

УДК 622.831

DOI: 10.31474/2415-7902-2019-1(2)-2(3)-54-79

С.Г. Негрій, Т.О. Негрій

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОВЕДІНКИ СЛАБКИХ БІЧНИХ ПОРІД НАВКОЛО ЗАСОБІВ ОХОРОНИ

Мета: вивчення процесів, які відбуваються в засобі охорони та навколишніх породах з метою визначення їх впливу на стан підготовчої виробки, що охороняється, для подальшої розробки заходів щодо забезпечення її експлуатаційного та безпечного стану.

Методика: аналіз результатів сучасних науково-технічних досягнень за станом підготовчих виробок, шахтні натурні спостереження за станом гірничих виробок, моделювання з використанням методу скінчених елементів для виявлення особливостей поведінки слабких бічних порід навколо засобів охорони.

Результати: виконано аналіз результатів наукових досліджень щодо забезпечення стійкості підготовчих виробок у слабких бічних породах. Розглянуто механізм деформування порід навколо засобів охорони та обґрунтовано необхідність використання положень механіки ґрунтів для вирішення задач забезпечення стійкості виробок позаду лав. На основі результатів чисельного моделювання методом скінчених елементів отримано залежності величини осідання та усадки засобу охорони підготовчих виробок від основних факторів, що впливають, а саме: величини навантаження на засіб, його ширини, початкової висоти та модуля деформацій і коефіцієнта поперечних деформацій, а також характеристики стисливості порід, які підстилають охоронну споруду. Також встановлено закономірність зміщень порід покрівлі у підготовчій виробці на ділянці її підтримання позаду лави з урахуванням зміщень порід над крайовою частиною пласта, кінцевою ділянкою та над засобом охорони, які залежать від вищезазначених факторів. Розроблено аналітико-експериментальний метод розрахунку зміщень порід покрівлі у підготовчій виробці, що знаходиться в зоні тимчасового опорного тиску позаду лави.

Наукова новизна: на основі чисельного моделювання досліджено закономірності розподілу навантажень в засобах охорони та навколо них та зміщень порід на контурі виробки, що охороняється, в залежності від основних факторів, які впливають.

Практичне значення: встановлені закономірності можуть бути використані для вивчення деформацій порід навколо гірничих виробок, що охороняються позаду лави, особливо при їх закладанні у слабких бічних породах для розробки ефективних засобів охорони.

Ключові слова: слабкі бічні породи, засіб охорони, зміщення порід, чисельне моделювання, методика, факторний аналіз.

Вступ. Для незалежної України стратегічною енергетичною сировиною декілька десятиліть буде залишатися кам'яне вугілля, оскільки в умовах розвитку альтернативних джерел енергії в нашій країні це відбувається відносно повільно. Крім того, залишаються ще невідпрацьованими запаси в межах деяких вуглепромислових районів, видобуток яких буде економічно доцільним та соціально необхідним, оскільки діяльність вугільної галузі пов'язана з шахтарськими містечками, підприємствами енергетики, машинобудування, металургії тощо.

Перспективними вуглепромисловими районами Донбасу є: Петриківський, Новомосковський, Лозовський, Павлоградський-Петропавлівський, Південно-Донбаський, Покровський, Лисичанський та Північний Донбас. Ці райони на більшій площі представлені вугіллями з низьким ступенем метаморфізму марок Д і Г, які, як правило, залягають у бічних породах з низькою міцністю на стиск, незначною щільністю, у пористих пісковиках та пластичних глинистих породах. Тобто розвиток даних районів буде супроводжуватися проведенням і підтриманням виробок в слабких бічних породах, що може бути однією з основних проблем при освоєнні запасів вугілля. Тому дослідження особливостей поведінки слабких бічних порід навколо виробок, в тому числі при їх охороні позаду лав є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню забезпечення стійкості гірничих виробок у слабких низькометаморфізованих бічних породах присвячені наукові дослідження багатьох вчених, з яких в окрему групу можна виділити роботи,

які присвячені умовам відпрацювання запасів Західного Донбасу, оскільки у цьому районі гірські породи мають суттєві відмінні риси з точки зору охорони виробок [1]. В таких умовах несприятливі прояви гірського тиску спостерігаються вже на глибинах від 200-300 м, коли, на відміну від інших районів, такі складності починалися з глибин 700-800 м. Слабометаморфізовані глинисті породи мають невисоку міцність, зміщення контуру виробок досягають десятків сантиметрів, руйнується затяжка та металеве аркове кріплення. При недостатній несучій здатності кріплення зміщення порід мають практично незатухаючий характер. В результаті цього стає неможливим безремонтне підтримання виробок. Відсутність належних заходів боротьби зі здиманням порід підпошви потребує проведення періодичних підрибок [1].

У напрямку розробки заходів щодо охорони гірничих виробок в слабких бічних породах, особливо в умовах шахт Західного Донбасу, присвячені праці Б.М. Усаченка [1, 2], в яких розглядаються гірничо-геологічні умови Західного Донбасу, наводяться результати експериментально-теоретичних досліджень реологічних властивостей порід та стійкості гірничих виробок. Наведений великий обсяг результатів шахтних досліджень проявів гірського тиску у виробках та розглянутий вплив властивостей порід та гірничо-технічних факторів на їх стійкість [2]. Також розглянуто геомеханічні основи охорони гірничих виробок, які підтримуються в слабометаморфізованих породах на великих глибинах [2].

Практичне значення має методика розрахунку переміщень контуру пластових підготовчих виробок в шаруватому масиві слабких порід [3, 4], яка ґрунтується на результатах експериментально-аналітичних досліджень напружено-деформованого стану породного масиву і кріплення пластової виробки та призначена для оцінювання проектних рішень щодо вибору типових перетинів виробок, які використовуються в умовах шахт Західного Донбасу на глибинах до 600 м. Ці дослідження лягли в основу методів розрахунку переміщень та зміцнень приконтурних порід гірничих виробок [4], а також дозволили розробити інженерний метод розрахункових параметрів вантажонесучих елементів податливого рамно-анкерного кріплення і стійкості порід берми [5]. Рамно-анкерне кріплення розглядається як окремо, так і сумісно з охоронною конструкцією позаду лави, які разом створюють охоронну систему, яка дозволяє підвищити стійкість виїмкових виробок при розробці пологих тонких і надтонких вугільних пластів Донбасу високонавантаженими лавами [6].

Проблема забезпечення стійкості гірничих виробок у нестійких породах розглядається у роботах [7, 8]. На основі вивчення процесів деформування та руйнування масиву гірських порід оцінюється ефективність використання в таких умовах різних кріплень та канатних анкерів.

Треба відзначити дослідження, що ґрунтуються на результатах шахтних натурних спостережень в умовах шахт Південного та Західного Донбасу [9, 10, 11, 12], оскільки вони створюють основу для подальшої розробки та удосконалення способів та засобів охорони гірничих виробок в слабких бічних породах.

Всі наведені вище дослідження спрямовані на вивчення напружено-деформованого стану слабких порід навколо гірничих виробок для розробки ефективних технологій охорони виробок. Та, незважаючи на їх великий обсяг, питання забезпечення стійкості виробок залишається не достатньо вирішеним. Зокрема, на вивчених залишаються процеси, що протікають в штучній охоронній конструкції та під нею в умовах, коли породи підпошви нестійкі. Вважається, що використання жорстких споруд неефективне на таких породах. Хоча це питання дискусійне, оскільки, не ясно, що буде кращим з точки зору стійкості виробки та: вдавлювання жорсткої конструкції у породи підпошви або усадка будової полоси на 60 % своєї початкової

висоти. Це вказує на те, що проведення досліджень щодо встановлення особливостей поведінки слабких бічних порід навколо засобів охорони є актуальним.

Мета досліджень. Метою статті є вивчення процесів, які відбуваються в засобі охорони та навколишніх породах з метою визначення їх впливу на стан підготовчої виробки, що охороняється, для подальшої розробки заходів щодо забезпечення її експлуатаційного та безпечного стану.

Виклад основного матеріалу. Задачею різних засобів охорони з боку виробленого простору є забезпечення мінімальної різниці між конвергенціями порід покрівлі та підосви з обох боків виробки, оскільки конвергенція з боку вугільного масиву після проходу лави складає 10-50% від потужності пласта, а з боку виробленого простору – 30-80% [13] для забезпечення збереження експлуатаційного стану виробки, що охороняється. Тому необхідне використання засобів з такими параметрами, при яких буде досягнуте зменшення конвергенції порід, що залягають над та під ними.

Зміщення порід навколо засобів охорони залежать від низки параметрів, які характеризують засіб охорони та вміщуючи породи. Породи покрівлі з боку виробленого простору втрачають природну опору за рахунок виймання вугільного пласта та отримують штучну, яка, як правило, менша за величиною та допускає деяку усадку на початковому етапі її експлуатації. Якщо над охоронною спорудою й під нею залягають стійкі бічні породи та їм надається достатній опір, зміщення можуть бути мінімальними. У разі, якщо опір стисненню засобу охорони R_o буде менше діючого на нього навантаження з боку покрівлі, то найбільш імовірно, що в зоні впливу опорного тиску лави, відбудеться усадка споруди на величину Δh , що спричинить послідовну деформацію порід над ним і виробкою. Для виключення усадки засобу охорони необхідно збільшити його несучу здатність за рахунок збільшення жорсткості опори, яка характеризується модулем E_o , або збільшення площі її основи збільшенням ширини конструкції b . Збільшення жорсткості засобу неминуче призведе до збільшення передачі навантаження на підстилаючі породи, які мають бути стійкими, інакше споруда зануриться в них на величину U_e (осідання засобу охорони).

Таким чином, від усадки й осідання засобу охорони залежать загальні зміщення порід покрівлі U_o (м), які нависають над ним. Величина цих зсувів визначається з виразу

$$U_o = \Delta h + U_e, \quad (1)$$

де Δh , U_e – відповідно, величини усадки й осідання споруди в результаті дії навантаження від порід покрівлі, що нависають, м.

У безрозмірному вигляді вираз (1) може бути записано, як

$$\frac{U_o}{h} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{U_e}{h}, \quad (2)$$

або
$$\xi_o = \varepsilon_o + \vartheta_e, \quad (3)$$

де h – початкова висота засобу охорони, м; ξ_o – відносне осідання порід покрівлі над засобом охорони, од.; ε_o – піддатливість засобу охорони, од.; ϑ_e – відносне вдавлювання засобу охорони у підстилаючі породи, од.

Вдавлювання охоронної споруди в породи підосви, які характеризуються зсувами U_e , є результатом дії на нього навантаження від нависають порід покрівлі σ . Сприймаючи навантаження від порід покрівлі, охоронна споруда може імперативно передавати його на породи підосви в разі, коли вона буде абсолютно жорсткою. Якщо сумарна величина навантаження від покрівлі та ваги охоронної споруди буде менше опору порід, то вдавлювання споруди у підосву U_e не відбудеться. Якщо ж величина опору порід буде менше діючих зусиль, відбудеться осідання споруди на величину U_e , яка буде

супроводжуватися зміщенням покрівлі U_o . У випадках, коли охоронна конструкція передбачає деяку піддатливість, на початковому етапі під впливом навантаження відбуватиметься її усадка на величину Δh і, можливо, її поперечні деформації на величину Δb , а після вичерпання піддатливості - передача зусиль на підстилаючі породи.

В результаті ведення гірничих робіт і перерозподілу напружень порушується монолітність гірського масиву, в ньому розвивається тріщинуватість і бічні породи поступово руйнуються [14]. Масив піддається деформації в результаті проведення виробки, ведення очисних робіт і до моменту спорудження охоронної конструкції примикаючі породи вже частково деформовані внаслідок розвитку зони зруйнованих порід навколо виробки та будуть продовжувати деформуватися. Не рідкісні випадки їх зволоження внаслідок припливу води. Тому в результаті ведення робіт відбувається штучна зміна механічних характеристик навколишнього масиву й охоронних конструкцій в залежності від технічних і природних факторів.

Для вирішення в умовах інтенсивної деформації порід неможливо безпосередньо застосувати положення механіки суцільних середовищ, але, якщо реальний породний тріщинуватий масив замінити еквівалентним за деформованістю суцільним, можна буде оцінювати рівень напружено-деформованого стану породного масиву навколо виробки [15, 16]. Еквівалентний масив гірських порід наділяється наведеним модулем деформації, а значення модуля деформації підбирається таким чином, щоб переміщення на контактні поверхні породного масиву та підземної споруди було однаковим для реального й еквівалентного масиву [15]. Цей підхід може бути застосований не лише до породного масиву, але і до охоронних конструкцій.

Модулі деформації E_o та коефіцієнти поперечних деформацій μ порід, що вміщують охоронні споруди, можуть змінюватися в залежності від виду деформацій, величини та швидкості їх навантаження, пористості, тріщинуватості та вологості порід, а також крупності частинок зруйнованих порід. Дослідженню даних закономірностей присвячено безліч наукових робіт і встановлено, що: зі збільшенням навантаження модуль деформації гірської породи зростає [17, 18], а μ зменшується [18]; при зволоженні вміщуючих порід модуль E_o зменшується [19, 20, 21], а коефіцієнт μ – практично не змінюється [20] або дещо збільшується [19]; при збільшенні пористості матеріалу коефіцієнт Пуассона зменшується [22] також, як і модуль [23, 24]; при збільшенні крупності роздробленої гірської породи модуль збільшується [24]; збільшення тріщинуватості масиву веде до зниження модуля [15, 16, 25]. Таким чином, внаслідок наявності всіх цих чинників в породному масиві, що знаходиться поблизу від виробки, модуль загальної деформації породних шарів в даній області буде суттєво менше, ніж на значній відстані від неї. Підтвердженням цьому є встановлена залежність модуля загальної деформації E_o породного масиву від модуля пружності порід E , яка має вигляд [26]

$$E_o = 0,17E \quad (4)$$

і з якої випливає, що модуль деформації, більш, ніж в 5,8 разів менше модуля пружності.

У роботі [27] вказується, що у слабких та схильних до здимання шарів порід модуль деформації змінюється від 25 до 1000 МПа. Тоді вміщуючі породи будуть близькі за характеристиками до ґрунтів, а механізм осідання охоронної споруди - аналогічний механізму осідання фундаменту. Це дозволяє на даному етапі дослідження використовувати деякі положення механіки ґрунтів.

