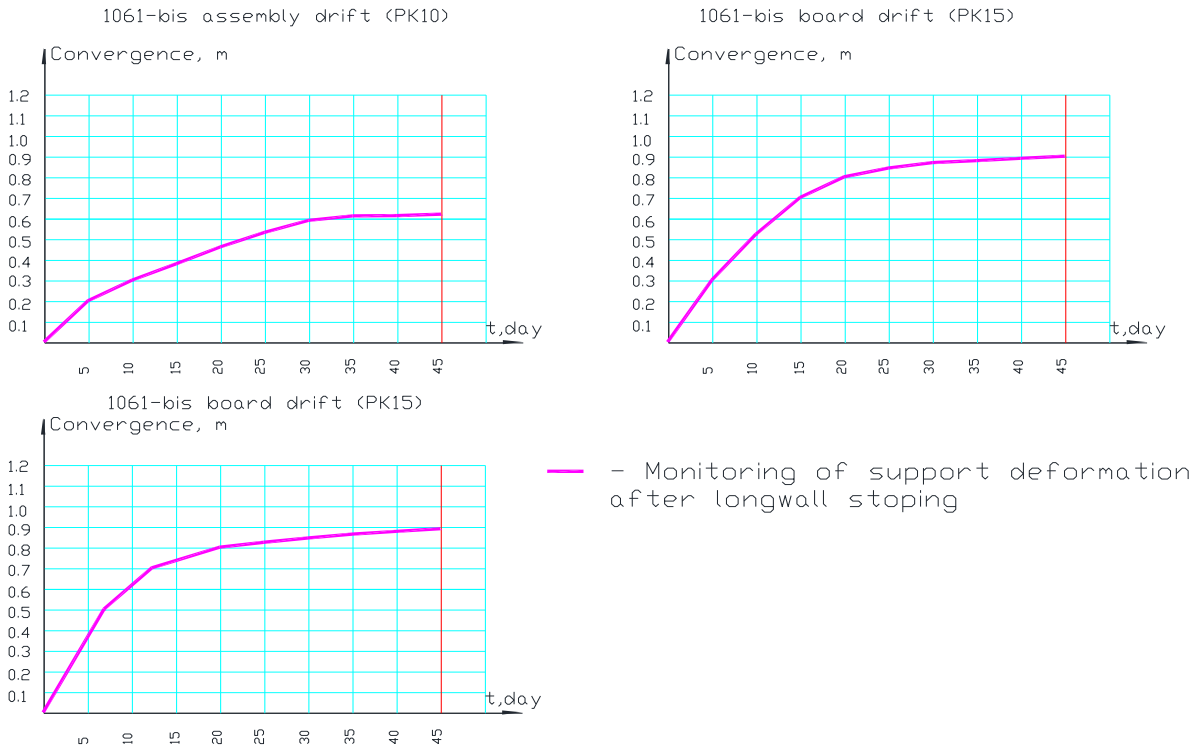


Рисунок 3.11 – Графіки вертикальних і горизонтальних деформацій кріплення в залежності від часу зупинки лави

3.4. Висновки по розділу 3

Загальний аналіз результатів експериментальних спостережень на шахтах «Степова» та ім. Героїв Космосу дозволяє зробити наступні висновки щодо деформування ділянок кріплення підготовчих виробок,

що знаходяться в зоні впливу гірничих виробок:

- вертикальна конвергенція в підготовчих виробках починається на відстані 150 м від лави і досягає максимальних значень 2500-3000 мм при видаленні лави на відстань 200 м;

- в перерізі виробки, що співпадає з лінією лави, середня конвергенція становить 600-1000 мм або близько 25-30% від максимальної;

- розвиток конвергенії в часі по мірі просування лави підпорядковується закону, що описується інтегральною функцією Гаусса;

- покрівля виробки по відношенню до покрівлі вугільного пласта залишається нерухомою до моменту наближення лави на відстань близько 10 метрів;

- починаючи з відстані до лави 10 м, відбувається інтенсивне опускання покрівлі виробки, яке підпорядковується лінійному закону - кожні 10 м збільшення відстані у виробленій частині від виїмкової дільниці до лави призводить до послідовного опускання покрівлі на 100 мм;

- підняття ґрунту в підготовчих виробках починається на відстані 150 м від лави, що наближається;

- розвиток підняття ґрунту на інтервалі 150 м до лави і 150 м після лави відбувається за інтегральним законом Гаусса;

- на момент проходження лави підняття ґрунту в перерізі виробки досягає 600-800 м.

Встановлені закономірності розвитку деформацій у підготовчих виробках дозволяють прогнозувати стійкість виробок, що підтримуються у виробленій частині лав, в умовах шахт Західного Донбасу, оцінювати їх придатність для провітрювання газоповітряної суміші і своєчасно проводити технічні заходи з підтримання виробок.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНОГО МАРКШЕЙДЕРСЬКО-ГЕОДЕЗИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПІД ЧАС МОНІТОРИНГУ ЗРУШЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

4.1 Аналіз перспектив удосконалення інструментарію моніторинга зрушень земної поверхні

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності та оперативності спостережень за деформаціями поверхні в умовах ускладненої геодинамічної обстановки Західного Донбасу. Традиційні методи маркшейдерських знімань часто є трудомісткими та обмеженими за площею охоплення. Тому впровадження сучасних технологій, зокрема знімань із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), відкриває нові можливості для підвищення ефективності маркшейдерського контролю.

Мета дослідження – аналіз та узагальнення методів маркшейдерського моніторингу зрушень земної поверхні при підземному видобутку вугілля в Західному Донбасі з обґрунтуванням доцільності застосування БПЛА.

