

УДК 622.831

doi: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-83-96>

С.Г. Негрій
І.О. Єфремов
Т.О. Негрій

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ НА ЗАСОБИ ОХОРОНИ В ЗОНІ ВПЛИВУ ОЧИСНИХ ВИБОЇВ

Мета: визначення навантаження на засіб охорони з боку нависаючих порід покрівлі для конкретних гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов та встановлення прийнятної методики.

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 визначення навантажень на засоби охорони.

Результати: виконано аналіз результатів наукових досліджень щодо забезпечення стійкості підготовчих виробок позаду лав, розглянуто підходи та методики щодо визначення навантажень на засоби охорони та обґрунтовано необхідність у встановленні прийнятної методики, використання якої буде розповсюджуватись на найбільш відповідальну ділянку виробки (зону впливу тимчасового опорного тиску позаду лави). На основі результатів шахтних інструментальних спостережень за станом підготовчих виробок в умовах пласта c_{18} «Шахтоуправління «Південнодонбаське №1» розроблено чисельну модель, розрахунок якої дозволив визначити напруження, які виникають на контакті засобу охорони та порід покрівлі у зоні впливу лави. Порівняння результатів моделювання та існуючих методик розрахунку навантажень на охоронні конструкції дозволило визначити найбільш відповідні до таких умов та було запропоновано для спрощення розрахунків приймати, що напруження у зоні впливу лави над охоронною спорудою досягають величини $(1,1 \dots 1,5) \gamma H$.

Наукова новизна: на основі чисельного моделювання досліджено закономірності розподілу навантажень на засоби охорони у зоні впливу очисних робіт.

Практичне значення: визначено прийнятні методики щодо визначення навантажень у зоні впливу очисного вибою та запропоновано рішення для спрощення розрахунку таких навантажень.

Ключові слова: засіб охорони, зона впливу очисних робіт, навантаження на охоронні споруди, чисельне моделювання, методика розрахунку.

Вступ.

Для забезпечення енергетичної незалежності України вельми актуальним є питання інтенсифікації видобутку вугілля з ускладненням гірничо-геологічних умов розробки вугільних пластів, яке обумовлене поглибленням гірничих робіт, а також розробкою вугленосних районів з вугіллями марок «Г» та «ДГ», які характеризуються слабкими вуглевміщуючими бічними породами. В таких умовах не завжди можливим та ефективним є використання стовпової системи розробки, аналогами якої є суцільна система розробки та різні варіанти комбінованої. За кордоном вважається, що суцільна система розробки – це результат неправильного проектування очисних робіт, який не зможе забезпечити високі техніко-економічні показники. Але, враховуючи специфіку роботи вугільних підприємств в умовах недофінансування галузі, іноді цей варіант залишається єдиною можливим. Найбільш ефективними є комбіновані системи розробки, які включають переваги стовпової та суцільної системи розробки, коли забезпечується

стійке провітрювання виїмкових діляниць, зменшення витрат на проведення виробок та високі навантаження на лави. Але використання комбінованих систем розробки передбачає збільшення витрат на підтримання підготовчих виробок, які охороняються позаду лав.

Охорона підготовчих виробок позаду очисних вибоїв передбачає використання способів охорони, які включають: встановлення та посилення засобів кріплення виробок, кінцевих ділянок лав та їх сполучень; залишення охоронних ціликів або спорудження штучних засобів охорони позаду кінцевих ділянок лав; зміцнення або розвантаження бічних порід тощо. Обов'язковим заходом є наявність засобу охорони позаду лави, оскільки для зменшення навантаження на основне кріплення виробки від нависаючих порід покрівлі їм з боку виробленого простору необхідно створити опору замість вийнятого вугільного пласту. Засоби охорони мають забезпечити достатню несучу здатність та обмежену піддатливість, щоб унеможливити значні осідання шарів покрівлі. Несуча

здатність засобу охорони визначається навантаженням з боку порід покрівлі, міцнісно-деформаційними характеристиками конструкції та її геометричними розмірами. Якщо параметри охоронних споруд є керованими, то навантаження на них приймається на основі розрахунків, які за різними методиками дає різні результати, які іноді суттєво відрізняються. Та не завжди такі розрахунки є корисними при визначенні необхідних параметрів засобу охорони для забезпечення мінімальних осідань покрівлі. Тому вибір та обґрунтування найбільш прийнятних методик до реальних умов охорони виробок є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Визначенню навантаження на охоронні споруди присвячені роботи [1-10]. Їх результати показують суперечливі дані, оскільки показують, що 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 25-60 МПа [5, 6, 11-14]. Такий широкий діапазон не дозволяє виявити найбільш прийнятну методику розрахунку шуканої величини для заданих умов.