Осідання охоронної споруди відбувається в результаті застосування до неї навантаження, але на початковому етапі воно буде незначне оскільки підстилаючі породи мають деяку початкову міцність структурних зв'язків (рис. 1 а). Після того, як величина навантаження перевищить цю міцність, буде спостерігатися процес

ущільнення порід під засобом охорони. На цьому етапі залежність осідання від навантаження буде близькою до лінійної (рис. 1 б). Після ущільнення порід і подальшого збільшення критичного навантаження від початкового до граничного мають місце зсувні деформації, результатом яких є просідання порід підшви та їх видавлювання з-під споруди (рис. 1 в). На цьому етапі залежність між стискаючими напруженнями та загальними деформаціями нелінійна. Подальше збільшення навантаження понад граничне критичне значення призведе до втрати стійкості підшви.

У загальному випадку залежність між загальними відносними деформаціями та напруженнями, по аналогії з осіданням ґрунтів [28], може бути описана степеневим законом

$$\frac{U_{\varepsilon}}{h_n} = a \frac{\sigma_o^{\kappa}}{E_n}, \quad (5)$$

де h_n – потужність шару безпосередній підшви, який схильний до впливу навантаження від охоронної споруди, м; E_n – модуль загальної деформації цього шару, МПа; σ_o – напруження, що виникають на контакті засобу охорони та підстилаючих порід від дії навантаження, МПа; κ – параметр нелінійності; a – коефіцієнт, що характеризує бічне розширення порід, залежить від коефіцієнта відносної поперечної деформації μ_n та визначається виразом

$$a = 1 - \frac{2\mu_n^2}{1 - \mu_n}. \quad (6)$$

Тоді з виразу (5), (6) випливає

$$\frac{U_{\varepsilon}}{h_n} = \left(1 - \frac{2\mu_n^2}{1 - \mu_n}\right) \frac{\sigma_o^{\kappa}}{E_n}. \quad (7)$$

Цей вираз можна показати, як

$$\frac{U_{\varepsilon}}{h_n} = m_v \sigma_o^{\kappa}, \quad (8)$$

де m_v – коефіцієнт відносної стисливості порід, МПа⁻¹, який визначається виразом [28]

$$m_v = \left(1 - \frac{2\mu_n^2}{1 - \mu_n}\right) / E_n. \quad (9)$$

Вираз (8), незважаючи на свою простоту, складно застосувати на практиці через недослідженість параметру κ . Окрім характеристики стисливості порід і величини прикладеного навантаження, при визначенні осідання необхідне врахування ширини охоронної споруди, оскільки від неї залежить глибина стиснення підстилаючих порід. Також невизначеним для конкретних умов залишається фактор σ_o , оскільки він є результатом передачі навантаження від порід покрівлі σ через охоронну споруду, що демпфує, і залежить від параметрів споруди та характеристик порід підшви. Також результатом дії навантаження на споруду є його піддатливість. Тому необхідно спільно досліджувати параметри σ_o , U_o і U_{ε} .

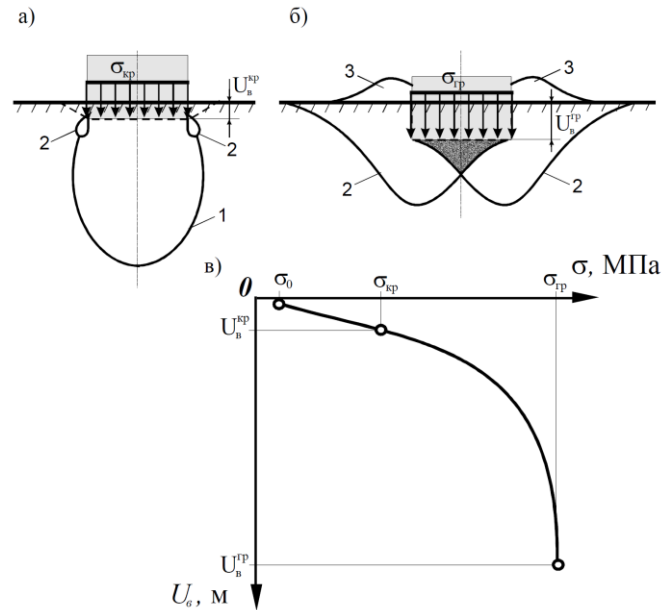


Рисунок 1. Схеми розвитку зон граничної рівноваги в породах під засобом охорони під дією різних навантажень (а і б) і залежність осідання охоронної конструкції U_e від напружень σ (в) (σ_0 – напруження, що не перевершують початкову міцність структурних зв'язків породи; σ_{kp} , σ_{gp} – напруження, обумовлені, відповідно, початковим і граничним критичними навантаженнями; 1- межа зони ущільнення; 2 - межі зон граничної рівноваги; 3 - вали видавлювання порід підосви)

Особливості дії опорного тиску на породи, що підстилають, залежать від багатьох факторів, до яких відносяться будова та фізико-механічні властивості порід міжпласта, кут падіння пластів, особливості системи розробки, спосіб управління покрівлею, швидкість посування лави [29]. Але врахувати всі ці фактори доволі складно. Тому необхідно передбачати певні допуски та використовувати усереднені дані щодо оцінки впливу концентратора тиску (у нашому випадку, засобу охорони) на породи підосви [29]. Обмежимося параметрами, які мають змінюватись в моделі для встановлення функціональної залежності: величина навантаження, жорсткість охоронної споруди, її вага, ширина та висота, а також показника, що характеризує стисливість порід підосви.

У загальному вигляді залежність навантаження σ_o (МПа) від факторів, що впливають, може мати вигляд

$$\sigma_o = f(\sigma; h; b; \Delta h; E_o; q; \Delta b; m_v; h_n), \quad (10)$$

де σ – навантаження на засіб охорони, МПа; h та b – початкові, відповідно, висота та ширина засобу охорони, м; Δh – величина усадки засобу охорони, м; E_o – модуль загальної деформації засобу охорони, МПа; q – тиск, який сприймають породи підосви, від ваги охоронної споруди, МПа; Δb – поперечна деформація засобу охорони, м; m_v – коефіцієнт відносної стисливості порід, МПа⁻¹; h_n – потужність шару безпосередньої підосви, м.

Проаналізуємо дані залежності щодо виявлення значущих чинників. Для цього скористаємося π -теоремою, у відповідності з якою при n залежних параметрах з k незалежними розмірностями може бути визначено кількість безрозмірних величин $p = n - k$ [30]. Тоді при $n = 10$ і $k = 3$ з функції (10) отримаємо $p = 7$.

Таким чином, відповідно з [30, 31], можна скласти наступні незалежні безрозмірні комбінації:

$$\frac{\sigma_o}{\sigma}; \frac{\Delta h}{h}; \frac{b}{h}; \frac{q}{\sigma}; \frac{\Delta b}{\Delta h}; m_v E_o; \frac{h_n}{b},$$

у яких порядки дорівнюватимуть:

$$\frac{\sigma_o}{\sigma} \approx 10^0; \frac{\Delta h}{h} \approx 10^{-1}; \frac{b}{h} \approx 10^0; \frac{q}{\sigma} \approx 10^{-3}; \frac{\Delta b}{\Delta h} \approx 10^{-1}; m_v E_o \approx 10^{-1}; \frac{h_n}{b} \approx 10^0.$$

Отримаємо функцію

$$\frac{\sigma_o}{\sigma} = \Phi \left(\frac{\Delta h}{h}; \frac{b}{h}; \frac{q}{\sigma}; \frac{\Delta b}{\Delta h}; m_v E_o; \frac{h_n}{b} \right). \quad (11)$$

Розкладемо залежність в ряд Маклорена [30] за найменшим параметром q/σ . Тоді

$$\frac{\sigma_o}{\sigma} = f \left(\frac{\Delta h}{h}; \frac{b}{h}; 0; \frac{\Delta b}{\Delta h}; m_v E_o; \frac{h_n}{b} \right) + f' \left(\frac{\Delta h}{h}; \frac{b}{h}; 0; \frac{\Delta b}{\Delta h}; m_v E_o; \frac{h_n}{b} \right) \frac{q}{\sigma} + \dots, \quad (12)$$

де другий член в 10^3 раз менше, ніж перший, тому вагою охоронної конструкції можна знехтувати. Получим

$$\sigma_o = f(\sigma; h; b; \Delta h; E_o; \Delta b; m_v; h_n), \quad (13)$$

але оскільки $\mu_o = \frac{\Delta b/b}{\Delta h/h}$ залежність у безрозмірному вигляді може бути записана, як

$$\frac{\sigma_o}{\sigma} = \Phi \left(\frac{\Delta h}{h}; \frac{b}{h}; \mu_o; m_v E_o; \frac{h_n}{b} \right). \quad (14)$$

Аналогічно отримаємо залежність U_o від факторів, яка має вигляд:

$$\frac{U_o}{h} = \Phi \left(\frac{\sigma}{E_o}; \frac{b}{h}; \mu_o; m_v E_o; \frac{h_n}{b} \right). \quad (15)$$

Функція (14) має обмежене число параметрів. Це дозволяє перейти до встановлення функціональної залежності.

У функціях (14), (15) більшість незалежних змінних є відомими величинами, за винятком навантаження σ , яка залежить від багатьох факторів, які складно врахувати в повній мірі. Визначенню навантаження на різні охоронні споруди присвячені роботи [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]. Їх результати показують суперечливі результати, оскільки величини навантажень на засоби охорони практично однакової ширини коливаються від 0,15 до 15 МН/м, а в ряді робіт вказується, що на контакті засобів охорони та прилеглих бічних порід виникають стискаючі напруження до 25-60 МПа [39, 41, 42, 43, 44]. В роботах [45] і [46] вказується, що напруження в зоні опорного тиску складають $(1,1 \dots 1,5)\gamma H$, а в роботі [40] – вказується, що напруження над охоронними спорудами змінюються від $1,2\gamma H$ до $2\gamma H$, в залежності від жорсткості споруди, причому найбільш жорсткій відповідає найбільше значення напружень. Тому в подальших розрахунках навантаження на охоронні споруди в зоні впливу очисних робіт приймемо в межах діапазону $(1,1 \dots 1,5)\gamma H$.

Для встановлення функціональних залежностей на основі виразів (14)-(15) було проведено чисельне моделювання методом скінчених елементів, на якому ґрунтуються сучасні програмні комплекси ANSYS [47, 48, 49], Solid Works [49, 50], PLAXIS [37, 50, 51, 52], FLAC3D [52, 53, 54, 55] и PHASE-2 [56, 57, 58]. Розглянуто геометричну модель, яка складалася з шарів порід безпосередньої й основної підшви та засобу охорони (рис. 2). На засіб охорони прикладалося рівномірно розподілене навантаження.

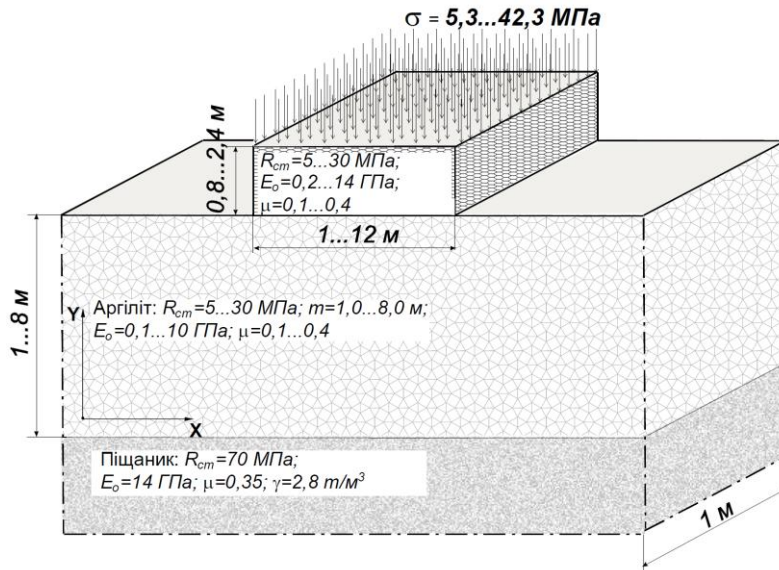


Рисунок 2. Геометрія стрічкового засобу охорони, розташованого на масиві порід підпошви

Оскільки при моделюванні досліджувався вплив геометричних параметрів та фізико-механічних характеристик засобу охорони та порід безпосередньої підпошви, то останні мали змінюватись в певних діапазонах.

Потужність шару безпосередньої підпошви змінювалась від 1 до 8 м. Висота охоронної споруди прийнята від 0,8 до 2,5 м, що відповідає потужностям пластів, які розробляються у Донбасі. Ширину охоронної споруди прийнято від 1 до 12 м. При цьому її мінімальне значення відповідає мінімально допустимій ширині литої смуги, а максимальне – восьмикратній висоті будової смуги (для потужності пласта 1,5 м).

Значення модуля E_o та коефіцієнта μ_o приймалися у діапазонах, що відповідали характеристикам від будової до литої смуг, а E_n та μ_n – у діапазоні від характеристик зруйнованих та обводнених порід до піщаника в недоторканому масиві.

Навантаження на засоби охорони прийнято в умовах шахт Донбасу від $1,1\gamma_{\min}H_{\min}$ до $1,5\gamma_{\max}H_{\max}$ (де: $\gamma_{\min}=2,45 \text{ т/м}^3$, $H_{\min}=200 \text{ м}$; $\gamma_{\max}=2,89 \text{ т/м}^3$; $H_{\max}=1000 \text{ м}$), що склало від 5,3 до 42,3 МПа.

Для реалізації нелінійного характеру деформування масиву використано пружно-пластичну модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb Model), а оскільки визначалося навантаження на засіб охорони, було прийнято режим заданих навантажень.