Західний Донбас характеризується складними гірничо-геологічними умовами, зокрема значною потужністю осадових порід, наявністю водоносних горизонтів і розгалуженою мережею гірничих виробок. Підземний видобуток вугілля призводить до порушення природної рівноваги гірського масиву, що проявляється у вигляді осідань, нахилів, горизонтальних зсувів та розтріскування земної поверхні.

Форма та величина зрушень залежать від глибини розробки, потужності вугільних пластів, системи розробки, фізико-механічних властивостей порід та гідрогеологічних умов. У Західному Донбасі часто

спостерігаються протяжні мульди осідання, що потребують систематичного контролю. Саме маркшейдерські спостереження є основним джерелом кількісної інформації про параметри цих деформацій.

Класичний маркшейдерський моніторинг ґрунтується на створенні та спостереженні спеціальних маркшейдерських мереж – профільних ліній, реперів і маркшейдерських знаків. Основними методами є:

- Геометричне нівелювання, яке забезпечує високу точність визначення вертикальних зрушень;
- Тахеометричні знімання, що дозволяють фіксувати планові та висотні зміщення;
- Спостереження за деформаціями будівель і споруд, розташованих у зоні впливу гірничих робіт.

Незважаючи на високу точність, ці методи мають обмеження щодо оперативності та безпеки виконання робіт, особливо на великих і важкодоступних територіях.

Останніми роками все більшого поширення набувають GPS/GNSS-спостереження, які дають змогу фіксувати повільні горизонтальні та вертикальні деформації поверхні. Однак їх точність та детальність просторового покриття часто є недостатніми для локальних зон активних зрушень.

Особливу актуальність у сучасних умовах набуває використання БПЛА для виконання маркшейдерських знімань. Аерофотознімання з дронів дозволяє оперативно отримувати ортофотоплани і цифрові моделі рельєфу з високою просторовою роздільною здатністю.

Перевагами БПЛА для маркшейдерського моніторингу є:

- можливість швидкого охоплення значних площ;
- висока детальність фіксації мікрорельєфу;
- зменшення ризиків для персоналу;

- можливість регулярного повторного знімання для аналізу динаміки зрушень.

У районах Західного Донбасу БПЛА є особливо ефективними для виявлення зон інтенсивного осідання, тріщин і деформацій поверхні, які можуть залишатися непоміченими при традиційних методах. Інтеграція даних БПЛА з класичними маркшейдерськими спостереженнями суттєво підвищує інформативність моніторингу.

Ще одним цікавим інструментом є інтеграція даних аерознімання (LiDAR та фотограмметрія) з AI-алгоритмами обробки в Trimble Business Center (TBC), що дозволяє радикально пришвидшити побудову цифрових моделей рельєфу (DTM).

Впровадження AI-технологій трансформує роль маркшейдера з виконавця рутинних операцій у аналітика-контролера інтелектуальних систем. Ефективність моніторингу в Західному Донбасі суттєво підвищується завдяки принципу «менше кліків — більше аналізу».

Точність деформаційних моделей тепер забезпечується алгоритмами «розумного» проріджування (Smart Downsampling), які динамічно адаптуються до складності мікрорельєфу, зберігаючи деталі мульд зрушення. Автоматизація процесів за допомогою eCogAI™ забезпечує об'єктивність даних, що є критичним для прогнозування геомеханічних ризиків. Подальша індустріальна імплементація цих методів є необхідним кроком для забезпечення сталого розвитку гірничодобувного комплексу регіону. Використання 3D Deep Learning класифікаторів (табл. 1) дозволяє маркшейдеру зосередитися на аналізі зон осідання, отримуючи високоточні векторизовані дані про зміщення об'єктів інфраструктури.

Таблиця 4.1 – Вплив функцій AI-обробки на можливий функціонал обробки результатів маркшейдерського моніторингу

Функція AI-обробки (TBC/eCogAI™)	Специфікація та вплив на моніторинг деформацій
Smart Downsampling	Проріджування даних із динамічним розміром комірки, що автоматично зменшується при різких змінах нахилу. Це дозволяє зберігати критичні деталі рельєфу (тріщини, борти мульд зрушення).
Bare Ground Filter	Видалення низької рослинності для підготовки «ідеальної основи» під 3D Deep Learning класифікацію земної поверхні.
Classification (Outdoor Aerial)	3D Deep Learning класифікатор, що автоматично розділяє ґрунт, будівлі, рослинність та лінії електропередач для аналізу інфраструктурних ризиків.
Stockpile Extraction	Функція «Stockpile picker» дозволяє одним кліком визначити межу териконів чи складів вугілля, замінюючи десятки ручних операцій для розрахунку об'ємів.
Tunneling Classifier	Автоматичне розпізнавання елементів у виробках: гірська порода, торкрет-бетон, арматурна сітка та анкерне кріплення (rock bolts).
Railway Classifier	Класифікація елементів залізничної інфраструктури (рейки, шпали, баласт), що є життєво важливим для моніторингу підроблюваних колій.

Таким чином, впровадження AI-технологій трансформує роль маркшейдера з виконавця рутинних операцій у аналітика-контролера інтелектуальних систем. Точність отриманих моделей поверхні забезпечується алгоритмами «розумного» проріджування (Smart Downsampling), які динамічно адаптуються до складності мікрорельєфу, зберігаючи деталі мульд зрушення. Автоматизація процесів за допомогою eCogAI™ забезпечує об'єктивність даних, що є критичним для прогнозування геомеханічних ризиків.

Маркшейдерський моніторинг зрушень земної поверхні є невід'ємною складовою безпечного ведення підземних гірничих робіт у Західному Донбасі. Традиційні методи знімань забезпечують високу точність, але потребують доповнення сучасними технологіями.

Застосування безпілотних літальних апаратів у поєднанні з впровадження AI-технологій є перспективним напрямом розвитку маркшейдерських досліджень, оскільки дозволяє підвищити оперативність, наочність і комплексність контролю зрушень. Поєднання класичних та інноваційних методів створює надійну основу для прогнозування деформацій і зменшення негативних наслідків підземного видобутку вугілля.