У дисертаційному дослідженні [3] наводяться результати фактичних вимірів максимальних навантажень на залізобетонні тумби в умовах декількох лав шахт Луганської області, за якими встановлено, що навантаження на засоби охорони складали від 1 МН/м до 4,94 МН/м на глинах від 75 до 812 м. Треба відзначити, що мінімальній та максимальній величинам навантаження не відповідали граничні глибини розробки. Та автором було запропоновано вираз щодо визначення очікуваного навантаження на 1 м смуги з залізобетонних тумб P_p (кН/м), який має вигляд

$$P_p = 44\gamma(B + b_\sigma + b)m^{0,5}k_f \exp(0,0025H / f_{no}), \quad (1)$$

де γ – об'ємна вага порід покрівлі в межах товщі потужністю 15 м, кН/м³; B – ширина виробки, м; b_σ – ширина берми, м; b – ширина охоронної смуги, м; H – глибина розробки, м; m – потужність пласта, м; k_f – коефіцієнт зміни міцності порід покрівлі на висоту до 20 м над пластом, рад.; f_{no} – середньозважений коефіцієнт міцності

безпосередньої й основної покрівель в межах товщі потужністю 15 м, од.

Коефіцієнт зміни міцності порід покрівлі та середньозважений коефіцієнт міцності безпосередньої й основної покрівель визначаються виразами, відповідно

$$k_f = \arctg \frac{f_n^2 h_n + f_o^2 h_o + f_e^2 h_e}{0,5 f_n h_n^2 + f_o h_o (h_n + 0,5 h_o) + f_e h_e (h_n + h_o + 0,5 h_e)}$$

та
$$f_{no} = \frac{f_n h_n + f_o h_o + f_e h_e}{15},$$

у яких: f_n, f_o – коефіцієнти міцності порід за шкалою М.М. Протод'яконова, відповідно, безпосередньої й основної покрівель; h_n, h_o – потужності порід, відповідно, безпосередньої й основної покрівель, м; f_e – коефіцієнт міцності порід у шарі потужністю $h_e = 20 - (h_n + h_o)$.

Розрахункові величини перевищували фактичні в середньому у 2,8 рази, що було прийнято як коефіцієнт запасу. Вираз (1) було використано у дослідженні [1] для

визначення навантаження на пакетовану смугу зі швидкотверднучої бетонної суміші «ТЕКНАРД», яке склало 17,056 МН/м. Це дозволило визначити необхідну мінімальну міцність суміші (15,5 МПа) при ширині смуги 1,1 м.

У інструкції щодо охорони виробок смугами з тверднучих матеріалів [4] запропоновано інший вираз, який також враховує ширину виробки, вагу порід покрівлі, потужність пласта та шару порід безпосередньої покрівлі. Єдиним параметром, який характеризує основну покрівлю, прийнято крок її обвалення. Цей вираз має вигляд

$$P_p = \frac{\gamma h_n (B + 2,5)(B + 0,4h_n + 2,5) + \gamma l_o (10m - h_n)(l_o + 0,4h_n + 4m)}{2B - m + 5}, \text{ Н/м}, \quad (2)$$

де γ – об'ємна вага порід покрівлі, що нависають, кН/м³; h_n – потужність шару безпосередньої покрівлі, м; m – потужність пласта, м; B – ширина виробки у проходці, м; l_o – крок обвалення основної покрівлі, м (при $h_n \geq 10m$ $l_o = 0$).

З цього виразу для вугільного пласта потужністю 1,4 м, кроку обвалення основної покрівлі та $h_n = 0$ наведено розрахунок навантаження, яке склало 14 МН/м на литу смугу шириною 1,18 м.

У дослідженні [9] запропоновано вираз для визначення навантаження на тумби з блоків, який має вигляд

$$P_o = P - 1,46(R_{скр} - 60) + 4,37(H - 600) + 3,12(\Sigma h - 60) + 6,72(m - 1,5), \text{ кН}, \quad (3)$$

де Σh – потужність пачки основної покрівлі, що приймає участь у навантаженні, мм; P – величина, що характеризує типові навантажувальні властивості порід покрівлі (приймається для міцної підшви та покрівель: легкої нестійкої – 3300 кН; легкої стійкої – 3900 кН; важкої нестійкої – 4700 кН та важкої стійкої – 5200 кН); $R_{скр}$ – опір порід покрівлі однобічному стиску, МПа.

У відповідності з цим виразом величини навантаження на штучні споруди з фосфогіпсових блоків та БЗБТ і БДБТ можуть складати від 1,2 до 5 МН.

Як бачимо всі ці вирази обмежуються жорсткими засобами охорони з невеликою шириною, а не розглядаються конструкції з деревини (костри), рядової породи (бутова смуга) й інші, які мають високу піддатливість та їх ширина може досягати декількох метрів.

У роботі [15] запропоновано вираз для визначення навантаження на засіб охорони з мішків з породою в залежності від його піддатливості Δh (%), який має вигляд

$$P = - \left(1 + \frac{21,76}{\ln \frac{\Delta h}{19,2}} \right) \cdot 33,3, \text{ кПа}, \quad (4)$$

але при $\Delta h = 19,2\%$ вираз не має рішення, а при $\Delta h > 19,2\%$ – навантаження має негативні значення.