Оскільки діапазони зміни деяких фізико-механічних характеристик та потужностей породних шарів суттєві, то може бути велика кількість їх комбінацій. Це декілька ускладнює пошук необхідних закономірностей, тому для зменшення обсягу обчислень зі збереженням репрезентативності результатів для діапазонів значень факторів (табл. 1) було складено план експерименту з використанням методу планування експерименту – латинські куби [59]. Всі інші параметри, що не внесені до таблиці, були прийняті за константи. Оскільки розглядалися вісім факторів з п'ятьма значеннями за допомогою планування експерименту кількість експериментів була зменшена з $5^8=390625$ до 625 моделей.

Було побудовано 625 моделей, при відпрацюванні яких отримано максимальні величини вдавлювання порід підпошви U_o , усереднене осідання покрівлі над охоронною спорудою U'_o та напруження σ_o під дією навантаження σ . Загальний вигляд однієї з моделей за етапами її відпрацювання показано на рисунку 2.

Статистична обробка результатів моделювання дозволила встановити коефіцієнти емпіричної залежності напружень σ_o (МПа) від основних факторів, що впливають, яка має вигляд:

$$\sigma_o = 0,878\sigma \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^{0,007} \left(\frac{b}{h}\right)^{0,048} \mu_o^{0,006} (m_v E_o)^{-0,022} \left(\frac{h_n}{b}\right)^{-0,046} \quad (16)$$

Таблиця 1. Параметри та їх значення, прийняті для дослідження деформаційних процесів в охоронних спорудах та підстиляючих породах

№ п/п	Найменування показників (позначення показника у плані експерименту)	Значення показників за порядковими номерами				
		I	II	III	IV	V
1	Навантаження на засіб охорони σ , МПа	5,3	14,5	23,8	33,0	42,3
2	Модуль загальної деформації для засобу охорони E_o , МПа	200	3000	6000	10000	14000
3	Ширина засобу охорони b , м	1	3	6	9	12
4	Висота засобу охорони h , м	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5
5	Коефіцієнт поперечних деформацій засобу охорони μ_o , од.	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4
6	Коефіцієнта відносної поперечної деформації порід підшви μ_n , од.	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4
7	Модуль загальної деформації порід підшви E_n , МПа	100	500	1000	5000	10000
8	Потужність шару безпосередньої підшви h_n , м	1	2	4	6	8

Отримана залежність має коефіцієнт детермінації $R^2=0,988$, а кореляції $r=0,994$, що вказує на сильний кореляційний зв'язок. Тим не менше, перевіримо отримане рівняння за допомогою t і F -критеріїв з виразів:

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (17)$$

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \frac{n-m-1}{m}, \quad (18)$$

де n – кількість спостережень; m – число факторів в моделі.

З цих виразів $t = \frac{0,994 \cdot \sqrt{625-2}}{\sqrt{1-0,988}} = 226,5$ та $F = \frac{0,988}{1-0,988} \frac{625-7-1}{7} = 7257$. Оскільки $t > t_{кр.}$, а $F > F_{кр.}$ зв'язок може вважатися достовірним, коефіцієнти кореляції та детермінації статистично значущі, рівняння регресії статистично надійне.

Виходячи із залежності (16) випливає, що найбільший вплив на результат σ_o чинить kh , оскільки показник ступеня при даному факторі найбільший і вказує, на скільки відсотків зміниться в середньому результат, якщо фактор зміниться на 1%. Інші фактори є менш значущими та деякими з них можна знехтувати без втрати надійності залежності. Тоді залежність може бути перетворена та представлена наступними виразами:

$$\sigma_o = 0,858\sigma \left(\frac{b^2}{hh_n \sqrt{m_v E_o}} \right)^{0,046}, \quad (19)$$

($R^2=0,988$; $t > t_{кр.}$ ($226,5 > 1,96$); $F > F_{кр.}$ ($10193 > 2,23$))

або

$$\sigma_o = 0,906 \cdot \sigma \quad (20)$$

$$(R^2=0,944; t>t_{кр}(102,5>1,96); F>F_{кр}(10502>3,86))$$

Як впливає з виразів (16), (19) та (20), за рахунок демпфуючих властивостей охоронної споруди та підстилаючих порід незалежно від її параметрів відбувається втрата в середньому близько 10% навантаження, яке діє з боку покрівлі. Таким чином, на породи підосви в зоні тимчасового опорного тиску позаду лави діє навантаження, яке становить $(1,0...1,3)\gamma H$.

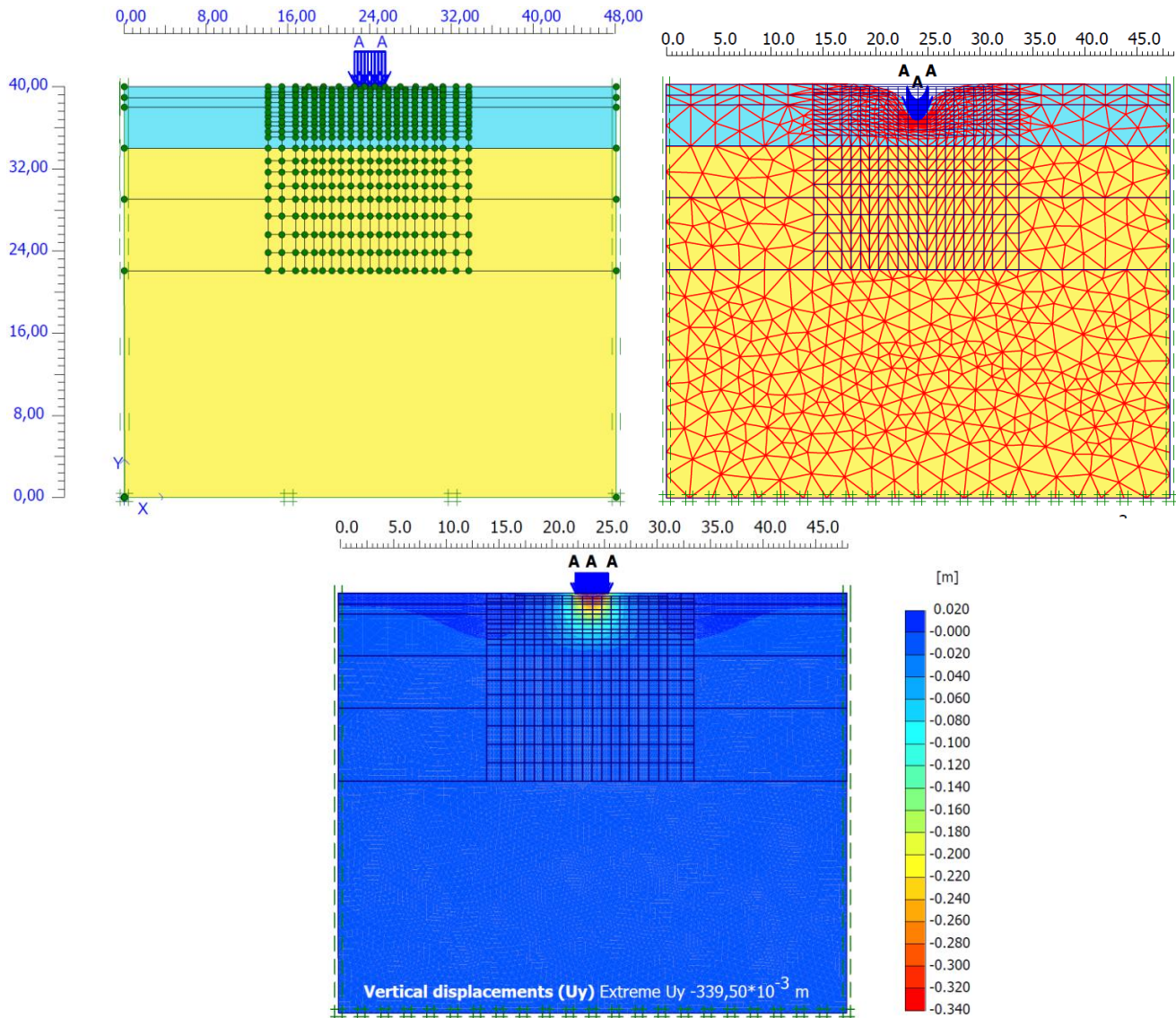


Рис. 2. Загальний вигляд чисельної моделі для дослідження деформаційних процесів в охоронних спорудах та підстилаючих породах

Загальна залежність величини осідання охоронної споруди відносно поверхні порід підосви була представлена в натуральному вигляді (8). Статистична обробка результатів моделювання дозволила визначити параметр κ . Тоді вираз набуде вигляду

$$\frac{U_{\epsilon}}{h_n} = m_v \sigma_o^{0,949} \quad (21)$$

$$(R^2=0,896; t>t_{кр}(73,3>1,96); F>F_{кр}(1783,4>2,62))$$

З огляду на показник ступеня у виразі (21) залежність U_{ϵ} від σ_o та інших чинників може бути лінеаризована та представлена, як

$$U_o = 0,835m_v\sigma_o h_n \cdot \quad (22)$$

$$(R^2=0,901; t>t_{кр}(75,3>1,96); F>F_{кр}(1883,9>2,62))$$

Емпірична залежність усереднених зсувів порід покрівлі над охоронною спорудою від розглянутих факторів (15) після статистичної обробки набуде вигляду

$$U_o = 0,668 \left(\frac{\sigma}{E_o} \right)^{0,862} \left(\frac{b}{h} \right)^{1,058} \mu_o^{-0,035} (m_v E_o)^{0,802} \left(\frac{h_n}{b} \right)^{0,699} h \cdot \quad (23)$$

$$(R^2=0,92; t>t_{кр}(75,3>1,96); F>F_{кр}(802,2>2,02))$$

а після спрощення та перетворень – $U_o = 0,746\sigma m_v \sqrt{bh_n} \cdot \quad (24)$

$$(R^2=0,879; t>t_{кр}(67,3>1,96); F>F_{кр}(899,3>2,23))$$

Враховуючи, що $\sigma = k\gamma H$, то з (24) відносно усереднене осідання порід покрівлі над засобом охорони може бути визначено за формулою

$$\xi'_o = \frac{0,746k\gamma H m_v \sqrt{bh_n}}{1000 h} \cdot \quad (25)$$

Отримані результати можуть бути використані для прогнозу зміщень порід на контурі підготовчих виробок позаду лави, зокрема, у виразі (16), який отримано у роботі [61]. У результаті пропонується формула яка має вигляд

$$U_k = \frac{m (x_* \cos \beta + 0,5B)}{B + (x_* + a + 0,5b) \cos \beta} \ln \left[\frac{\frac{\gamma t g \rho_g (H + 2,22 f_{cp} \sqrt{H} + 1,4 f_{cp}^2) + 1}{C_g}}{2\sqrt{\lambda} t g \rho_g + 1} \right]^{\frac{m\alpha}{2\lambda t g \rho_g}} + (a_0 + nr) \alpha + \xi'_o, \quad (26)$$

де m – потужність пласта, м; α – розмірний коефіцієнт зближення бічних порід, m^{-1} ; γ – об'ємна вага порід покрівлі, що нависають, kH/m^3 ; H – глибина розробки, м; ρ_g – кут внутрішнього тертя вугілля, град.; λ – коефіцієнт бічного розпору, од.; C_g – зчеплення вугілля, кПа; f_{cp} – показник питомої міцності порід, $m^{1/2}$; a_0 – відстань від вугільного вибою до першого ряду стійок кріплення, м; n – кількість проходів в кріпленні; r – відстань між рамками кріплення, м; x_* – довжина ділянки віджатого вугілля у боку виробки, м; B – ширина виробки у проходці, м; a – відстань від кріплення виробки до засобу охорони, м; β – кут між площиною пласта та поверхнею підшви виробки, град.; b – ширина засобу охорони, м.

Отримані залежності та вираз (26) було використано для розрахунку зміщень, які були порівняні з результатами шахтних натурних спостережень в умовах конвеєрного хідника 11-ої західної лави пласта c_{18} ДП «Шахтоуправління «Південнодонбаське №1» [62, 63].

За результатами проведених інструментальних спостережень було встановлено, що зміщення порід покрівлі у хіднику на відстані від підготовчого вибою від 0,5 до 37 м змінювались в середньому, відповідно, від 0,08 до 0,21 м (крива 1, рис. 3). Ці зміщення на цій ділянці склали в середньому 48% від вертикальної конвергенції порід покрівлі та підшви виробки.

Розрахунок максимальних зміщень порід покрівлі виробки з виразу (26) дозволив отримати значення 0,228 м. Ці зміщення реалізуються на ділянці активних деформацій позаду лави, де відзначається найбільша швидкість зближення порід покрівлі та підшви виробки та [64] та реалізується найбільша частка зміщень порід покрівлі (до

25-50%), у тому числі за рахунок осідання й усадки засобу охорони. Вона є частиною зони активних деформацій порід позаду лави, ширина якої досягає величини 40 м [34, 32] (інколи до 60-80 м [32, 64, 65]) та може бути визначена з виразу [66]

$$l_a = 20 + 18m - 0,6 \frac{h_n}{m} \text{ (м)}, \quad (27)$$

де m – потужність пласта, м; h_n – потужність шару безпосередньої підшви, що обвалюється, м.

У відповідності з (27) для умов конвеєрного хідника 11-ої західної лави пласта c_{18} на відстані понад 21 м позаду лави спостерігається затухання зміщень подальшою стабілізацією деформацій, оскільки на цій ділянці відбувається облом консолі над охоронною спорудою та зниження опорного тиску. Тобто зміщення на відстані позаду лави понад 21 м незначні. Це, що дозволяє нам з припущеннями прийняти їх такими, які дорівнюють нулю.

Враховуючи вищезазначене для умов виробки, що розглядається, максимальні розрахункові зміщення порід покрівлі можна віднести на відстань 21 м позаду лави (точка А, рис. 3), а подальші зміщення (відрізок АВ, рис. 3) – показати горизонтальною лінією. Початкові зміщення у цій виробці (точка С, рис. 3), оскільки вона проводиться позаду лави, будуть нульовими на відстані 4,5 м поза лавою.