4.2 Розрахунок похибки положення віддаленого пункту підземного полігонометричного ходу

З усіх видів підземних зйомок маркшейдерів найбільш відповідальними є зйомки в підземних опорних мережах. Це зумовлено тим, що опорні мережі служать головною геометричною основою всіх підземних зйомок та від похибок визначення положення пунктів полігонометричних ходів, що утворюють мережі, залежить точність та надійність вирішення гірничо-геометричних інженерних завдань та складання маркшейдерських планів гірничих виробок.

Відповідно до вимог нормативних маркшейдерських документів середня квадратична похибка положення довільного (найвіддаленішого) пункту опорної мережі не повинна перевищувати 0,6 м для вугільних родовищ та 0,4 мм на плані для інших родовищ корисних копалин. Ці вимоги забезпечуються відповідною точністю та методикою виконання кутових та лінійних вимірювань у полігонометричних ходах.

Впровадження більш продуктивних способів розробки родовищ,

застосування комплексної механізації, збільшення розмірів шахтних полів та процес об'єднання та укрупнення гірських підприємств призвели до того, що довжина полігонометричних ходів підземних опорних мереж сучасних шахт та рудників значно збільшилася та досягає десятків кілометрів. Через особливості побудови підземних опорних мереж створюються передумови для накопичення похибок вимірювань та певних труднощів щодо забезпечення необхідної точності положення пунктів полігонометричних ходів. Особливо це стосується віддалених точок опорних мереж.

Викладене вище пояснює необхідність виконання попередньої оцінки точності положення віддалених пунктів опорної мережі ще на стадії її проектування та вжиття відповідних заходів для підвищення точності у разі невиконання нормативних вимог.

Розрахунок помилки положення віддаленого пункту опорної мережі, як правило, виконується як похибка кінцевого пункту вільного полігонометричного ходу (рис. 4.1) за відомою формулою (1)

$$M_K^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \sum_{i=1}^{i=n} R_i^2 + \mu^2 \sum_{i=1}^{i=n} l_i + \lambda^2 L^2, \qquad (4.1)$$

де m_{β_1}, m_{β_2}, m_{β_3}, … , m_{β_n} - Середні похибки виміряних кутів; $R_i = R_1, R_2, R_n$ - Найкоротші відстані від точки K полігону до відповідних точок ходу; $l_i = l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ - Виміряна довжина сторін ходу; L - Довжина замикаючої, що з'єднує першу і останню точки ходу; λ- Коефіцієнт, що виражає вплив систематичних похибок на одиницю довжини; μ- Коефіцієнт, що виражає вплив випадкових похибок на одиницю вимірюваної довжини.

Розрахунки за схемою рис. 1 можливі при відомих координатах точок полігонометричного ходу. У разі проектування підземної маркшейдерської опорної мережі положення точок ходу невідомо, з

огляду на те, що у проекті побудови мережі встановлюють лише принципову схему, її основні конструктивні елементи, місця визначення опорних дирекційних кутів, місця примикання підземної мережі до пунктів на земній поверхні, місця замикання полігонів та місця встановлення постійних пунктів. Як наслідок застосування формули (1) для розрахунку точності положення віддаленого пункту стає неможливим.

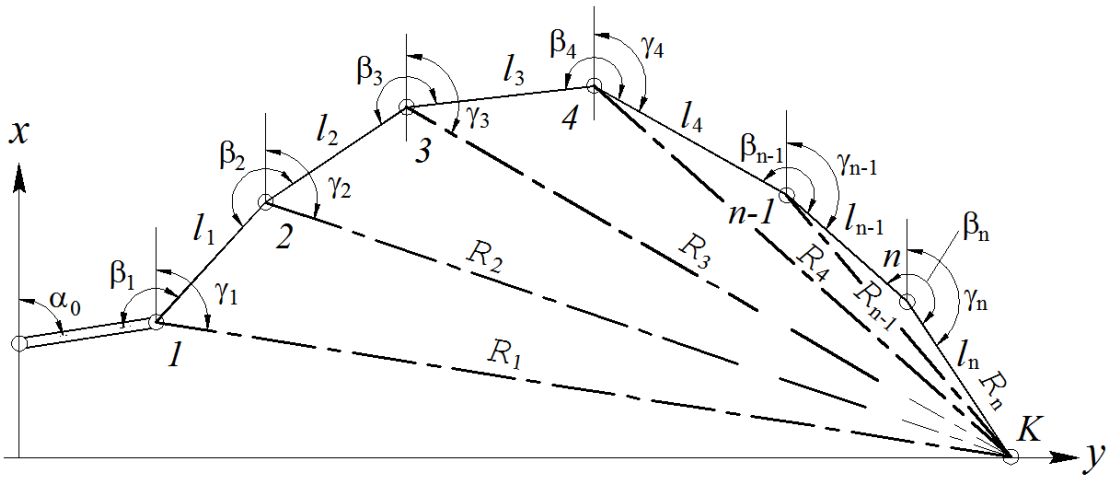


Рисунок 4.1 – Схема вільного полігонометричного ходу для розрахунку точності положення віддаленого пункту

У маркшейдерській практиці застосовуються спрощені методи оцінки точності полігонометричних ходів. Зокрема для розрахунку помилки положення пунктів витягнутих ходів від помилок кутових вимірів рекомендуються формули:

$$M^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \left(\frac{n+1{,}5}{3} \right); \tag{4.2}$$

$$M^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \left(\frac{n}{3} \right). \tag{4.3}$$

У ходах ламаної форми помилки положення пунктів рекомендується виконувати за формулою

$$M_B^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \cdot \frac{(\sum l + L)^2 n}{12} \qquad (4.4)$$

Нами виконано розрахунок похибок віддалених точок (точка К) за строгою формулою (1) та спрощеними формулами (2-4). Усього виконано 54 варіанти розрахунків, що включають 9 різних схем (рис. 2), для кожної з яких змінювалися: довжина ходу S = $\sum l$, середня довжина сторони ходу l , кількість сторін ходу n і довжина замикаючої L. Результати розрахунків за формулою (1) та параметри аналізованих ходів наведені в таблиці 4.2.