У статті [12] наведено окремі вирази для визначення навантаження на залізобетонні плити, пневмобалони,

дерев'яні костри, які у загальному вигляді можуть бути представлені, як

$$P = \frac{ay_{зад}P_{\max}}{bm(0,06v + 0,7)}, \text{ МПа}, \quad (5)$$

де $y_{зад}$ – задані опускання порід покрівлі, мм; P_{\max} – максимальна несуча здатність конструкції, МПа; v – середньодобова швидкість посування очисного вибою, т/добу; m – потужність пласта, м; a та b – коефіцієнти, які приймають різні значення для різних засобів охорони (для залізобетонних плит $a=1$, $b=150$; пневмобалонів – $a=1$, $b=250$; дерев'яних кострів – $a=0,2$ та $0,8$ і $b=150$ та 400).

З цього виразу, наприклад, максимально можливе навантаження на залізобетонні плити не перевищує 4 МПа [12], що відповідає навантаженням, які були отримані за результатами шахтних вимірів [3].

Барановський В.І. запропонував вираз для визначення навантаження на цілик у виробленому просторі, у якому враховано вагу порід, що приймають участь у деформаційних процесах. Цей вираз має вигляд

$$P = 2a_1\gamma H \left(1 + \frac{H}{2a_1tg\beta} \right), \text{ МПа}, \quad (6)$$

де a_1 та H – відповідно, ширина та висота призми над ціликом вугілля, м; β – кут нахилу сторін трикутних призм до горизонту, град.

Та у роботі [14] наводяться доводи щодо суперечливості у використанні виразу (6). Крім того, він не може використовуватись для розрахунку навантажень на штучні споруди. Але ж

наробки Барановського В.І. авторами цієї праці були використанні для отримання виразу щодо визначення навантажень на будові смуги

$$P = \frac{\gamma H \left\{ l_2 + b - m + B \left[\frac{1}{\alpha} sh \frac{\alpha(l_2 + b - 2m)}{2} ch \frac{\alpha(2a_1 - l_2 - b - 2m)}{2} + \frac{m}{2} ch \alpha(a - 2m) \right] \right\}}{l_2}, \quad (7)$$

у якому

$$B = \frac{H \eta(H)}{\lg \beta \left[\frac{1}{\alpha} sh \alpha(a_1 - 2m) + m ch \alpha(a_1 - 2m) \right]},$$

де m – половина потужності пласта, м; l_2 – ширина будової смуги, м; b – ширина частини призми, яка виступає за межі смуги, м; α – коефіцієнт зміни навантаження від межі смуги до центру за ступеневим законом.

Вираз (7) доволі громіздкий у розрахунках та потребує попереднього визначення окремих параметрів, які є умовними та їх складно встановити. Але особлива цінність результатів досліджень, які наведені у роботі [14], це наявність результатів шахтних натурних спостережень та вимірів величини навантажень на будові смуги, яка досягала для різних умов від 6,5 до 12 МПа. Також вказується, що процес ущільнення смуг завершується на відстані до 30 м позаду лави, а інтенсивне зростання тиску – до 50 МПа. Тиск в смугах на дільниці їх стабілізації перевищує трикратну величину γH .

Як бачимо, різниця у розрахунках за різними методиками може відрізнятись у декілька разів. Великий розкид значень, на нашу думку, пояснюється тим, що вони визначалися для різних етапів підтримання виробки по відношенню до очисного вибою. Й, можливо, максимальному значенню відповідають умови в зоні впливу тимчасового опорного тиску, найменшому – в зоні сталого гірського тиску. Але це припущення вимагає підтвердження.

Мета досліджень.

Метою статті є визначення навантаження на засіб охорони з боку

нависаючих порід покрівлі для конкретних гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов та встановлення прийнятної методики.

Методи дослідження.

Аналіз результатів сучасних науково-технічних досягнень за станом підготовчих виробок, шахтні натурні спостереження за станом гірничих виробок, моделювання з використанням методу скінчених елементів для визначення навантажень на засоби охорони

Виклад основного матеріалу.

Визначити навантаження на охоронну конструкцію можливо на підставі чисельних розрахунків. При цьому вихідними даними необхідно прийняти результати натурних вимірювань зсувів порід навколо охоронної споруди. Зокрема, можна скористатися результатами досліджень стану підготовчих виробок, проведеними в умовах пласта c_{18} “Шахтоуправління “Південнодонбаське №1» [16]. Було встановлено, що в умовах 11 західної лави пласта c_{18} максимальні зміщення порід покрівлі над смугою з накатних кострів (рис. 1) шириною 1,1 м на відстані від лави 15 м (дільниця припадає на зону тимчасового опорного тиску лави) склали 25% від початкової висоти споруди та дорівнювали 0,21 м. Вони реалізовувались по верхньому майданчику засобу охорони з боку виробленого простору. З протилежного боку (на межі с виробкою) зміщення склали 0,09 м. Бічні породи були представлені тріщинуватим алевролітом (безпосередня покрівля) та піщаником (безпосередня підшва), який схильний до здимання. Межа міцності цих порід на одновісний стиск складала 30 МПа, але після деформування на контурі виробки позаду лави та навколо засобу охорони бічні породи мали залишкову



Рис. 1. Загальний вигляд охоронної конструкції з накатних кострів і бутової смуги позаду очисного вибою з боку конвеєрного хідника 11-ої західної лави

міцність, що дорівнювала від 25 до 30 % від граничної.