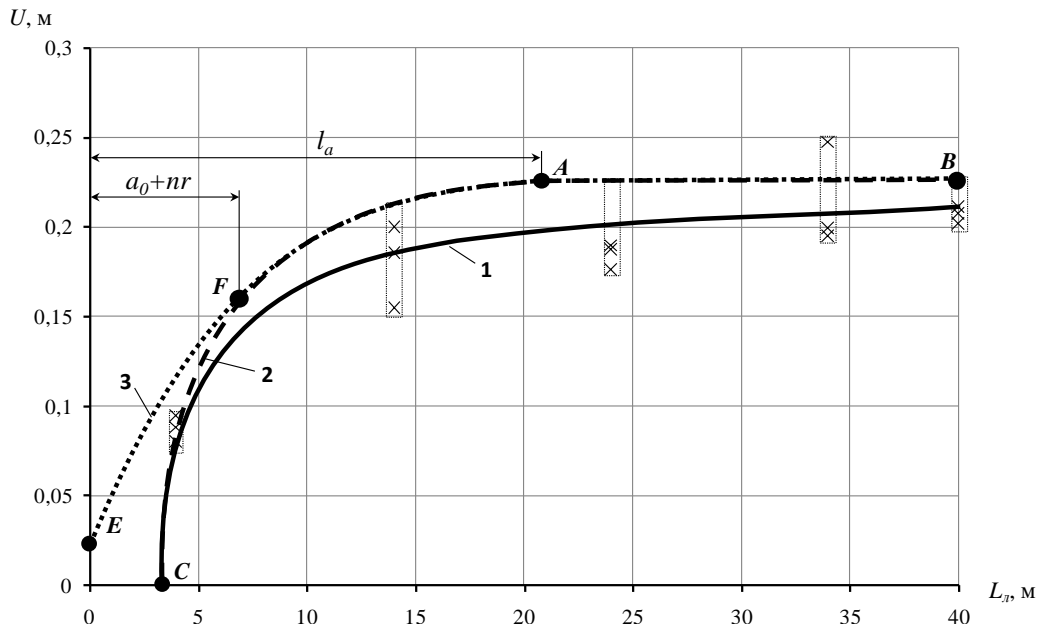


Рисунок 3. Графіки залежності зміщень порід покрівлі конвеєрного хідника 11-ої західної лави пл. c_{18} U від відстані до очисного L вибою (1, 2 – відповідно, фактичний та аналітичний графіки; 3 – аналітичний графік для виробки, яка б проводилась перед лавою або заздалегідь)

Якщо б в таких умовах підготовча виробка проводилася заздалегідь та підтримувалась позаду лави, то зміщення порід покрівлі мали б визначатись у декількох точках: точка Е, F та А (відповідно, на рівні очисного вибою, на рівні останньої стійки привибійного простору лави та на відстані l_a від неї (рис. 3). Зміщення в точках Е та F можуть бути розраховані з виразів, відповідно:

$$U_{\kappa_E}^e = \frac{m (x_* \cos \beta + 0,5B)}{B + (x_* + a + 0,5b) \cos \beta} \ln \left[\frac{\frac{\gamma \lg \rho_s}{C_s} (H + 2,22 f_{cp} \sqrt{H} + 1,4 f_{cp}^2) + 1}{2 \sqrt{\lambda} \lg \rho_s + 1} \right] \frac{m \alpha}{2 \lambda \lg \rho_s} \quad (28)$$

та

$$U_{\kappa_F}^e = \frac{m(x_* \cos \beta + 0,5B)}{B + (x_* + a + 0,5b) \cos \beta} \ln \left[\frac{\left[\frac{\gamma t g \rho_e}{C_e} (H + 2,22 f_{cp} \sqrt{H} + 1,4 f_{cp}^2) + 1 \right] \frac{m\alpha}{2\lambda t g \rho_e}}{2\sqrt{\lambda t g \rho_e} + 1} + (a_0 + nr)\alpha \right], \quad (29)$$

а в точці А – з (26).

На ділянці від 0 до l_a м до лави розрахункові зміщення відрізняються від експериментальних, оскільки при розрахунку складно врахувати якість та параметри кріплення сполучення лави з виробкою. Але це не має першочергового значення, оскільки стійкість виробки визначають кінцеві зміщення у точці А (рис. 3), розбіжність яких з фактичними для умов конвеєрного хідника 11-ої західної лави пласта c_{18} не перевищує 15%, що менше ніж при експериментально-аналітичному рішенні, яке було наведене нами у роботі [61]. На віддалені від лави на 40 м ця розбіжність не перевищує 8,6%. В цілому отриману аналітичну криву можна вважати конвергентною до фактичної та запропонована методика може бути використана для прогнозу зміщень порід покрівлі у підготовчій виробці при охороні її позаду лави з врахування основних факторів, що впливають на її експлуатаційний стан на найбільш відповідальній ділянці.

Обговорення результатів. Для проведення аналізу залежності (26) було здійснено її факторний аналіз. Підстановка у залежність окремих факторів у різних діапазонах при незмінності інших чинників дозволила отримати графіки залежностей зміщень порід покрівлі у виробці, що охороняється в зоні впливу очисних робіт позаду лави, від цих факторів (рис. 4-6). Як випливає з графіків, основними факторами, що впливають на зміщення порід покрівлі, є: потужність пласта m , глибина робіт H , категорія порід основної покрівлі за обвалюваністю, що характеризується коефіцієнтом α , ширина приви́бійного простору $(a_0 + nr)$, довжина ділянки віджатого вугілля у боку виробки x_* , ширина засобу охорони b та його віддалення від виробки a , а також потужність порід h_n , які підстилають засіб охорони, та їх властивість до стиснення, яка характеризується коефіцієнтом m_v . Найбільший вплив на стан виробки мають потужність пласта та обвалюваність порід, що узгоджується з висновками у роботі [66]. Менш значущим є модуль загальної деформації засобу охорони, оскільки величина зміщень покрівлі у виробці при E_o від 1000 до 10000 МПа змінюється на 4%, але важливим є забезпечення мінімального опору нависаючим породам покрівлі за рахунок спорудження стійких охоронних конструкцій з модулем деформації понад 200 МПа (рис. 6в). Тоді зміщення покрівлі виробки, що охороняється, будуть тільки на 9% більше, ніж коли $E_o = 10000$ МПа. Подальше зменшення цієї характеристики деформованості підстилаючих порід недоцільне, оскільки призведе до суттєвого збільшення зміщень.

З переліку факторів, які суттєво впливають на зміщення порід у виробці, можна відокремити ті, на які при певних умовах можна впливати, а саме: $(a_0 + nr)$, b , a , E_o та m_v . Для зменшення зміщень покрівлі у виробці доцільно якомога більше зменшити ширину приви́бійного простору, забезпечити цілісність вугілля у боку виробки, збільшити ширину засобу охорони, забезпечити його стійкість та віднести від виробки, а також зменшити стисненість підстилаючих порід. Наприклад, для умов 11-ої західної лави пл. c_{18} зменшення ширини приви́бійного простору на 1,6 м дозволить зменшити зміщення у виробці на 14,2%, збільшення відстані a від 0,7 до 1,6 м – зменшити $U_{\kappa_F}^e$ на 12,2%, а збільшення ширини споруди b у 3 рази (до 3,3 м) – зменшити зміщення лише на 3,4%. Зменшення стисненості підстилаючих порід можна досягти за рахунок збільшення модуля їх деформації (рис. 7). При збільшенні модуля деформації порід підосви, як мінімум, до 1,5 ГПа призведе до зменшення зміщень $U_{\kappa_F}^e$ на 23,2 %, а до 10 ГПа – до 28,1% (рис. 8). Тобто найбільш дієвим для зменшення зміщень порід виробки, що охороняється, є збільшення опору підстилаючих порід стисненню.

Виходячи з вищезазначеного, можна зробити висновки про те, що збільшення ширини засобу охорони малоефективне. Його ширина та матеріал, з якого споруджується, на слабких підстилаючих породах має визначатись економічною доцільністю, оскільки основна частка зміщень покрівлі припадає на осідання конструкції відносно поверхні підстилаючих порід. Тобто вимогою до засобів охорони у таких умовах є забезпечення достатнього опору нависаючим породам покрівлі з мінімальними фінансовими та трудовими витратами. Та особливу увагу необхідно приділити якості та параметрам кріплення кінцевої ділянки лави з забезпеченням мінімального відставання вибою спорудження засобу охорони від лави, а також зменшенню осідання засобу охорони впровадженням спеціальних заходів, які необхідно розробити, враховуючи встановлені закономірності деформування слабких порід під охоронними спорудами.

Висновок. Проведені дослідження дозволили зробити такі висновки:

1. Встановлено, що за рахунок демпфуючих властивостей охоронної споруди та підстилаючих порід втрачається близько 10% навантаження, що діє з боку покрівлі на споруду, незалежно від параметрів охоронної споруди, тому на породи підосви у зоні тимчасового опорного тиску позаду лави діє навантаження, яке складає $(1,0 \dots 1,3) \gamma H$.

2. Аналітично встановлено залежності величини осідання та усадки засобу охорони підготовчих виробок від основних факторів, що впливають, а саме: величини навантаження на засіб, його ширини, початкової висоти та модуля деформацій і коефіцієнта поперечних деформацій, а також характеристики стисливості порід, які підстилають охоронну споруду. Їх розбіжності з експериментальними даними не перевищують 7,5 %.

3. Встановлено закономірність зміщень порід покрівлі у підготовчій виробці на ділянці її підтримання позаду лави з урахуванням зміщень порід над крайовою частиною пласта, кінцевою ділянкою та над засобом охорони, які залежать від потужності вугільного пласта, фізико-механічних характеристик пласта та вміщуючих порід, параметрів кріплення кінцевої ділянки лави, параметрів засобу охорони та ширини виробки.

4. Розроблено аналітико-експериментальний метод розрахунку зміщень порід покрівлі у підготовчій виробці, що знаходиться в зоні тимчасового опорного тиску позаду лави, які є результатом розвитку деформацій покрівлі над зоною зруйнованого вугілля перед кінцевою ділянкою лави, над привибійним простором цієї ділянки та позаду неї на ділянці осідання та усадки засобу охорони. Результати розрахунку зміщень порід покрівлі у підготовчій виробці показали їх задовільну збіжність з результатами натурних інструментальних спостережень, яка на певних відстанях від лави (20 та 40 м) не перевищила 15 та 8,6%.

5. Встановлено, що основними факторами, які впливають на зміщення порід покрівлі у підготовчій виробці в зоні тимчасового опорного тиску позаду лави є: потужність пласта m , глибина робіт H , категорія порід основної покрівлі за обвалюваністю, ширина привибійного простору $(a_0 + nr)$, довжина дільниці віджатого вугілля у боку виробки x^* , ширина засобу охорони b та його віддалення від виробки a , а також потужність порід h_n , які підстилають засіб охорони, та здатність їх до стиснення під дією навантаження, яка характеризується коефіцієнтом m_v . Визначено фактори, на які при певних умовах можна впливати для зменшення зміщень у виробці, а саме: $(a_0 + nr)$, b , a та m_v .

6. Встановлено, що для умов 11-ої західної лави пл. с₁₈ «Шахтоуправління «Південнодонбаське №1» зменшення ширини привибійного простору на 1,6 м дозволить зменшити зміщення у виробці на 14,2%, збільшення відстані a від 0,7 до 1,6 м – зменшити їх на 12,2%, а збільшення ширини споруди b до 3,3 м – зменшити зміщення лише на 3,4%. Найбільший ефект (зменшення зміщень до 23,2 та 28,1 %) досягається за рахунок збільшення модуля деформації порід, що підстилають засіб охорони, відповідно, до 1,5 та 10 ГПа.