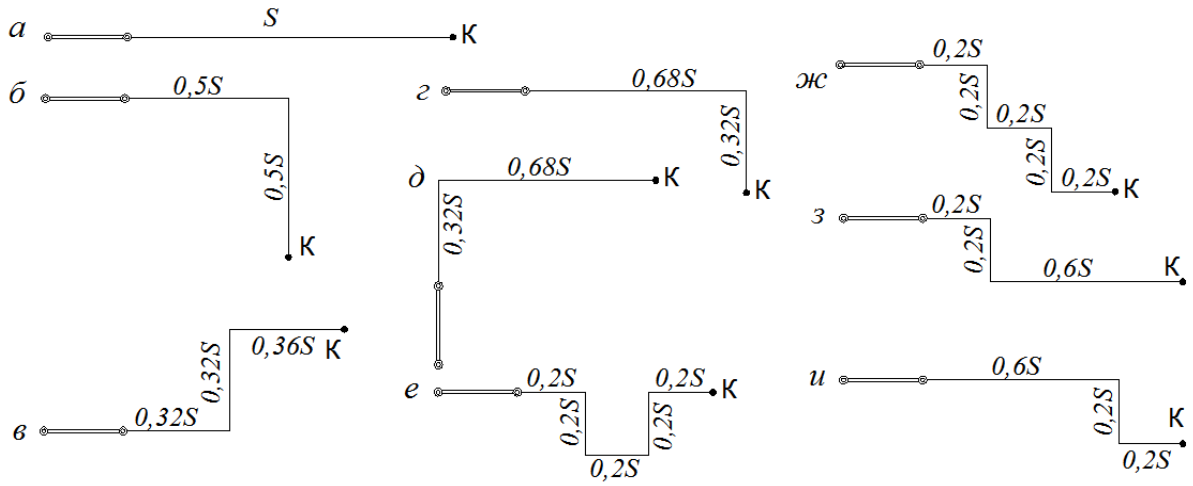


Рисунок 4.2 – Схеми аналізованих полігонометричних ходів

Надалі аналізі значення похибок $M^2_К$, розраховані за формулою (1) приймалися як зразок.

Аналіз результатів отриманих за формулами (2, 3) для витягнутого полігонометричного ходу (варіанту на рис. 2) показав практично повну збіжність з розрахунками по (1). Результати, отримані з використанням

формули (4), вийшли значно завищеними. Максимальне відхилення спрощених розрахунків отримано для варіанта №6 і становить до 70%. Розподіл відносних помилок розрахунку за спрощеною формулою в залежності від схеми ламаного ходу показано на рисунках 4.3, 4.4.

Таблиця 4.2 – Параметри аналізованих полігонометричних ходів

S , м	2040		1980		3000		3960		6000		9000	
l ,м	60		30		60		60		60		60	
n	34		66		50		66		100		150	
№ варіанта	$\sum R^2 \cdot 10^4$, м^2	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^4$, м^2	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^5$, м^2	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^5$, м^2	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^5$, м^2	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^6$, м^2	L, м
а	4927	2040	8822	1980	1545	3000	3528	3960	12180	6000	4090	9000
б	3054	1442	5490	1400	960	2121	2195	2800	7590	4243	2551	6364
в	2741	1530	4901	1476	848	2227	1960	2952	6768	4481	2272	6708
г	3834	1530	6951	1490	1212	2255	2780	2980	9595	4509	3226	6764
д	2741	1530	4910	1490	859	2255	1963	2980	6775	4509	2275	6764
е	1857	1200	3311	1200	580	1800	1324	2400	4577	3600	1554	5460
ж	2563	1465	4589	1431	803	2163	1835	2862	6334	4327	2127	6490
з	3021	1674	5473	1637	954	2474	2189	3274	7515	4948	2522	7422
і	3762	1674	6660	1637	1191	2519	2663	3274	9243	4948	3105	7422

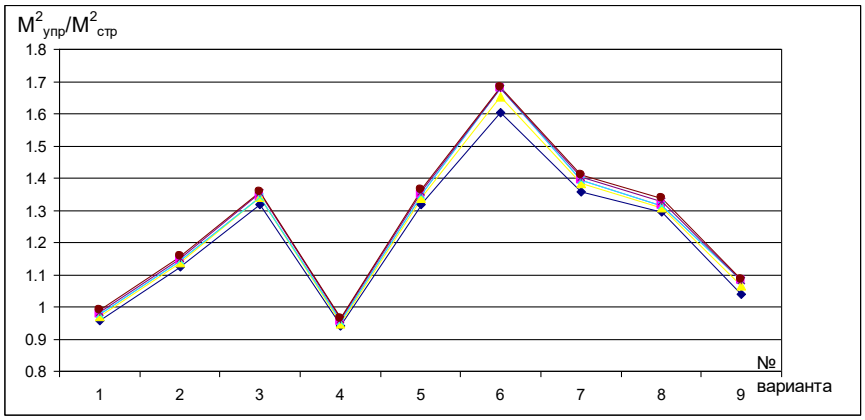


Рисунок 4.3 – Відносні похибки розрахунку за спрощеною формулою (4)