Зона впливу опорного тиску позаду лави поширюється на 40 м позаду лави (рис. 2). На цій ділянці відзначалися інтенсивні зміщення порід покрівлі та підосви виробки, які на видаленні понад 40 м мали загасаючий характер.

Параметри охоронних конструкцій, що споруджувались на межі з виробленим простором поряд з конвеєрним хідником 11 західної лави, відповідали паспорту кріплення й управління покрівлею. Єдиним

недоліком прийнятого засобу охорони була відносно велика піддатливість, коли зміщення порід покрівлі на кінцевій ділянці лави на рівні останньої стійки привибиїного простору (на видаленні 7,5 від вибою лави) склали 21% від потужності пласта, а на відстані 15 м - 41% від потужності. Останні зміщення становили 23% від початкової висоти засобу охорони, зокрема усадка накатного костра дорівнювала 14% (0,147 м), а осідання відносно поверхні підосви - 9% (0,095 м).

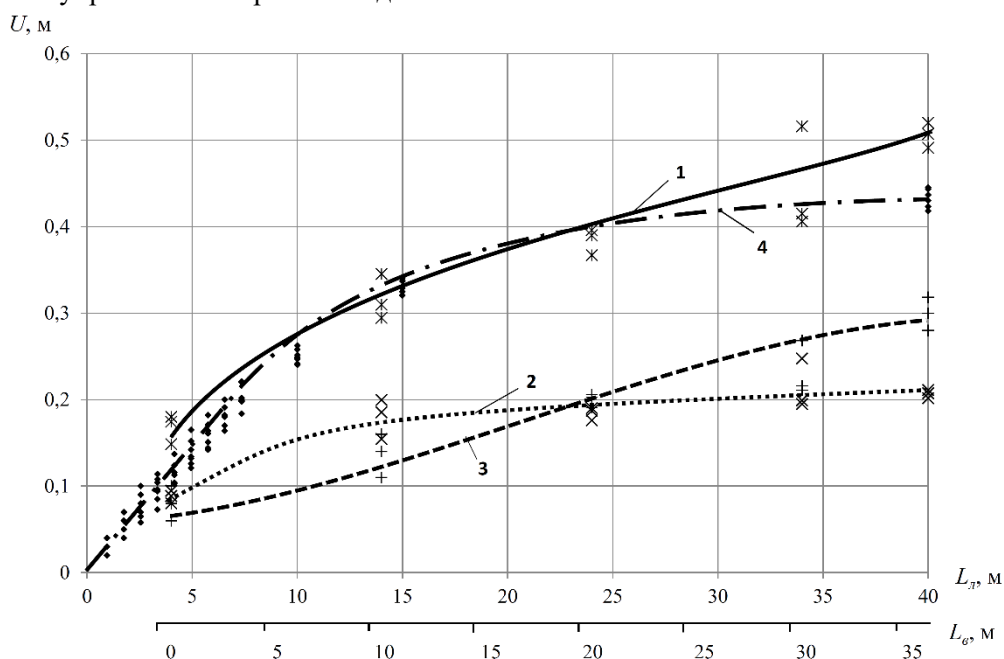


Рис. 2. Графіки залежностей вертикальної конвергенції порід покрівлі та підосви конвеєрного хідника 11-ої західної лави пл. c_{18} (1), зміщень його покрівлі (2) та підосви (3), зсувів покрівлі над привибиїним простором кінцевої ділянки лави та над засобом охорони (4) від відстаней до очисного L_n та підготовчого L_0 вибоїв

Значна піддатливість охоронної конструкції негативно позначалася на стані не тільки підшви виробки, а й на безпеці ведення гірничих робіт на кінцевій ділянці лави, про що свідчили обвалення порід в межах цієї ділянки.

Для вирішення поставленого завдання здійснювалось чисельне моделювання з використанням методу скінчених елементів. На цьому методі базуються програмні комплекси, які дозволяють оперативно вирішувати геомеханічні задачі з широким масивом параметрів. Найбільш широку популярність

отримали такі пакети, як PLAXIS [17-21], ANSYS [22-24], Solid Works [24, 25], FLAC3D [26-29] та PHASE-2 [30-32].