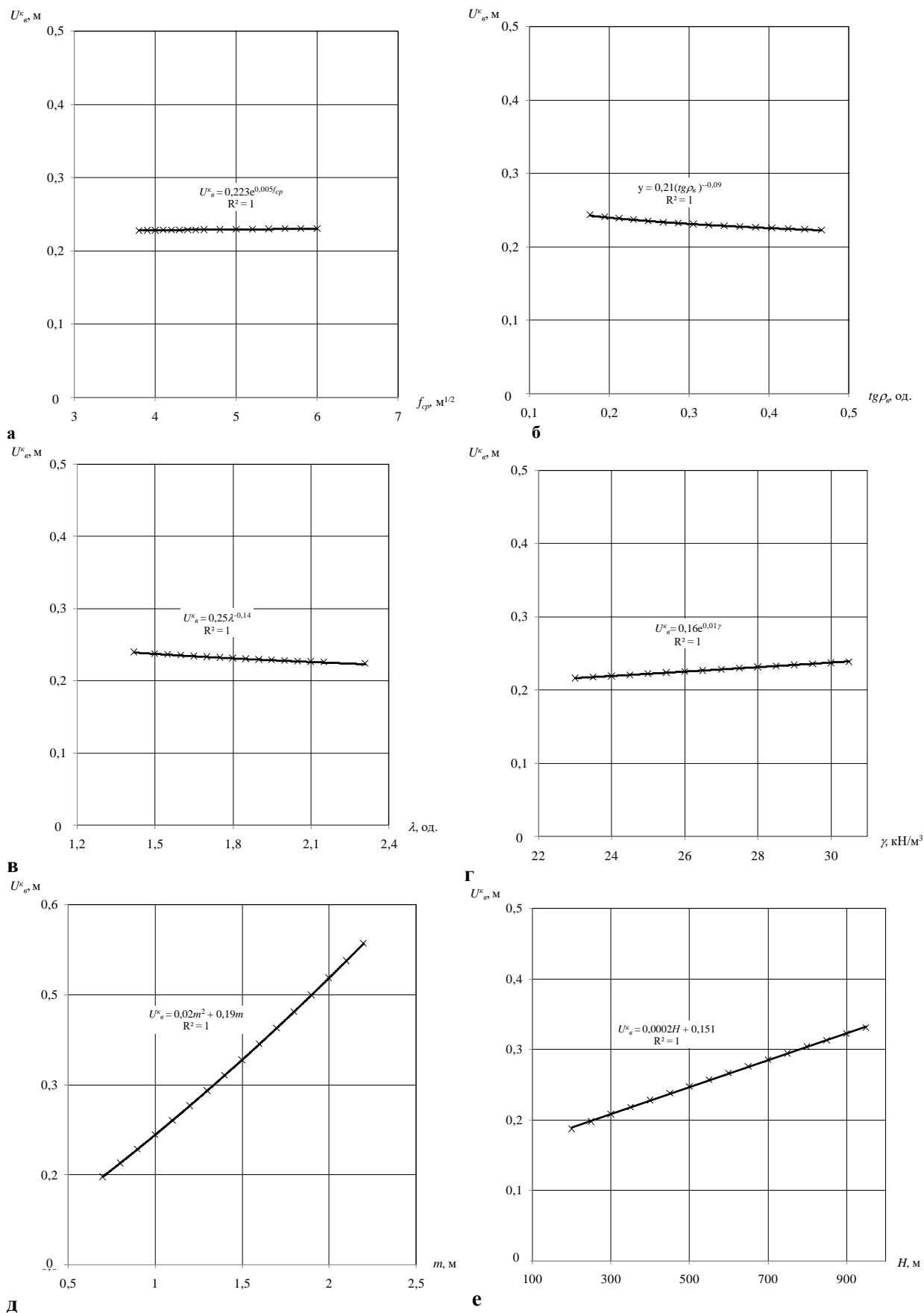
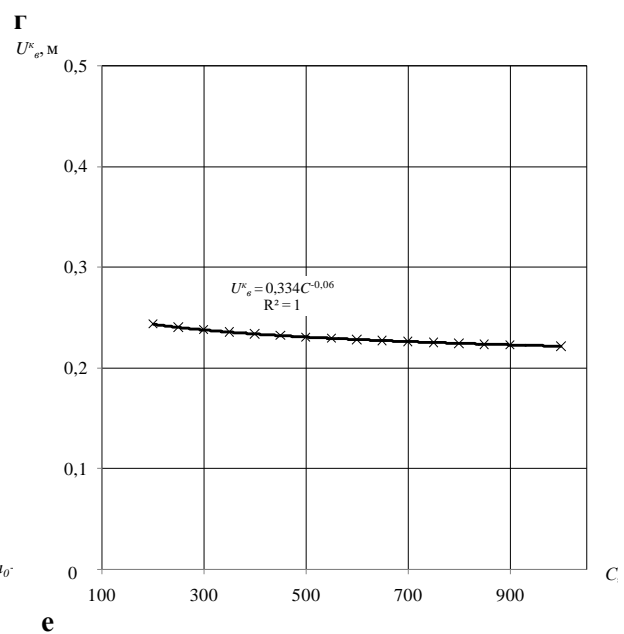
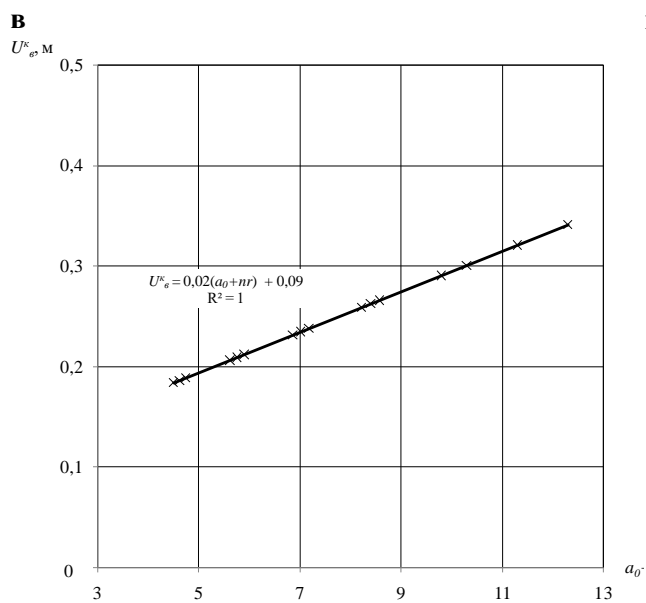
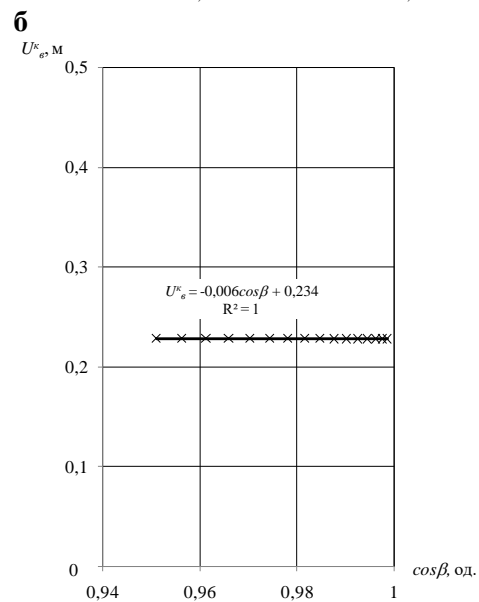
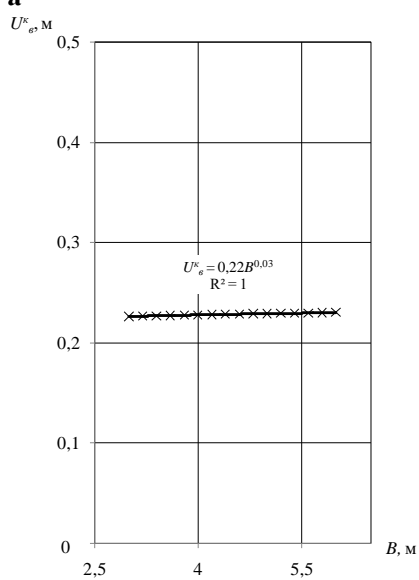
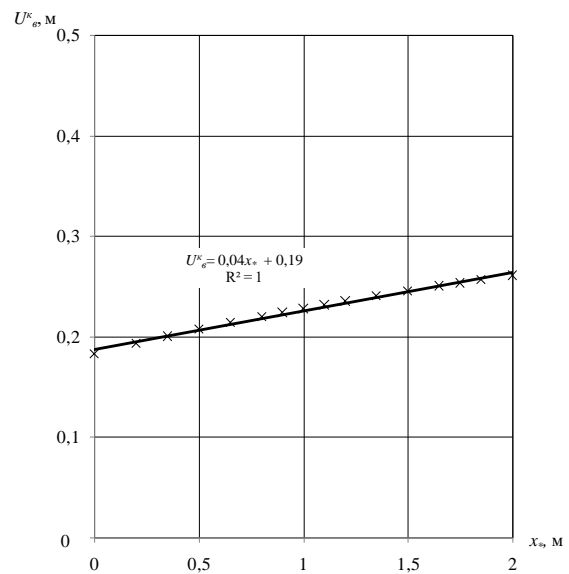
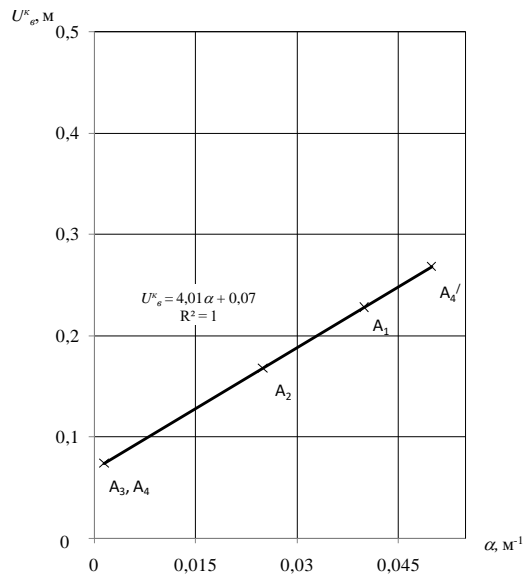


Рис. 4. Графіки залежностей зміщень порід покрівлі конвеєрного хідника 11-ої західної лави пл. с₁₈ $U_{ср}^к$ від показника питомої міцності порід $f_{ср}$ (а), тангенса кута внутрішнього тертя вугілля $tg\rho_e$ (б), коефіцієнта бічного розпору λ (в), об'ємної ваги порід покрівлі γ (г), потужності пласта m (д) та глибини розробки H (е)



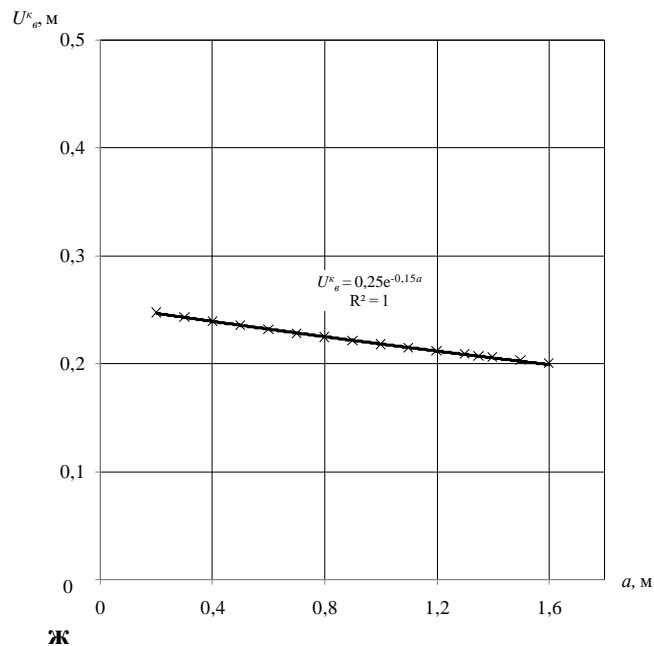
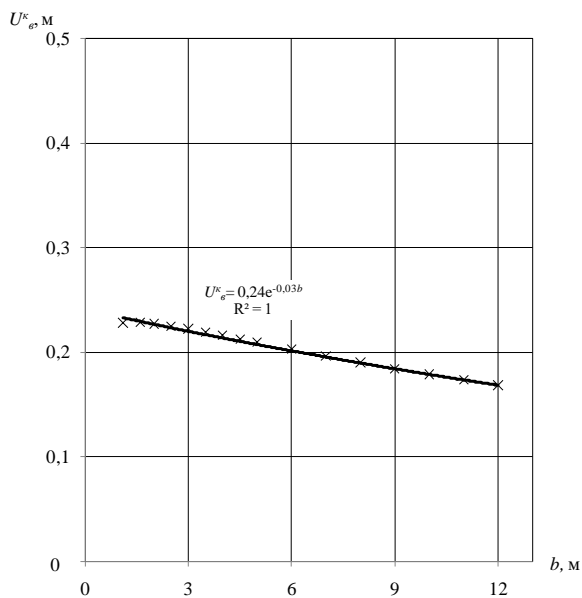
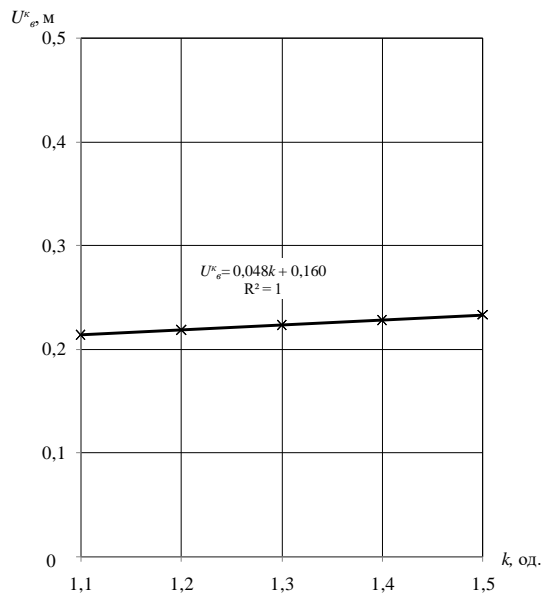


Рисунок 5. Графіки залежностей зміщень порід покрівлі конвеєрного хідника 11-ої західної лави пл. с₁₈ U_{ε}^{κ} від коефіцієнта зближення бічних порід α (а), довжини ділянки віджатого вугілля у боку виробки x^* (б), ширини виробки B (в), косінуса кута нахилу пласта до поверхні підшви виробки $\cos\beta$ (г), ширини привибійного простору ($a_0 + nr$) (д), зчеплення вугілля C (е) і відстані між кріпленням виробки та засобом охорони a (ж).



а



б

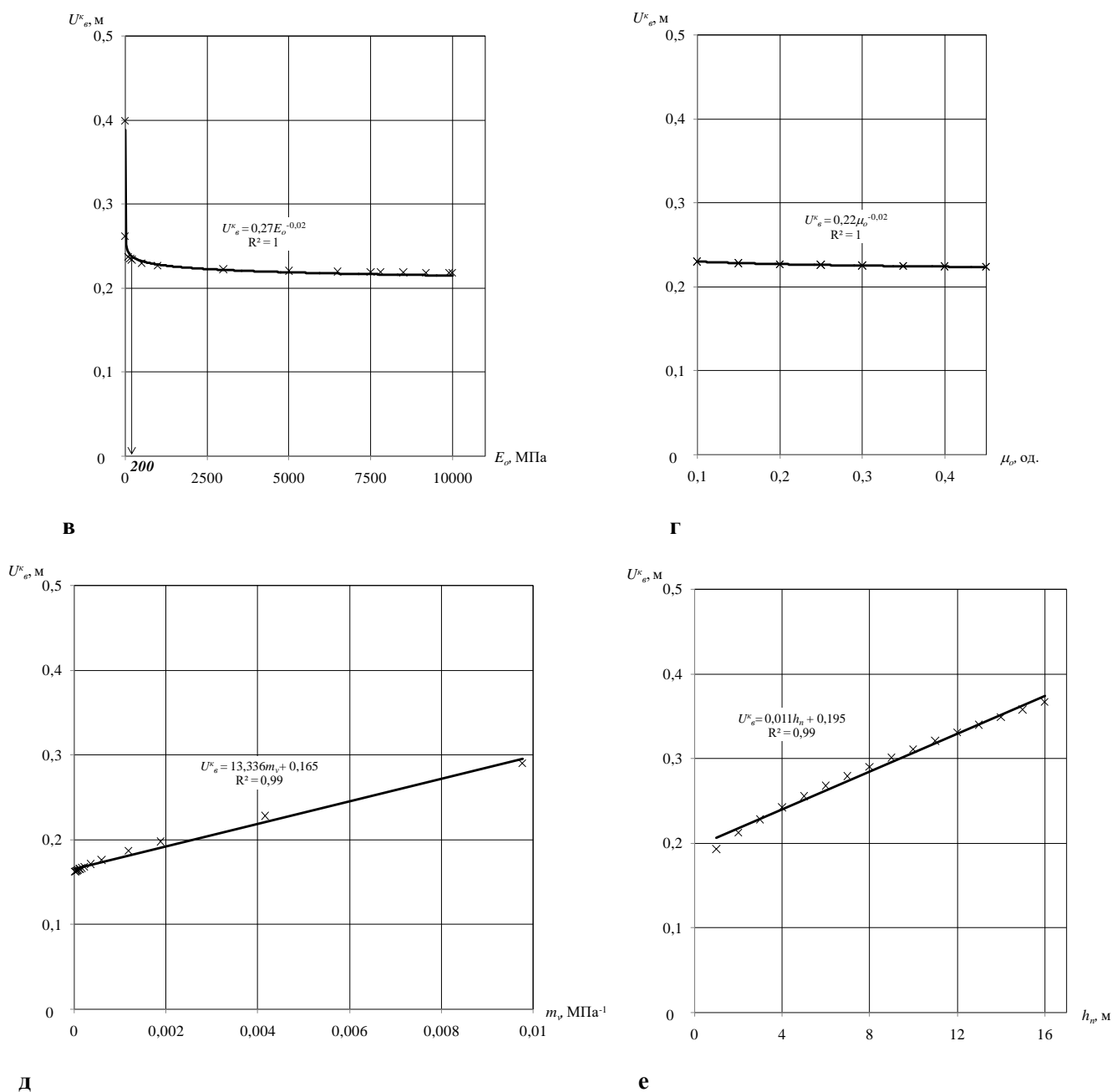


Рисунок 6. Графіки залежностей зміщень порід покрівлі конвеєрного хідника 11-ої західної лави пл. с₁₈ U^k_{σ} від ширини засобу охорони b (а), коефіцієнта концентрації напружень k над ним (б), його модуля деформації E_{σ} (в) та коефіцієнта поперечних деформацій μ_{σ} (г), показника стисненості підстилаючих порід m_v (д) та їх потужності h_n (е).