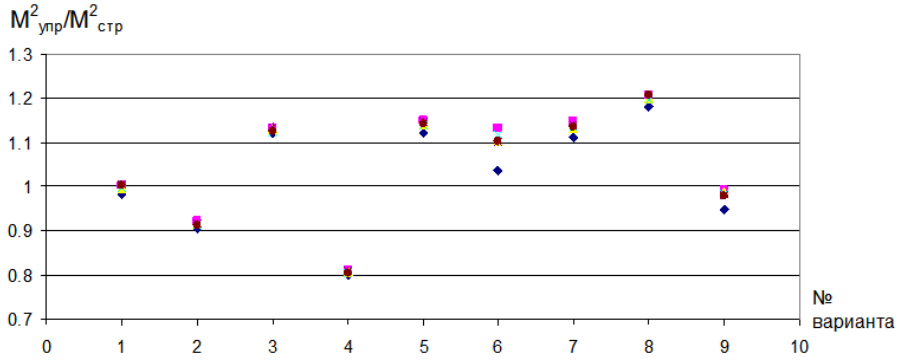


Рисунок 4.4 – Відносні похибки розрахунку за спрощеною формулою (5)

Дослідження похибок положення кінцевих точок полігонометричних ходів ламаної форми різної конфігурації дозволили встановити залежність похибки від довжини ходу, довжини замикаючої та кількості сторін у ході. Для рівностороннього ходу ця похибка визначається виразом

$$M_K^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} n\left(0{,}5L - k\sum l_i\right)\sum l_i \,, \qquad (4.5)$$

де k - Коефіцієнт, що залежить від довжини ходу; при $\sum l_i \le 3000$ м k = 0,158; за 3000 м$\le \sum l_i \le 6000$ м k = 0,16; при $\sum l_i \ge 6000$ м k = 0,162.

Відхилення величин похибок, розрахованих за формулою (5) від еталонних значень для 54 варіантів полігонометричних ходів не перевищують 20% (див. рис. 4.4), що значно точніше за розрахунки за формулою (4).

Такий результат отриманий і при аналізі похибок полігонометричних ходів, що мають різні значення довжин l_i, обрані довільно в діапазоні від 30 до 240 м.

На стадії проектування підземних маркшейдерських опорних мереж застосування строгих формул для розрахунку похибок полігонометричних ходів може виявитися неприйнятним через відсутність геометричної інформації про розташування пунктів ходів, що проектуються.

Спрощена формула, що рекомендується ВНИМИ, для передрахунку похибки віддаленого пункту полігонометричного ходу ламаної форми дає завищені значення похибок, які можуть в 1,7 рази перевищувати результати розрахунків за суворою формулою.

Встановлено, що основними параметрами полігонометричного ходу ламаної форми, що визначають величину похибки положення його кінцевої точки від похибок кутових вимірювань, є: довжина ходу, довжина його замикаючої та кількість сторін ходу.

Отримана в результаті досліджень формула для спрощеного розрахунку дозволяє визначити похибку положення кінцевої точки полігонометричного ходу ламаної форми з точністю 20%, що задовольняє точності інженерних розрахунків. Застосування цієї формули значно спрощує маркшейдерські розрахунки за відсутності необхідної геометричної інформації про положення пунктів полігонометричних ходів, що проектуються.

ВИСНОВКИ

Безпечна реалізація ПГВ потребує геомеханічного обґрунтування впливу порожнин, які утворюються внаслідок вилучення вугілля, на об'єкти поверхневої інфраструктури та породну товщу, а визначальним є встановлення залежності між шириною захисних ціликів, розподілом напружень у масиві, деформаціями покривних порід і осіданням земної поверхні. Виконані на першому етапі дослідження за чотирма взаємопов'язаними напрямами дають відповідь на поставлену задачу та формують методичну основу для її подальшого вирішення.

За результатами чисельного моделювання геомеханічного стану масиву навколо порожнин ПГВ, реалізованої методом керованого переміщення точки дуття, встановлено, що за умови збереження несучої здатності запобіжних ціликів осідання поверхні та переміщення покривних порід залишаються в допустимих межах: для пласта потужністю 1,05 м на глибині 392–465 м вертикальні осідання не перевищують 27 мм при ширині цілика 15,0 м (вилучення 70 %) і 46 мм при ширині 3,75 м (вилучення 90 %), а зона зміни напружень над порожниною не поширюється вище 70 м. Водночас максимальні стискальні напруження в ціликах (86,6 та 109 МПа) уже перевищують граничну міцність порід, що свідчить про недостатній запас їх стійкості. Моделювання песимістичного сценарію (руйнування ціликів), відкаліброване за даними моніторингу осідання над лавою пласта І1 шахти «Котляревська» (похибка 1,27 % і 4,72 %), показало зростання осідання у 11,7–19,9 раза, що підтверджує ключове значення параметрів ціликів для безпеки інфраструктури та водоносних горизонтів.

Оскільки коректна оцінка впливу гірничих робіт на земну поверхню є умовою управління геомеханічними ризиками ПГВ, у другому розділі вдосконалено методику прогнозування зрушень для відпрацювання

пластів вхрест простягання, не врахованого чинною нормативною методикою. За результатами графоаналітичного аналізу натурних маркшейдерських спостережень на шахтах Західного Донбасу встановлено, що мульда зрушення в плані набуває не еліптичної, а «грушоподібної» форми, а розрахунки за діючою методикою дають завищені значення деформацій з боку падіння пласта і занижені — з боку повстання. Це доводить, що застосування типової методики без урахування напряму відпрацювання й повторної підробки може призводити до суттєвих помилок прогнозу зрушень і, як наслідок, до неадекватної оцінки безпеки об'єктів над гірничими роботами, включно з майбутніми панелями ПГВ.