Задача вирішувалась у плоскій постановці, оскільки охоронна споруда та масив під нею витягнуті у плані та напруження розподіляються в одній площині. Було побудовано геометричну модель одиничною товщиною, яка складалася з шарів порід безпосередньої та основної підшви, над якими розташовувався засіб охорони (рис. 3).

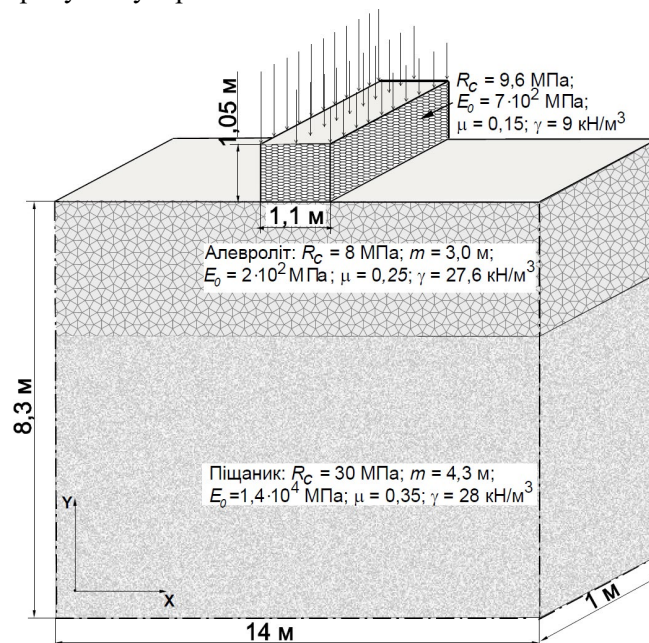


Рис. 3. Геометрія стрічкового засобу охорони, розташованого на масиві порід підшви з характеристиками, що відносяться до експериментальної ділянки (R_{cm} – міцність на стиск; m – потужність шару; E_0 – модуль загальної деформації; μ – коефіцієнт поперечних деформацій; γ – об’ємна вага)

Для реалізації нелінійного характеру деформування масиву використано пружно-пластичну модель Мора-Кулона, яка ґрунтується на законі Гука та критерії міцності Кулона-Мора [33]. Вони для гірської породи мають вигляд, відповідно,

$$\sigma = \varepsilon E \quad (8)$$

$$\text{та} \quad \tau = c + \sigma_n \tan \phi, \quad (9)$$

де σ – напруження, МПа; ε – відносна деформація; E – модуль пружності, МПа; τ – дотичні напруження, МПа; σ_n – нормальні напруження, МПа; c – зчеплення, МПа; ϕ – кут внутрішнього тертя, град

У методі скінчених елементів гірський масив моделюється квазидискретною моделлю з кінцевого числа елементів, які пов’язані між собою у

вузлах. Між вузовими силами та переміщеннями встановлюється зв’язок залежністю

$$\{f\} = [K]_i \{U\}_i, \quad (10)$$

де $\{f\}_i$ – вектор вузових сил i -го елемента, Н; $[K]_i$ – матриця жорсткості i -го елемента, Н/м; $\{U\}_i$ – вектор вузових переміщень i -го елемента, м.

Для всієї моделі складається матриця жорсткості системи у відповідності з виразом

$$\{F\} = [K] \{U\}, \quad (11)$$

де $\{F\}$ - вектор вузлових сил системи, Н;
 $[K]$ - матриця жорсткості системи, Н/м;
 $\{U\}$ - вектор вузлових переміщень системи, м.

Пружне рішення досягається шляхом перетворення у напруження та деформації елементів вузлових сил та переміщень для всієї досліджуваної області, а пружно-пластичне – досягається багаторазовим повторенням пружних рішень з наведеною зміною величин вузлових сил при постійній жорсткості системи [33].

Враховуючи граничні умови були прийняті такі розміри породного об'єму: висота - 8,3 м, ширина - 14 м.

Оскільки визначалося навантаження на засіб охорони, було прийнято режим заданих зміщень, які дорівнювали величинам, що були отримані в результаті шахтних інструментальних спостережень.

Обговорення результатів.

Відпрацювання скінчено-елементної моделі (рис. 4), дозволило отримати результати, які вказали на те, що охоронна споруда та породи, які її підстилають, суттєво деформуються (рис. 5) й більшу частку при цьому має вертикальні зміщення. Треба відзначити, що зміщення по висоті охоронної конструкції поступово зменшуються від покрівлі до підшви, причому по ширині засобу охорони вони більш рівномірні на рівні підшви, ніж на рівні покрівлі. Були визначені напруження в охоронній конструкції та породах підшви, а також напруження на верхньому майданчику засобу охорони, які є результатом дії шуканого навантаження (рис. 6). Згідно з результатами моделювання, впливає, що для умов конвеєрного хідника 11 західної лави пласта c_{18} при охороні його дерев'яними накатними кострами на контакт засобів охорони та порід покрівлі виникають вертикальні напруження від 8,4 до 25,2 МПа (в середньому 16,8 МПа). Ці напруження у 1,5 рази перевищують напруження γH , які мають місце у неторканому масиві та є результатом дії навантаження на засіб охорони величиною 15,4 МН/м. Оскільки для розрахунку моделі приймалися зміщення, які мали місце у зоні впливу очисного вибою, то можна вважати,

що отримана величина навантаження на засіб охорони припадає саме на цю зону. Це узгоджується з результатами роботи [2], де 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. У роботах [6, 34-36] вказується, що напруження у зоні опорного тиску складають $(1,1...1,5)\gamma H$. У дослідженні [37] вказується, що при охороні залізобетонними тумбами у залежності від класу порід покрівлі навантаження на тумби будуть від $1,0\gamma H$ до $1,3\gamma H$.