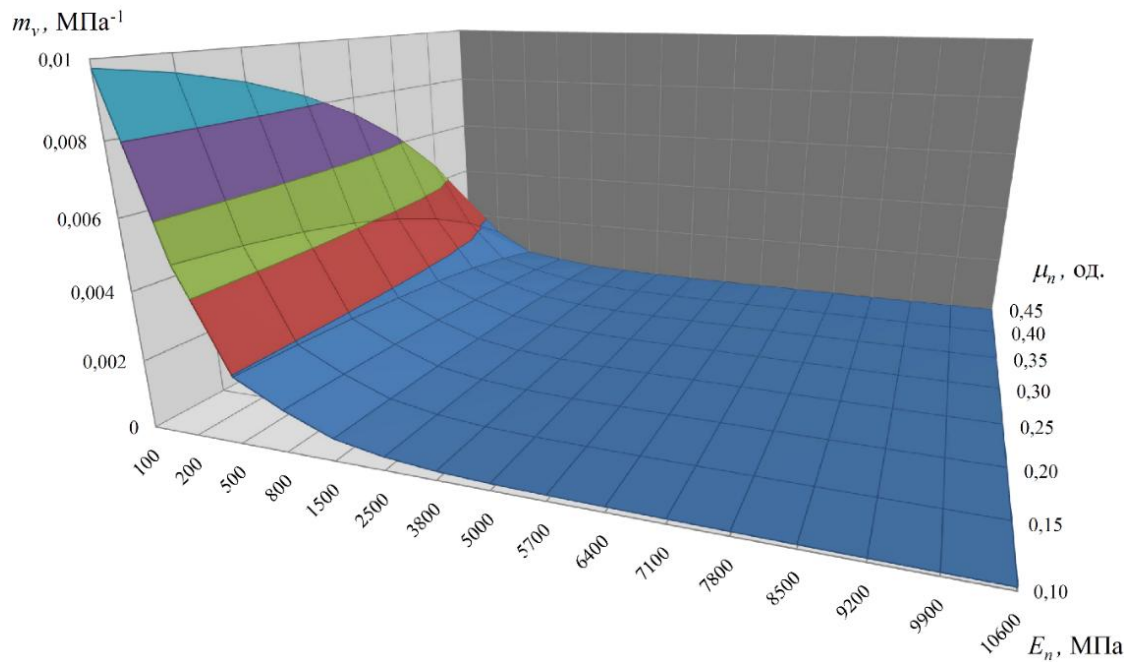


Рисунок 7. Графік залежності показника стисливості підстиляючих порід m_v від коефіцієнта їх відносної деформації μ_n та модуля загальної деформації E_n

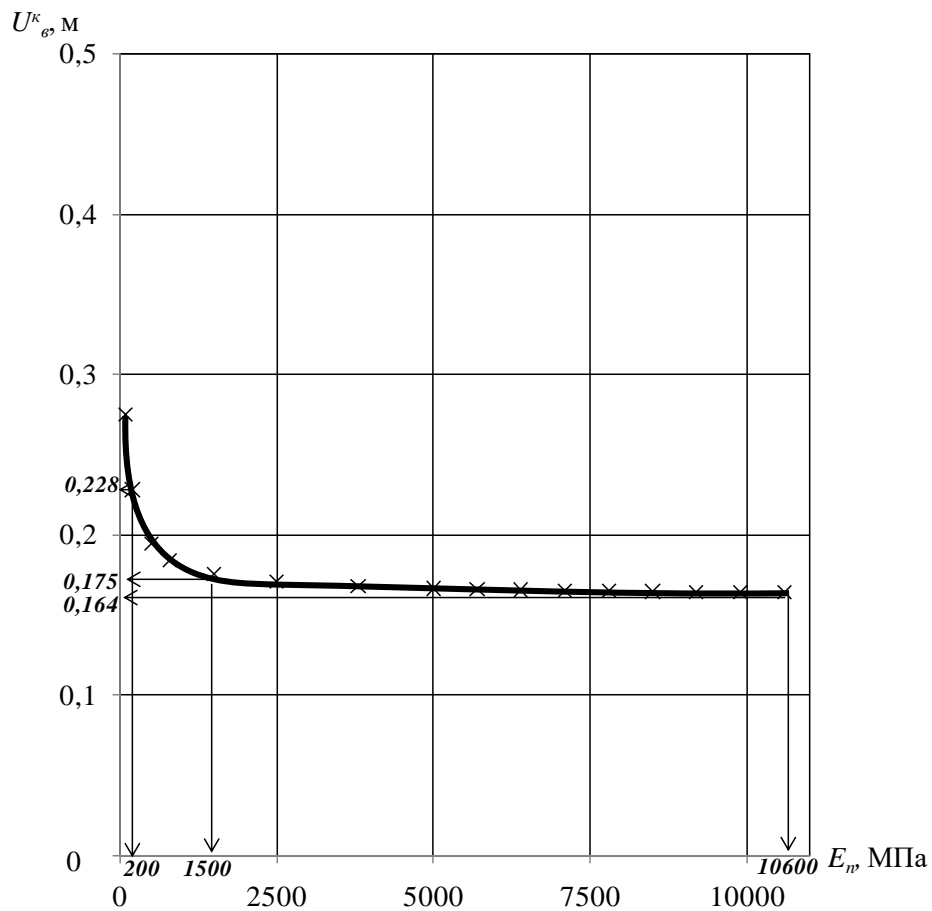


Рисунок 8. Графік залежності зміщень порід покрівлі конвеєрного хідника 11-ої західної лави пл. с₁₈ $U^k_{с}$ від модуля загальної деформації підстиляючих порід E_n

Вдячність

Дослідження проведено в рамках науково-дослідної роботи «Розробка і впровадження нетрадиційних ресурсозберігаючих технологій управління напружено-деформованим станом гірського масиву навколо виробок» (державна реєстрація 0110U001053).

Список літератури

1. Усаченко Б.М., Чередниченко В.П., Головачанский И.Е. Геомеханика охраны выработок в слабометаморфизованных породах. Київ: Наукова думка, 1990, 144с.
2. Усаченко Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок. Київ: Наукова думка, 1979, 136с.
3. В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев, В.Н. Почепов, А.Р. Мамайкин. Методика прогноза перемещений контура крепи выемочной выработки, расположенной в слоистом массиве слабых пород. Днепропетровск: НГУ, 2008, 69 с.
4. Симанович Г.А., Мартовицкий А.В., Копилов О.П. Методи розрахунку переміщень і зміцнень приконтурних порід гірничих виробок шахт Західного Донбасу. Дніпропетровськ: ЛізуновПрес, 2010, 330 с.
5. Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Снігур В.Г., Свистун Р.М. Аналітико-експериментальні дослідження стійкості виїмкових виробок і розрахунок параметрів кріпильної системи. Дніпропетровськ: ЛізуновПрес, 2013, 178 с.
6. Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Вівчаренко О.В., Малихін О.В., Гусев О.С. Геомеханіка навантаження і розрахунок параметрів кріпильної й охоронної систем підготовчих виробок шахт Західного Донбасу. Дніпропетровськ: ЛізуновПрес, 2014, 228 с.
7. Халимендик Ю.М., Бруй А.В., Барышников А.С. Поддержание штрека канатными анкерами в условиях слабых боковых пород. *Геотехнічна механіка*, 2013, № 110. (<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60033>).
8. Халимендик Ю.М. Применение крепи в слабых слоистых породах угольных шахт. *Уголь Украины*, 2015, №3-4, С. 20-25.
9. Солодянкин А.В., Гапеев С.Н., Выгодин М.А., Воронин С.А., Мкртчян С.В. Эффективные способы поддержания выработок в сложных условиях шахт Западного Донбасса. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*, 2016, № 2/2016(18), С. 41-48.
10. Солодянкин А.В., Григорьев А.Е., Халимендик А.В., Машурка С.В. Шахтные исследования геомеханических процессов в окрестности участков выработок ГП «Шахтоуправление «Южнодонбасское №1». *Геотехническая механика*, 2015, № 123, С. 87-98.
11. Солодянкин А.В., Мартовицкий А.В., Панченко В.В. Оценка геомеханических условий поддержания протяженных выработок шахт ОАО «Павлоградуголь». *Разработка рудных месторождений*, 2011, № 94, С. 3-6.
12. Солодянкин А.В., Машурка С.В., Дудка И.В., Кузьева О.А. Обеспечение устойчивости участков выработок для повторного использования в условиях ГП «Шахтоуправление «Южнодонбасское №1». *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва*, 2015, № 1/2015(5), С. 96-105.
13. Якоби О. Практика управления горным давлением. Москва: Недра, 1987, 566 с.
14. Глушко В.Т., Цай Т.Н., Ваганов И.И. Охрана выработок глубоких шахт. Москва: Недра, 1975, 200 с.
15. Иудин М.М. Геомеханическая модель оценки механических свойств мерзлых горных пород в массиве. *Вестник ЯГУ*, 2008, Т. 5, №2, С. 40-45.
16. Реппенеит К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. Москва: Недра, 1975, 223 с.
17. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. Москва: Недра, 1970, 164 с.
18. Хазипов И.В. Разработка способов создания искусственных породных сооружений для охраны повторно используемых выемочных выработок: дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.02: ДонНТУ, Донецк, 2009, 157 с.
19. Łukasz Ostrowski, Piotr Małkowski. Wpływ zawodnienia na wypiętrzanie skał spągowych wyrobiska korytarzowego. *Przegląd górniczy*, 2016, nr. 3, s. 28-38.
20. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. Москва: Недра, 1992, 224 с.
21. Яланский А.А., Сапунова И.А., Слащев А.И., Новиков Л.А. Обоснование исходных параметров для моделирования геомеханических процессов в задачах оценки безопасности поддержания горных выработок. *Геотехнічна механіка*, 2014, №119, С. 282-295.