У третьому розділі досліджено закономірності деформування підготовчих виробок повторного використання в слабких обводнених породах Західного Донбасу — умови, аналогічної підтриманню целіків і прилеглих порожнин при ПГВ. За результатами спостережень на шахтах «Степова» та ім. Героїв Космосу встановлено закономірності розвитку вертикальної конвергенції (до 2500–3000 мм на відстані 200 м від лави), опускання покрівлі (лінійне, 100 мм на кожні 10 м у межах останніх 10 м) і підняття ґрунту виробки (600–800 мм, за законом інтегральної функції Гаусса). Ці залежності дають змогу прогнозувати стійкість виробок, оцінювати їх придатність для провітрювання газоповітряної суміші та своєчасно призначати заходи з підтримання — застосовне при проєктуванні майбутніх дільниць ПГВ.

Четвертий розділ присвячено аналізу маркшейдерсько-геодезичного інструментарію для моніторингу зрушень поверхні, необхідного для верифікації результатів розділів 1–2 і контролю стану поверхні при можливій експлуатації об'єктів ПГВ. Обґрунтовано доцільність застосування безпілотних літальних апаратів і лазерного сканування у поєднанні з AI-обробкою даних (Trimble Business Center, eCogAI™, Smart Downsampling) для оперативного охоплення значних

площ, підвищення деталізації мікрорельєфу та зниження ризиків для персоналу порівняно з традиційними нівелюванням і тахеометрією. Окремо отримано формулу для спрощеного розрахунку похибки положення кінцевої точки підземного полігонометричного ходу ламаної форми (відхилення не більше 20 % відносно строгого розрахунку за 54 варіантами схем), застосовну на стадії проєктування мереж спостереження за порожнинами ПГВ, коли повна геометрична інформація про хід ще відсутня.

Таким чином, дослідження першого етапу підтверджують сформульовану у вступі актуальність задачі: встановлено залежності між шириною цілiків і осіданням поверхні та напруженнями в масиві (розділ 1); вдосконалено методику прогнозування зрушень для нетипових напрямів відпрацювання (розділ 2); визначено закономірності деформування виробок у зоні впливу очисних робіт (розділ 3); обґрунтовано інструментальну базу моніторингу зрушень (розділ 4). Разом ці результати формують методичну основу геомеханічного обґрунтування системи «газогенератор–цілик–покривні породи» для мінімізації екологічних ризиків ПГВ і ефективного використання ресурсу вугільного пласта.

Результати роботи опубліковані:

1. Сахно І.Г., Сахно С.В., Богомаз О.П., Андрєєва А.В. Геомеханічний аналіз впливу підземної газифікації вугілля на осідання земної поверхні і стійкість покривних порід вуглепородної товщі. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, 2026, 7, 237-246.

2. Назаренко В.О., Бруй Г.В., Панасюк А.В., Молокова С.В., Куницька М.С. Удосконалення методики прогнозування впливу очисних гірничих робіт на земну поверхню за даними маркшейдерських інструментальних вимірювань. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки,* 2026, 7, 185-192.

3. Kuchin O., Nazarenko V, Bruy H. & Balafin I. (2025) Regularities of deformation of preparatory workings for reuse in weak rocks of the Western Donbas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1491, 012063. doi:10.1088/1755-1315/1491/1/012063 (Scopus).

4. Назаренко В., Бруй Г. Маркшейдерські спостереження руйнування масиву навкруги підготовчої виробки. Science and Information Technologies in the Modern World: Collection of Scientific Papers “International Scientific Unity” with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. February 26-28, 2025. Athens, Greece. 92-93 p. URL: https://isu-conference.com/en/archive/science-and-information-technologies-in-the-modern-world-26-02-25/

5. Таран Я.Г., Назаренко В.О. Аналіз використання сучасного маркшейдерсько-геодезичного обладнання під час моніторингу зрушень земної поверхні. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки. – Житомир : Житомирська політехніка, 2026. – 354-355 с.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Klimenko A. Early Ideas in Underground Coal Gasification and Their Evolution. *Energies*. 2009. Vol.2 (2). P. 456–476. https://doi.org/10.3390/en20200456

2. Shafirovich E., Varma A. Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2009. Vol. 48, no. 17. P. 7865–7875. https://doi.org/10.1021/ie801569r

3. Burton E., Friedmann J., Upadhye R. Best practices in underground coal gasification (Contract No. W-7405-Eng-48). Lawrence Livermore National Laboratory. 2006.

4. Couch G. Underground coal gasification (CCC/151). IEA Clean Coal Centre. 2009.

5. Sarhosis V., Yang D., Sheng Y., Kempka T. Coupled hydro-thermal analysis of underground coal gasification reactor cool down for subsequent CO_2 storage. *Energy* Procedia. 2013. Vol. 40. P. 428–436. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.049

6. Sury M., White M., Lucas C. Review of underground coal gasification technologies and practices. DTI Cleaner Coal Technology Programme. 2004.

7. Imran M., Kumar D., Kumar N., Qayyum A., Saeed A. Environmental concerns of underground coal gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2014. Vol. 31. P. 600–610. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.025

8. Najafi M., Jalali S. M. E., KhaloKakaie, R. Thermal– mechanical–numerical analysis of stress distribution in the vicinity of underground coal gasification (UCG) panels. *International Journal of Coal Geology*. 2014. Vol. 134. P. 1-16.

9. Sirdesai,N. N., Singh R., Singh T. N., Ranjith P. G. Numerical and experimental study of strata behavior and land subsidence in an

underground coal gasification project. *Proc. IAHS*. 2016. Vol. 372. P. 455–462. https://doi.org/10.5194/piahs-372-455-2015

10. Akbarzadeh H., Chalaturnyk R. J. Structural changes in coal at elevated temperature pertinent to underground coal gasification: A review. *International Journal of Coal Geology.* 2014. Vol. 131. P. 126–146. https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.06.009

11. Buscheck T. E., Kuder T., Philip R., Kolhatkar R., Klinchuch L. Two-dimensional compound-specific isotope analysis to assess remediation system effectiveness, in situ and on-site bioremediation. *Tenth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium*. Baltimore, MD, United States, 2009.