Для порівняння існуючих методик та результатів моделювання щодо розрахунку навантажень на засіб охорони в зоні впливу тимчасового опорного тиску було проведено розрахунки за виразами (1)-(5) для умов пласта c_{18} "Шахтоуправління "Південнодонбаське №1". Результати розрахунків наведені у таблиці 1.

Тобто отриманий при моделюванні результат показав найбільшу величину навантаження в зоні впливу лави. При цьому найближчими до отриманої величини виявилися результати, які визначалися з виразів (2) та (5), тобто методики, які враховують, відповідно, крок обвалення основної покрівлі та вплив параметрів засобів охорони. Методики, які ґрунтуються тільки на міцнісних показниках вміщувачого масиву та геометричних параметрах засобу охорони та виробки, що охороняється, показують значно менші величини, а вираз (4) взагалі не розповсюджується на умови, що розглядаються. Таким чином, існує декілька методик щодо розрахунку навантажень на засоби охорони та не всі вони дозволяють отримати більш-менш реальні дані для подальшого визначення раціональних параметрів цих конструкцій.

Висновок.

Оскільки метою статті є не спростування низки методик, а визначення таких, які можуть бути використані для визначення навантажень у зоні впливу очисного вибою, яка припадає на найбільш відповідальну ділянку підготовчої виробки, що підтримується позаду лави. Найбільш відповідними до таких умов запропоновані методики, що наведені у роботах [4] та [12].