22. Гик Л.Д. Нелинейность гранулированных и трещиноватых горных пород в условиях малых деформаций. *Физическая мезомеханика*, 2005, Т.8, № 1, С. 81-89.
23. Цаплиев В.М., Иванюк Р.М., Зверевич В.В. Ультразвуковой контроль нелинейных упругих характеристик микротрещиноватых поликристаллических горных пород. *Записки горного института*, 2013, Т. 204, С. 105-109.
24. Шабаетов С.Н. Влияние крупности частиц раздробленной горной породы на величину модуля упругости. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2018, №5, С. 35-42.
25. Андреев В.И., Фролова И.И. Зависимость деформационных свойств грунтов и горных пород от различных физических факторов. *Вестник МГСУ*, 2011, №4, С. 201-204.
26. Матвеев А.А. Исследование деформационных и реологических свойств горных пород и массивов для прогноза устойчивости подземных выработок с учетом фрактальной геометрии: автореф. дисс...канд. техн. наук: 25.00.20. УГГУ, Екатеринбург, 2012, 21 с.
27. Щипанов П.В. Разработка методов поддержания выемочных штреков в условиях активного проявления горного давления при их повторном использовании: автореф. дисс... канд. тех. наук: 05.15.02. СПбГУ, Санкт-Петербург, 1993, 19 с.
28. Цытович Н.А. Механика грунтов. Москва: Высшая школа, 1983, 288с.
29. Борщ-Компонице В.И. Практическая механика горных пород. Москва: Горная книга, 2013, 322 с.
30. Заславский Ю.З., Дружко Е.Б. Новые виды крепи горных выработок. Москва: Недра, 1989, 256 с.
31. Зорин А. Н. Механика разрушения породного массива и ее использование при добыче полезных ископаемых. Москва: Недра-Бизнесцентр, 2001, 413 с.
32. Борзых А.Ф. Разработка способов охраны подготовительных выработок при отработке пологих угольных пластов восточного региона Украинского Донбасса: дисс... докт. техн. наук: 05.15.02. ДонГТУ, Донецк, 1998, 367с.
33. Соломоенко Д.А. Обоснование устойчивости повторно используемых подготовительных выработок при разработке пологозалегающих угольных пластов: дисс...канд. техн. наук: 25.00.20. СПбГУ, Санкт-Петербург, 2015, 121 с.
34. Аверкин Д.И. Обоснование параметров способа охраны выемочных штреков бетонной пакетированной полосой: дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.02. ИГТМ, Днепр, 2017, 197 с.
35. Временная инструкция по охране выемочных выработок полосами из твердеющих материалов. МУП СССР, АН СССР, ИГД им. А.А. Скочинского, Москва, 1981, 20 с.
36. Методика выбора способов охраны подготовительных выработок от горного давления глубоких шахт. МУП СССР, АН СССР, ИГД им. А.А. Скочинского, Москва, 1972, 27 с.
37. Ткачев В.А. Обоснование эффективных способов крепления и поддержания подготовительных выработок с учетом взаимовлияния с очистными забоями: автореф. дисс. ... д-ра. тех. наук: 05.15.02. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2000, 36 с.
38. Канин В.А. Физико-технические основы охраны выемочных выработок в условиях неустойчивых пород: дисс...докт. техн. наук: 05.15.02. УкрНИИ, Донецк, 2010, 364 с.
39. Заславский И.Ю., Компанец В.Ф., Файвищенко А.Г., Клещенко В.М. Повышение устойчивости подготовительных выработок угольных шахт. Москва: Недра, 1991, 235с.
40. Бажин Н.П., Глушихин Ф.П., Шклярский М.Ф. Влияние основных факторов на проявления горного давления в подготовительных выработках. *Уголь Украины*, 1982, № 8, С. 7-9.
41. Касьян Н.Н., Мокриенко В.Н., Сахно И.Г. Опыт-промышленная проверка способа охраны выработки жесткими сооружениями с компенсационными полостями в условиях шахты «Щегловская-Глубокая». *Науковий вісник НГУ*, 2012, №6, С. 30-36.
42. Рябцев О.В. Область рационального использования различных способов охраны выемочных штреков при отработке пластов высоконагруженными лавами. *Геотехническая механика*, 2009, № 82. (<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/33007>).
43. Зборщик М.П., Сахно И.Г. Повторное использование выработок высоконагруженных лав — крупный резерв снижения производственных затрат. *Уголь Украины*, 2013, №8, С. 6-12.
44. Симанович А.М., Сребный М.А., Малов В.И., Белинский И.Л. Совершенствование способов охраны подготовительных выработок. Донецк: Донбасс, 1973, 121 с.
45. Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Коваль О.І., Фомічов В.В. Експериментальні дослідження стійкості виїмкових виробок, які повторно використовуються на пологих пластах Донбасу. Дніпропетровськ: ЛізуновПрес, 2012, 426 с.
46. Стулишенко А.Ю., Брагин Е.П. Обоснование с использованием численного моделирования рациональных способов сохранения выработок за лавами в условиях шахт ГХК «Селидовуголь». *Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ*, 2000, № 12, С. 130-137.
47. Сахно И.Г. Влияние жесткости охранного сооружения на напряженно-деформированное состояние породного массива вокруг выработок, поддерживаемых за лавой. *Геотехнічна механіка*, 2014, №115, С. 176-187.

48. Kovalevs'ka I., Illiashov M., Fomychov V., Chervatuk V. The formation of the finite-element model of the system "undermined massif-support of stope". *Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining*, 2012, С. 73-79. <https://doi.org/10.1201/b13157-13>.
49. Bondarenko V., Hardygora M., Symanovych H., Sotskov V., Snihur V. Numerical methods of geomechanics tasks solution during coal deposits' development. *Mining of Mineral Deposits*, 2016, Volume 10, Issue 3, pp. 1-12. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.03.001>.
50. Зайченко С.В., Загоруйко Є.А., Стовпник С.М. Дослідження ефективності роликового ущільнення при будівництві тунелю методом скінченних елементів (МСЕ). *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, 2014, № 25, С. 76-81.
51. Ghosh G.N., Behera S.K. Prabhal K. Mandal, Plashant, Phanil K. Mandal, A.J. Das and P.K. Singh. Development of technology for extraction of locked up coal using artificial pillars. *NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries*, 2017, Vol. I, pp. 417-424.
52. Guangchao Zhang, Saijiang Liang, Yunliang Tan, Fuxing Xie, Shaojie Chen1 and Hongguo Jia Numerical modeling for longwall pillar design: a case study from a typical longwall panel in China. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, №15, pp. 121–134. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa9ca4>.
53. Zhang, Z.; Shimada, H.; Sasaoka, T.; Hamanaka, A. Stability Control of Retained Goaf-Side Gateroad under Different Roof Conditions in Deep Underground Y Type Longwall Mining. *Sustainability* 2017, 9, 1671. (<https://doi.org/10.3390/su9101671>)
54. Назимко В.В. Досвід застосування пакету FLAC3D для дослідження стійкості підготовчої виробки. *Геотехнічна механіка*, 2015, №125, С. 178-188.
55. Das Arka Jyoti, Mandal Prabhat Kumar, Ghosh Chandra Nath, Sinha Amalendu. Extraction of locked-up coal by strengthening of rib pillars with FRP – A comparative study through numerical modelling. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, № 27, pp. 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.024>.
56. Сдвижкова Е.А., Попович И.Н., Дудка И.В. Исследования геомеханических процессов на сопряжении подготовительной выработки с лавой в условиях шахты «Комсомольская» ГП «Антрацит». *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва*, 2014, № 2/2014(14), С. 72-79.
57. Małkowski Piotr, Ostrowski Łukasz. Wpływ właściwości mechanicznych skał otaczających wyrobisko korytarzowe na zjawisko wypiętrzania spągu. *Przegląd Górnictwa*, 2014, № 12, s. 78-90.
58. Солодянкін О.В., Дудка І.В., Терещук Р.М., Григор'єв О.Є. Охорона підготовчих виробок, що використовують повторно, в умовах антрацитових шахт. Дніпро: НГУ, 2017, 161 с.
59. Протождяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования эксперимента. Москва: Наука, 1970, 76 с.
60. Деметьев, Л.Ф. Применение математической статистики в нефтегазопромысловой геологии. Москва: Недра, 1977, 255с.
61. Негрій С.Г. Визначення зміщень порід покрівлі в зоні впливу очисних робіт позаду лави. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2019, №1 (44), С. 41-52. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-1-41-52>.
62. Nehrii S., Sakhno S., Sakhno I., Nehrii T. Analyzing kinetics of deformation of boundary rocks of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 2018, Volume 12, Issue 4, pp. 115-123. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.115>.
63. Негрей С.Г., Сахно И.Г., Негрей Т.А., Коломиец В.А. Установление зон активных обрушений пород непосредственной кровли на концевых участках лав. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2017, №1(40), С. 5-18.
64. Андрощук Н.В. Совершенствование способов охраны повторно используемых подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ: автореф. дисс...канд. техн. наук: 05.15.02. СПГТИ (ТУ), Санкт-Петербург, 1997, 21 с.
65. Долгий И.Е. Устойчивость подготовительных выработок угольных шахт в условиях активного проявления горного давления: автореф. дисс...докт. техн. наук: 05.15.04, 05.15.02. СПГТИ (ТУ), Санкт-Петербург, 1998, 42 с.
66. Жаров А.И. Обоснование и разработка перспективных технологических решений по бесцеликовой охране выработок на пологих пластах средней мощности Кузбасса: автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.15.02. МГУ, Москва, 1997, 31 с.

References

1. Usachenko B.M., Cherednichenko V.P., Golovchanskiy I.E. (1990) *Geomehanika ohrany i vyirabotok v slabometamorfizovannyih porodah*. Kiev, Naukova dumka, 144 p. (in Russian).
2. Usachenko B.M. (1979) *Svoystva porod i ustoychivost gornyyh vyirabotok*. Kiev, Naukova dumka, 136 p. (in Russian).

3. Bondarenko V.I., Kovalevskaya I.A., Simanovich G.A., Fomichev V.V., Pochevov V.N., Mamaykin A.R. (2008) Metodika prognoza peremescheniy kontura krepі vyiemochnoy vyirabotki, raspolozhennoy v sloistom massive slabiyh porod. Dnipropetrovsk, NGU, 69 p. (in Russian).
4. Bondarenko V.I., Kovalevska I.A., Simanovich G.A., Martovitskiy A.V., Kopilov O.P. (2010) Metody rozrakhunku peremishchen i zmitsnen prykonturnykh porid hirnychykh vyrobok shakht Zakhidnoho Donbasu. Dnipropetrovsk, LizunovPres, 330 p. (in Russian).
5. Bondarenko V.I., Kovalevska I.A., Simanovich G.A., Snigur V.G., Svistun R.M. (2013) Analitiko-eksperymentalni doslidzhennia stiikosti vyimkovykh vyrobok i rozrakhunok parametriv kripylnoi systemy. Dnipropetrovsk, LizunovPres, 178 p. (in Russian).
6. Bondarenko V.I., Kovalevska I.A., Symanovych H.A., Vivcharenko O.V., Malykhin O.V., Husiev O.S. (2014) Heomekhanika navantazhennia i rozrakhunok parametriv kripylnoi y okhoronnoi system pidhotovchykh vyrobok shakht Zakhidnoho Donbasu. Dnipropetrovsk, LizunovPres, 228 p. (in Russian).
7. Khalymendyk Y.M., Bryi A.V., Baryshnikov A.S. (2013) Supporting of mine roadway with rope bolts under conditions of soft walls [Podderzhanie shtreka kanatnyimi ankerami v usloviyah slabiyh bokovykh porod]. Geo-Technical Mechanics, No 110. (in Russian). (<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60033>).
8. Khalymendyk Y.M. (2015) Primenenie krepі v slabiyh sloistyyh porodah ugolnykh shaht. Ugol Ukrainy, No 3-4, pp. 20-25. (in Russian)
9. Solodyankin A.V., Gapeev S.N., Vyigodin M.A., Voronin S.A., Mkrtchyan S.V. Effective way to maintain workings difficult conditions of mines western donbass [Effektivnyie sposobyi podderzhaniya vyirabotok v slozhnykh usloviyah shaht Zapadnogo Donbassa]. Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry, 2019. Issue 2(18), pp. 41-48.
10. Solodyankin A.V., Grigorev A.E., Halimendik A.V., Mashurka S.V. Shahtnyie (2015) In-mine investigation of geomechanical processes near the local workings in the state enterprise "Yuzhnodonbasskaya №1 mine" coal company" [Issledovaniya geomechanicheskikh protsessov v okrestnosti uchastkovykh vyirabotok GP «Shahtoupravlenie «Yuzhnodonbasskoe №1»]. Geo-Technical Mechanics, No 123, pp. 87-98 (in Russian).
11. Solodyankin A.V., Martovitskiy A.V., Panchenko V.V. Otsenka geomechanicheskikh usloviy podderzhaniya protyazhennykh vyirabotok shaht OAO «Pavlogradugol». Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy, 2011, No 94, pp. 3-6.
12. Solodyankin O., Mashurka S., Dudka I., Kuziaieva O. Provision stability local workings for reusing under the state enterprise "coal company «Yuzhnodonbasskaya No 1» [Obespechenie ustoychivosti uchastkovykh vyirabotok dlya povtornogo ispolzovaniya v usloviyah GP «Shahtoupravlenie «Yuzhnodonbasskoe № 1»]. Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry, 2015, No 1/2015(5), pp. 96-105.
13. Yakobi O. (1987) Praktika upravleniya gornym davleniem. Moscow, Nedra, 566 p. (in Russian).
14. Glushko V.T., Tsay T.N., Vaganov I.I. (1975) Ohrana vyirabotok glubokikh shaht. Moscow, Nedra, 200 p. (in Russian)
15. Iudin M.M. Geomechanicheskaya model otsenki mehanicheskikh svoystv merzlykh gornyykh porod v massive. Vestnik YaGU, 2008, volume 5, No 2, pp. 40-45.
16. Reppeneyt K.V. Deformiruemost massivov treschinovatykh gornyykh porod. Moscow, Nedra, 1975, 223 p.
17. Rats M.V., Chernyishev S.N. Treschinovatost i svoystva treschinovatykh gornyykh porod. Moscow, Nedra, 1970, 164 p.
18. Khazipov I.V. (2009) A Development of methods of creation of artificial constructions for the keeping of the reuse mining. [Razrabotka sposobov sozdaniya iskusstvennykh porodnykh sooruzheniy dlya ohranyi povtorno ispolzuemykh vyiemochnykh vyirabotok]: Ph. D., DonNTU, 157 p. (in Russian)
19. Łukasz Ostrowski, Piotr Małkowski. Wpływ zawodnienia na wypiętrzanie skał spągowych wyrobiska korytarzowego. Przegląd górniczy, 2016, No 3.– s. 28-38.
20. Stavrogin A.N., Protosenya A.G. Mehanika deformirovaniya i razrusheniya gornyykh porod. Moscow, Nedra, 1992, 224 p.
21. Yalanskiy A.A., Sapunova I.O., Slashchov A.I., Novikov L.A. Justification of the initial parameters for geomechanical processes modeling in problems of safety assessment of mine workings maintenance [Obosnovanie ishodnykh parametrov dlya modelirovaniya geomechanicheskikh protsessov v zadachah otsenki bezopasnosti podderzhaniya gornyykh vyirabotok]. Geo-Technical Mechanics, 2014, No 119, pp. 282-295.
22. Gik L.D. Nelineynost granulirovannykh i treschinovatykh gornyykh porod v usloviyah malyykh deformatsiy. Fizicheskaya mezomehanika, 2005, volume 8, No 1, pp. 81-89.
23. Tsaplev V.M., Ivanyuk R.M., Zverevich V.V. Ultrazvukovoy kontrol nelineynykh uprugikh karakteristik mikrotreschinovatykh polikristallicheskikh gornyykh porod. Zapiski Gornogo Instituta, 2013, volume 204, pp. 105-109.
24. Shabaev S.N. Vliyanie krupnosti chastits razdroblennoy gornoy porody na velichinu modulya uprugosti. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, 2018, No 5, pp. 35-42.