12. Corkum A. G., Board M. P. Numerical analysis of longwall mining layout for a Wyoming trona mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016. Vol. 89. P. 94–108. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.09.001

13. Seifi M., Chen Z., Abedi J. Large scale simulation of UCG process applying porous medium approach. *Can. J. Chem. Eng.* 2015. Vol. 93. P. 1311–1325. https://doi.org/10.1002/cjce.22218

14. Lozynskyi V., Falshtynskyi V., Kozhantov A., Kieush L., Saik P. Increasing the underground coal gasification efficiency using preliminary electromagnetic coal mass heating. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2024. Vol. 1348. P. 012045. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012045/

15. Wang X., Zhang Q., Yuan L. A coupled thermal-force-chemical-displacement multi-field model for underground coal gas-ification based on controlled retraction injection point technology and its thermal analysis. *Energy*. 2024. Vol. 130614. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130614

16. Yang D., Sarhosis V., Sheng Y. Thermal–mechanical modelling around the cavities of underground coal gasification. *Journal of the Energy Institute*. 2014. Vol. 87(4). P. 321-329. https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.029

17. Zha X.X., Wang H.Y., Cheng S.S. Finite element analysis of the subsidence of cap rocks during underground coal gasi-fication process. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 859. P. 91-94. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.859.91

18. Lee K., Nam J., Park J., Hong G. Numerical Analysis of Factors Influencing the Ground Surface Settlement above a Cavity. *Materials*. 2022. Vol. 15(23). P. 8301. https://doi.org/10.3390/ma15238301

19. Liu X., Xu L., Zhang K. Strata movement characteristics in underground coal gasification (UCG) under thermal coupling and surface subsidence prediction methods. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(8). P. 5192. https://doi.org/10.3390/app13085192

20. Sakhno I., Sakhno S., Petrenko A., Barkova O., Kobylianskyi B. Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*. 2023. Vol. 1254. P. 012057. https://doi.org/10.3390/app14135733

21. Zhang C., Tu S., Zhao Y. Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf: A review. *Environmental Earth Sciences*. 2019. Vol. 78. P. 27. https://10.1007/s12665-018-8037-7

22. Barla G. Rock anisotropy: Theory and laboratory testing. *Rock mechanics* / ed. by L. Müller. Springer-Verlag. 1972. P. 131–169.

23. Cazacu O., Cristescu N.D., Sha J.F., Henry J.P. A new anisotropicfailure criterion for transversely isotropic solids. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials.* 1998. Vol. 3. P. 89-103.

23. Oka F., Kimoto S., Kobayashi H., Adachi T. Anisotropic behaviorof soft sedimentary rock and a constitutive model. *Soils and Foundations*. 2002. Vol. 42 (5). P. 59-70.

24. Khanlari G., Rafiei B., Abdilor Y. Evaluation of strength anisotropy and failure modes of laminated sandstones. *Arab J Geosci*. 2015. Vol. 8(5). P. 3089-3102. https://10.1007/s12517-014-1411-1

25. Sakhno I.G., Molodetskyi A.V., Sakhno S.V. Identification of material parameters for numerical simulation of the behavior ofrocks under true triaxial conditions. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. Vol. 5. P. 48–53. https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/4

26. ДСТУ 101.00159226.001-2003 Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. Галузевий стандарт. Київ: Мінпаливенерго України, 2004. 127 с.

27. Kuchin O.S., Chemakina M.V. & Balafin I.E. (2017) Displacement of undermining rock mass above the moving longwall. Scientific Bulletin of National Mining University, 1, 55–60.

28. Bazaluk, O., Kuchyn, O., Saik, P., Soltabayeva, S., Brui, H., Lozynskyi, 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

29. 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), 28–36. https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.028

30. V. Nazarenko, H. Brui, O. Kuchin, & I. Balafin. (2025) Investigation of reused preparatory workings deformations of as a result of cleaning operations. Mongolian Geoscientist, 30(60), 1–9. https://doi.org/10.5564/mgs.v30i60.3592

31. Sakhno, I., Sakhno, S., & Vovna, O. (2025). Surface Subsidence Response to Safety Pillar Width Between Reactor Cavities in the Underground Gasification of Thin Coal Seams. Sustainability, 17(6), 2533. https://doi.org/10.3390/su17062533

32. Sakhno I., Sakhno S., Petrenko A., Barkova O. & Kobylianskyi B. (2023) Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. IOP

Conf. Ser. Earth Environ. Sci., 1254, 012057. https://doi.org/10.3390/app14135733

33. Bubnova O. (2024) Regularities of subsidence development during multiple underworking of the earth's surface in the Lviv-Volyn coal basin conditions. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 1348, 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012065

34. Zberovskyi V., Bubnova O. & Babii K. (2018) Specifics of hydro-loosening of coal seams with account of rocks displacement parameters. Ukrainian School of Mining Engineering, 60, 00025. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000025

35. Chetveryk M., Bubnova O. & Babiy K. (2017) The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface. *Mining of Mineral Deposits*, **11(1)**, 57–64. https://doi.org/10.15407/mining11.01.057

36. КД 12.01.01.201-98 Розташування, охорона та підтримання гірничих виробок при відпрацюванні вугільних пластів на шахтах, К.: УкрНИМИ, 1998, 149 с.