За цими методиками навантаження на одиницю площі засобу охорони відноситься

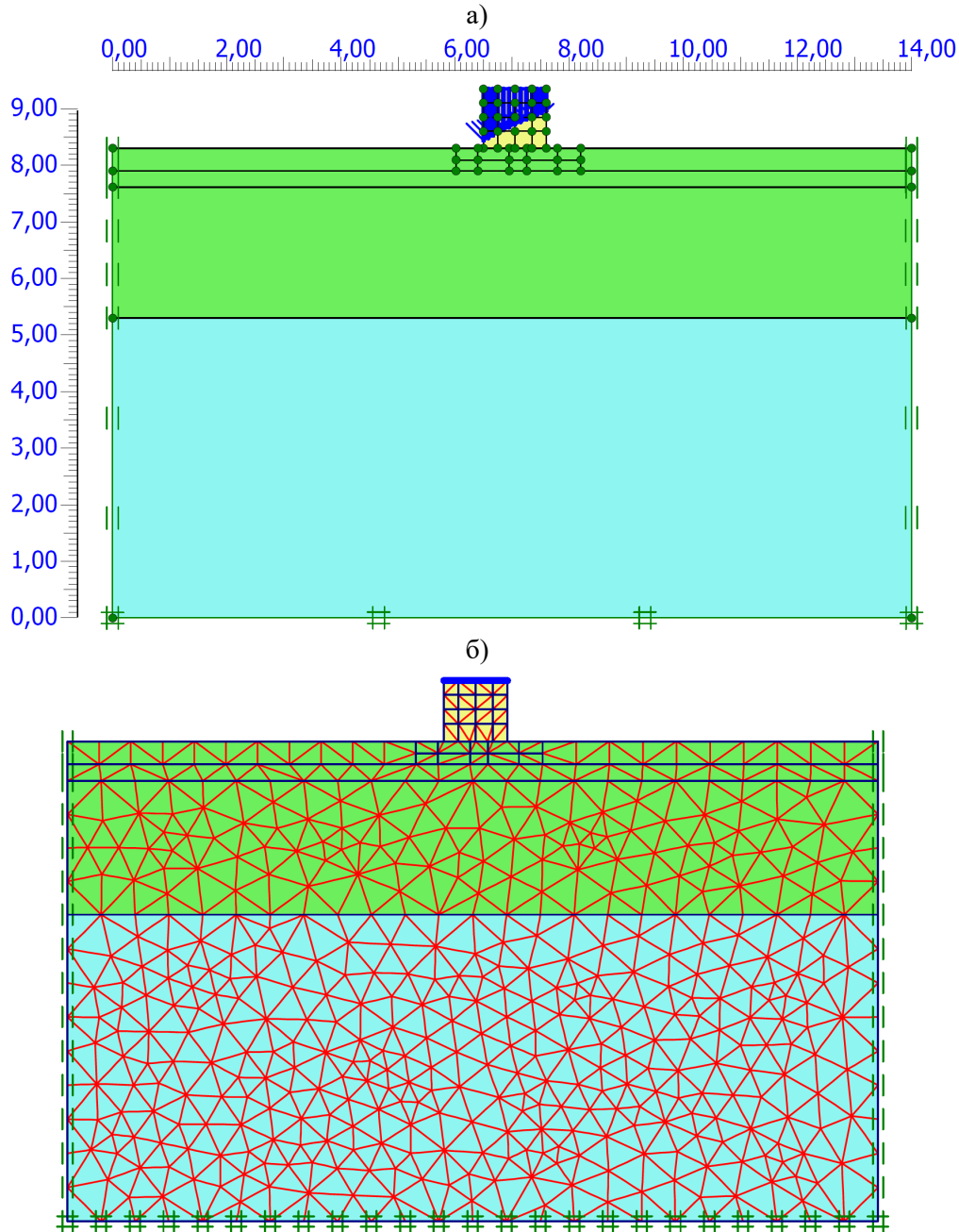


Рис. 4. Геометрична модель у вікні введення даних (а) та сітка скінченних елементів (б)

до γH , як 0,89 та 1,04, відповідно. Тобто приблизно дорівнює величині геостатичного тиску. Тому у спрощеному вигляді, враховуючи результати досліджень буде коректним у розрахунках приймати напруження над засобами охорони в зоні впливу очисних робіт в межах діапазону

$(1,1 \dots 1,5)\gamma H$, за якими може бути визначене навантаження на 1 м цієї конструкції при відомій ширині. Навантаження буде визначене з запасом, що дозволить у подальшому вибрати ефективний засіб охорони підготовчої виробки для забезпечення її експлуатаційного стану.