25. Andreev V.I., Frolova I.I. Zavisimost deformatsionnykh svoystv gruntov i gornykh porod ot razlichnykh fizicheskikh faktorov. Vestnik MGSU, 2011, No 4, pp. 201-204.
26. Matveev A.A. (2012) Issledovanie deformatsionnykh i reologicheskikh svoystv gornykh porod i massivov dlya prognoza ustoychivosti podzemnykh vyirabotok s uchetom fraktalnoy geometrii: Ph. D., URSMU, 21 p. (in Russian).
27. Schipanov P.V. (1993) Razrabotka metodov podderzhaniya vyiemochnykh shtrekov v usloviyakh aktivnogo proyavleniya gornogo davleniya pri ih povtornom ispolzovanii: Ph. D., SPMU, 19 p. (in Russian).
28. Tsyitovich N.A. (1983) Mehanika gruntov. Moscow, Vysshaya shkola, 288 p (in Russian).
29. Borsch-Komponiets V.I. (2013) Prakticheskaya mehanika gornykh porod. Moscow, Gornaya kniga, 322 p. (in Russian).
30. Zaslavskiy Yu.Z., Druzhko E.B. (1989) Novyye vidy krepki gornykh vyirabotok. Moscow, Nedra, 256 p. (in Russian).
31. Zorin A. N., Halimendik Yu. M., Kolesnikov V. G. (2001) Mehanika razrusheniya porodnogo massiva i ee ispolzovanie pri dobyche poleznykh iskopaemykh. Moscow, Nedra-Biznestsentr, 413 p. (in Russian).
32. Borzykh A.F. (1998) The development of protection methods for preparatory workings while working out of slops coal seams in the eastern region of Donbass [Razrabotka sposobov okhrany podgotovitel'nykh vyirabotok pri otrabotke pologikh ugol'nykh plastov vostochnogo regiona Ukrainskogo Donbassa]. Dr. Tech. Sci., DonSTU, 367 p. (in Russian).
33. Solomoychenko D.A. (2015) Obosnovanie ustoychivosti povtorno ispolzuemykh podgotovitel'nykh vyirabotok pri razrabotke pologozalegayuschikh ugol'nykh plastov: Ph. D., SPBU, 121 p. (in Russian).
34. Averkin D.I. (2017) Validation of Parameters for the Method of Gate Road Supporting by Concrete Packed Wall [Obosnovanie parametrov sposoba ohrany vyiemochnykh shtrekov betonnoy paketirovannoy polosoy]: Ph. D., IGTM, Dnipro, 197 c. (in Russian).
35. Vremennaya instruktsiya po ohrane vyiemochnykh vyirabotok polosami iz tverdeyuschikh materialov. MUP SSSR, AN SSSR, IGD im. A.A. Skochinskogo, Moscow, 1981, 20 p. (in Russian).
36. Metodika vyibora sposobov ohrany podgotovitel'nykh vyirabotok ot gornogo davleniya glubokikh shaht. MUP SSSR, AN SSSR, IGD im. A.A. Skochinskogo, Moscow, 1972, 27 p. (in Russian).
37. Tkachev V.A. (2000) Obosnovanie effektivnykh sposobov krepiveniya i podderzhaniya podgotovitel'nykh vyirabotok s uchetom vzaimovliyaniya s ochistnyimi zaboyami: Dr. Tech. Sci., SRSPU (NPI), 36 p. (in Russian).
38. Kanin V.A. (2011) Physical and technical basics of excavation workings in conditions of unstable rocks [Fiziko-tehnicheskie osnovy ohrany vyiemochnykh vyirabotok v usloviyakh neustoychivyykh porod]: Dr. Tech. Sci., UkrNIMI, 364 p. (in Russian).
39. Zaslavskiy I.Yu., Kompanets V.F., Fayvishenko A.G., Kleschenkov V.M. (1991) Povyshenie ustoychivosti podgotovitel'nykh vyirabotok ugol'nykh shaht. Nedra, Moscow, 235p. (in Russian).
40. Bazhin N.P., Glushihin F.P., Shklyarskiy M.F. (1982) Vliyanie osnovnykh faktorov na proyavleniya gornogo davleniya v podgotovitel'nykh vyirabotkakh. Ugol Ukrainy, No 8, pp. 7-9. (in Russian).
41. Kasyan N.N., Mokrienko V.N., Sakhno I.G. (2012). Experimental-industrial verification of maintenance method using rigid constructions with countervailing cavities in the mine "Scheglovskaya-Glubokaya" [Opyitno-promyshlennaya proverka sposoba ohrany vyirabotki zhestkimi sooruzheniyami s kompensatsionnyimi polostyami v usloviyakh shahty "Scheglovskaya-Glubokaya"]. Scientific Bulletin of National Mining University, No 6, pp. 30-36. (in Russian).
42. Riabtsev O.M. (2009) Area of the rational use of different ways of protection of preparatory drifts at working off layers by high-rate longwalls [Oblast ratsionalnogo ispolzovaniya razlichnykh sposobov ohrany vyiemochnykh shtrekov pri otrabotke plastov vyisokonagruzhennymi lavami]. Geo-Technical Mechanics, No 82, pp. 68-76. (in Russian)(<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/33007>).
43. Zborschik M.P., Sahno I.G. (2013) Povtornoe ispolzovanie vyirabotok vyisokonagruzhennykh lav - krupnyy rezerv snizheniya proizvodstvennykh zatrat. Ugol Ukrainy, No 8, pp. 6-12. (in Russian)
44. Simanovich A.M., Srebnyi M.A., Malov V.I., Belinskiy I.L. (1973) Sovershenstvovanie sposobov ohrany podgotovitel'nykh vyirabotok. Donetsk, Donbass, 121 p. (in Russian).
45. Bondarenko V.I., Kovalevska I.A., Symanovych H.A., Koval O.I., Fomichov V.V. (2012) Eksperymentalni doslidzhennia stiiosti vyimkovykh vyrobok, yaki povtorno vykorystovuiutsia na polohykh plastakh Donbasu. Dnipropetrovsk, LisunovPres, 426 p. (in Ukrainian).
46. Stulishenko A.Yu., Bragin E.P. (2000) Obosnovanie s ispolzovaniem chislennogo modelirovaniya ratsionalnykh sposobov sohraneniya vyirabotok za lavami v usloviyakh shaht GHK «Selidovugol». MIAB, No 12, pp 130-137. (in Russian).
47. Sakhno I.G. (2014) Impact of rigidity of a protective construction on the stress-strain state of the rock mass around the roadways supported after the longwall [Vliyanie zhestkosti ohrannogo sooruzheniya na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie porodnogo massiva vokrug vyirabotok, podderzhivaemykh za lavoy]. Geo-Technical Mechanics, No 115, pp. 176-187. (in Russian).

48. Kovalevs'ka I., Illiashov M., Fomychov V., Chervatuk V. The formation of the finite-element model of the system "undermined massif-support of stope". Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining, 2012, pp. 73-79. <https://doi.org/10.1201/b13157-13>
49. Bondarenko V., Hardygora M., Symanovych H., Sotskov V., Snihur V. (2016) Numerical methods of geomechanics tasks solution during coal deposits development. Mining of Mineral Deposits, Volume 10, Issue 3, pp. 1-12. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.03.001>.
50. Zaichenko S.V., Zahoruiko Ye.A., Stovpnyk S.M. (2014) Research of efficiency roller compaction during construction of the tunnel by finite element method (FEM) [Doslidzhennia efektyvnosti rolykovoho ushchilnennia pry budivnytstvi tuneliu metodom skinchennykh elementiv (MSE).] Visnik NTUU «KPI». Series «Mining», No 25, C. 76-81.
51. Ghosh G.N., Behera S.K. Prabhal K. Mandal, Plashant, Phanil K. Mandal, A.J. Das and P.K. Singh (2017) Development of technology for extraction of locked up coal using artificial pillars. NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries, Vol. I, pp. 417-424.
52. Guangchao Zhang, Saijiang Liang, Yunliang Tan, Fuxing Xie, Shaojie Chen¹ and Hongguo Jia (2018) Numerical modeling for longwall pillar design: a case study from a typical longwall panel in China. Journal of Geophysics and Engineering, No 15, pp. 121–134. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa9ca4>.
53. Zhang, Z.; Shimada, H.; Sasaoka, T.; Hamanaka, A. (2017) Stability Control of Retained Goaf-Side Gateroad under Different Roof Conditions in Deep Underground Y Type Longwall Mining. Sustainability, No 9, 1671. (<https://doi.org/10.3390/su9101671>)
54. Nazimko V.V (2015) An experience of FLAC3D use during entry stability investigation [Dosvid zastosuvannya paketu FLAC3D dlia doslidzhennia stiihosti pidhotovchoi vyrobky]. Geo-Technical Mechanics, No 125, pp. 178-188. (in Ukrainian)
55. Das Arka Jyoti, Mandal Prabhat Kumar, Ghosh Chandra Nath, Sinha Amalendu (2017) Extraction of locked-up coal by strengthening of rib pillars with FRP – A comparative study through numerical modelling. International Journal of Mining Science and Technology, No 27, pp. 261–267. (<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.024>).
56. Sdvyzhkova O, Popovich I., Dudka I. (2014) Studies of geomechanical processes in the conjunction of the development working with longwall in the mine "Komsomolskaya" SE "Anthracite" [Issledovaniya geomechanicheskikh protsessov na sopryazhenii podgotovitelnoy vyirabotki s lavoy v usloviyah shahtyi «Komsomolskaya» GP «Antratsit»]. Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry, No 2/2014(14), pp. 72-79. (in Russian)
57. Małkowski Piotr, Ostrowski Łukasz (2014) Wpływ właściwości mechanicznych skał otaczających wyrobisko korytarzowe na zjawisko wypiętrzania spągu. Przegląd Gorniczy, No 12, s. 78-90.
58. Solodiankin O.V., Dudka I.V., Tereshchuk R.M., Hryhoriev O.Ie. (2017) Okhorona pidhotovchykh vyrobok, shcho vykorystovuiut povtorno, v umovakh antratsytovykh shakht. Dnipro, NGU, 161 p.
59. Protodyakonov M.M., Teder R.I. (1970) Metodika ratsionalnogo planirovaniya eksperimenta. Moscow, Nedra, 76 p. (in Russian).
60. Dementev L.F, Zhdanov M.A., Kirsanov A.N. (1977) Primenenie matematicheskoy statistiki v neftegazopromyislovoy geologii. Nedra, Moscow, 255 p. (in Russian).
61. Nehrii S. (2017) Determination of displacement the roof of the mining workings in the zone of influence of longwall face [Vyznachennia zmishchen porid pokrivli v zoni vplyvu ochysnykh robot pozadu lavy]. Journal of Donetsk Mining Institute, No. 1 (44), pp. 41-52. (in Russian). (<https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-1-41-52>).
62. Nehrii S., Sakhno S., Sakhno I., Nehrii T. (2018) Analyzing kinetics of deformation of boundary rocks of mine workings. Mining of Mineral Deposits. Volume 12, Issue 4, pp. 115-123. (<https://doi.org/10.15407/mining12.04.115>).
63. Nehrii S., Sakhno I., Nehrii T., Kolomiets V. (2017) Determination of active caving zones of at the ends of the longwalls [Vyznachennia zmishchen porid pokrivli v zoni vplyvu ochysnykh robot pozadu lavy]. Journal of Donetsk Mining Institute, No. 1 (40), pp. 5 - 18. (in Russian).
64. Androschuk N.V. (1997) Sovershenstvovanie sposobov ohranyi povtorno ispolzuemykh podgotovitelnykh vyirabotok v zone vlianiya ochistnykh rabot: Ph. D., SPMU, 21 p. (in Russian).
65. Dolgiy I.E. (1998) Ustoychivost podgotovitelnykh vyirabotok ugolnykh shaht v usloviyah aktivnogo proyavleniya gornogo davleniya: Dr. Tech. Sci., SPMU, 42 p.
66. Zharov A.I. (1997) Obosnovanie i razrabotka perspektivnykh tehnologicheskikh resheniy po bestselikovoy ohrane vyirabotok na pologih plastah sredney moschnosti Kuzbassa: Dr. Tech. Sci., MGU, 31 p.

Надійшла до редакції 06.11.2019

S. Nehrii, T. Nehrii

RESEARCH OF BEHAVIOR PECULIARITIES OF SOFT ADJOINING ROCKS AROUND PROTECTIVE MEANS

Purpose: study the processes occurring in protective equipment and surrounding rocks in order to determine their influence on the state of preliminary roadway which is protected, for further development of measures to ensure its operational and safe condition.

Methodology: analysis of the results of modern scientific and technical achievements as for the state of preliminary roadways, mine in-situ observations of the state of mine roadways, modeling using the finite element method to identify features of behavior of the soft adjoining rocks around the protective means.

Results: the analysis of the results of scientific research to ensure the stability of preliminary roadways in soft adjoining rocks has been done. The mechanism of rock deformation around the protective means has been considered and the necessity of using the provisions of soil mechanics to solve the problems of ensuring the stability of roadways behind the faces has been substantiated. Based on the results of numerical modeling by the finite element method, the dependence of subsidence and shrinkage of protective means of the preliminary roadways on the main affecting factors, namely, the load intensity on the means, its width, initial height and deformation modulus and the coefficient of lateral deformations, as well as rock compressibility, underlying the protective construction, has been obtained. The regularity of displacements of the roof rocks in the preliminary roadways at the site of its maintenance behind the face has also been established, taking into account the displacements of the rocks over the edge of seam, the end section and over the protection means, which depend on the above factors. The analytical and experimental method has been developed for calculating displacements of the roof rocks in the preliminary roadway located in the zone of temporary bearing pressure behind the face.

Scientific novelty: the established patterns can be used to study rock deformations around mine roadways protected behind a face, especially when they underlie in the soft adjoining rocks, to develop effective means of protection.

Practical significance: established patterns can be used to study rock deformations around mine roadways protected behind a face, especially when they underlie in the soft adjoining rocks, to develop effective means of protection.

Keywords: soft adjoining rocks, protective means, rock deformation, numerical modelling, methodology, factor analysis.

Відомості про авторів

Незрій Сергій Григорович, кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; orcid.org/0000-0002-3195-8401, serhii.nehrii@donntu.edu.ua.

Незрій Тетяна Олександрівна, кандидат технічних наук, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; orcid.org/0000-0002-4239-3178, tetiana.nehrii@donntu.edu.ua.

Nehrii Serhii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, SHEE "Donetsk National Technical University"; serhii.nehrii@donntu.edu.ua.

Nehrii Tetiana, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, SHEE "Donetsk National Technical University"; tetiana.nehrii@donntu.edu.ua.