37. СОУ 10.1.00185790.011:2007 Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони, Мінвуглепром України, 2007, 113 р

38. Інструкція з забезпечення стійкості дільничних виробок для повторного використання на вугільних шахтах, Міністерство енергетики України, 2022, https://ips.ligazakon.net/document/RE39001?an=20

39. Інструкція з управління гірничим тиском у гірничих виробках під (над) кріпленням і крайовими частинами при розробці вугільних пластів потужністю до 3,5 м з кутом падіння до 35°, Мінвуглепром України, 1984, 62 р

40. Bulat A., & Chekhov V. 1992. Problems of stability of the wall rock in the working of deep coal seams. International Applied Mechanics, 28(12), 832–838. https://doi.org/10.1007/bf00847320

41. Krukovskyi O., Bulich Y., Kurnosov S., Yanzhula O., & Demin V. 2022. Substantiating the parameters for selecting a pillar width to protect permanent mine workings at great depths. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 970(1), 012049–012049. https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012049

42. Skipochka S. 2019. Conceptual basis of mining intensification by the geomechanical factor. E3S web of conferences, 109, pp.00089–00089. doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900089.

43. Pylypenko Y., Konstantynova I., Kliuiev T., & Ptak M. 2022. Stress reindexation in coal seams when mining works cross zones of rupturing dislocations. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 970(1), 012047–012047. https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012047

44. Cheng G, Li L, Zhu W, Yang T, Tang C, Zheng Y and Wang Y 2019 Microseismic investigation of mining-induced brittle fault activation in a Chinese coal mine Int. J. Rock Mech. Min. Sci 123 104096, https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104096

45. Voloshyn O. and Riabtsev O. 2019. Some important aspects of rock mechanics and geomechanics. E3S web of conferences, 109, pp.00114–00114. doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900114.

46. Li Q, Li J, Zhang J, Wang C, Fang K, Liu L and Wang W 2019 Numerical simulation analysis of new steel sets used for roadway support in coal mines Metals 9 606, https://doi.org/10.3390/met9050606

47. Rułka K, Mateja J, Kowalski E, Skrzyński K, Stałęga S, Wojtusiak A and Schinohl J 2021 Simplified rules for the selection of frame support for roadway workings in hard coal mining plants Central Mining Institute Publishing House (Katowice, Poland) pp. 1–30 (In Polish)

48. Krukovskyi O, Kurnosov S, Makeyev S and Stadnychuk M 2023 Determination of the reliability of mine support equipment considering its

deformation risks Strength of Materials 55 475-483, https://doi.org/10.1007/s11223-023-00540-5

49. Xie Z, Zhang N, Wei Q, Wang J and Sharifzadeh M 2021 Study on mechanical properties and application of a new flexible bolt Appl. Sci. 11 924, https://doi.org/10.3390/app11030924

50. Wang P, Zhang N, Kan J, Wang B and Xu X 2021 Stabilization of rock roadway under obliquely straddle working face Energies 14 5759, https://doi.org/10.3390/en14185759

51. Wang J, Apel D, Xu H, Wei C and Skrzypkowski K 2022 Evaluation of the effects of yielding rockbolts on controlling self-initiated strainbursts: a numerical study Energies 15 2574, https://doi.org/10.3390/en15072574

52. Krukovskyi O, Krukovska V, Kurnosov S, Korobchenko V and Zerkal V 2023 The use of steel and injection rock bolts to support mine workings when crossing tectonic faults IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1156(1) 012024, https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012024

53. Šňupárek R and Konečný P 2021 Stability of roadways in coalmines alias rock mechanics in practice J. Rock Mech. Geotech. Eng 2 281–288, https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2010.00281

54. Shan R, Li Z, Wang C, Wei Y, Bai Y, Zhao Y and Tong X 2021 Research on the mechanism of asymmetric deformation and stability control of near-fault roadway under the influence of mining Eng. Fail. Anal. 127 105492, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105492

55. Krukovskyi O, Krukovska V, Bulich Y, Demchenko S and Konstantynova I 2024 Rock bolt and frame support of mine workings with a compound cross-section: Collective refuge chambers for mine workers Mining of Mineral Deposits 18(2) 28-37, https://doi.org/10.33271/mining18.02.028

56. Krukovskyi O and Krukovska V 2023 Supporting a mine working with a shelter in various mining and geological conditions Inzynieria Mineralna 51(1) 45-52, https://doi.org/10.29227/IM-2023-01-05

57. Mei Y, Li W, Yang N, Wang G, Li T and Sun T 2020 Failure mechanism and optimization of arch-bolt composite support for underground mining tunnel Adv. Civ. Eng 2020 5809385, https://doi.org/10.1155/2020/5809385

58. Kang H, Jiang P, Wu Y and Gao F 2021 A combined “ground support-rock modification-destressing” strategy for 1000-m deep roadways in extreme squeezing ground condition Int. J. Rock Mech. Min. Sci.142 104746, https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104746

59. Zberovskyi V., Bubnova O. and Babii K. 2018 Specifics of hydro-loosening of coal seams with account of rocks displacement parameters. E3S Web Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering, 60, 00025, https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000025

60. Liu H, Jiang Z, Chen W, Chen F, Ma F, Li D, Liu Z and Gao H 2022 A simulation experimental study on the advance support mechanism of a roadway used with the longwall coal mining method Energies 15 1366, https://doi.org/10.3390/en15041366

61. Кучин ОС, Бруй ГВ та Янкін ОЄ 2023 Моделювання просторового зміщення точок земної поверхні за результатами геодезичних спостережень Просторовий розвиток: Науковий збірник 3 122-131, https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.3.122-133

62. Kuchin O, Brui H, Yankin O and Ishutina H 2023 The relationship between lowering the Earth's surface and bearing pressure above the advancing longwall face JGD 1(34) 28-36, https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.028

63. Chetveryk M., Bubnova O. and Babiy K. 2017. The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying

monitoring on the earth surface. Min. miner. depos. 11(1), 57-64. https://doi.org/10.15407/mining11.01.057

64. Bazaluk O, Kuchyn O, Saik P, Soltabayeva S, Brui H, Lozynskyi V and 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

65. Bubnova O. 2024. Regularities of subsidence development during multiple underworking of the earth's surface in the Lviv-Volyn coal basin conditions / IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1348, 012065. DOI 10.1088/1755-1315/1348/1/012065