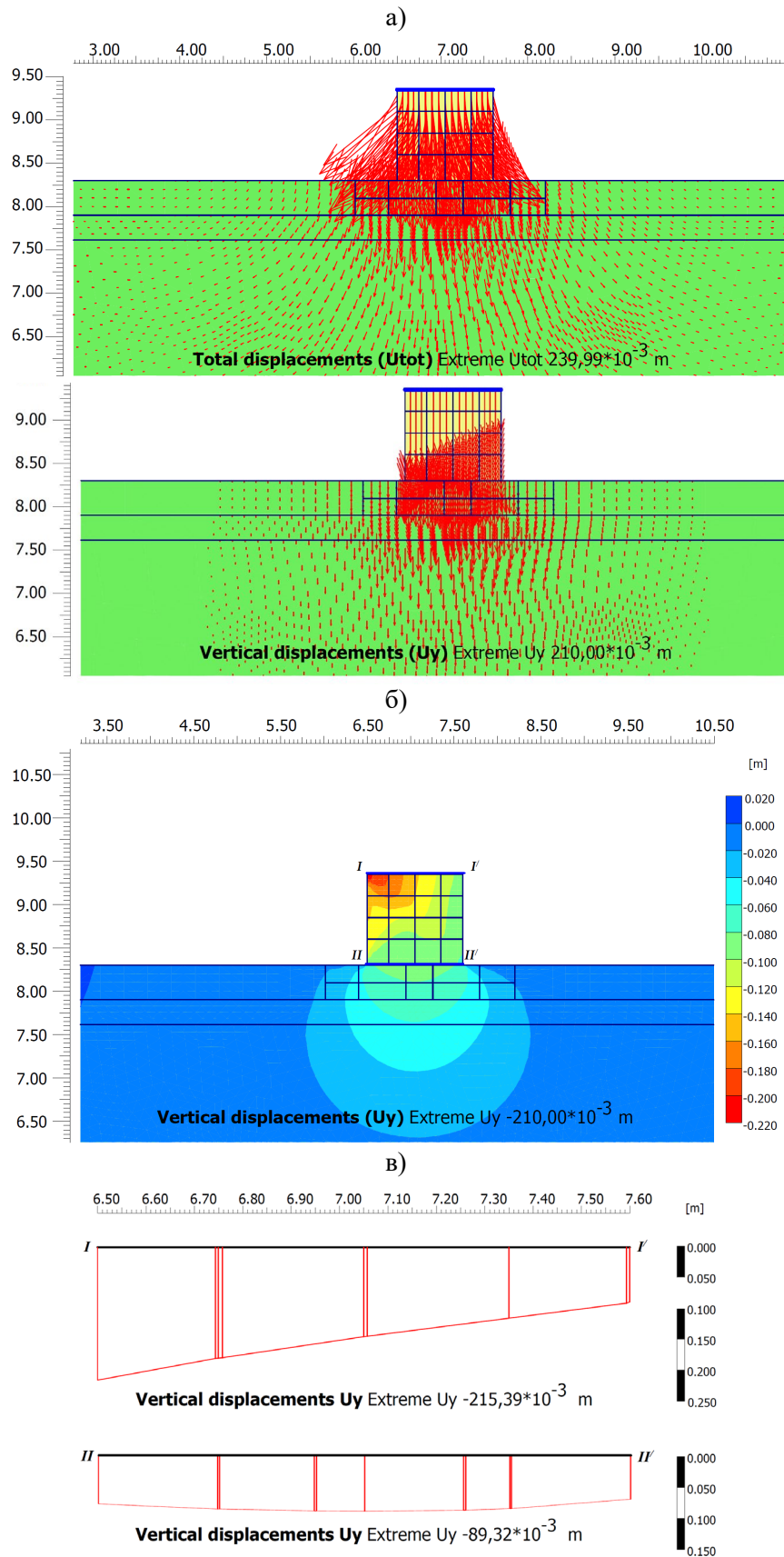


Рис. 5 – Результати розрахунку загальних зміщень в охоронній конструкції та породах підшви за результатами чисельного моделювання (а- розподіл векторів зміщень, б- розподіл ізоліній зміщень, в- розподіл вертикальних зміщень по лініям I-I' та II-II' (див. б))

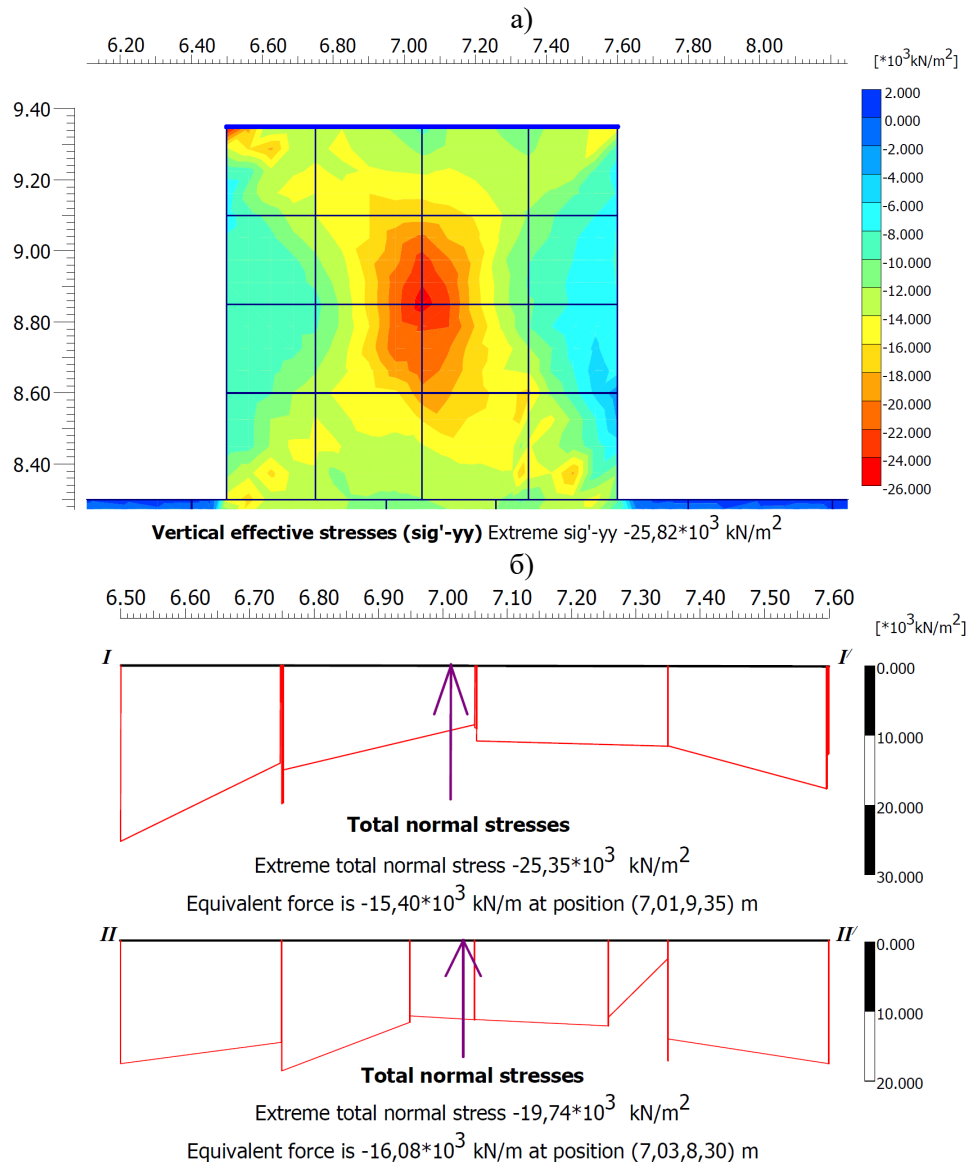


Рис. 6. Результати розрахунку вертикальних зміщень та напружень в охоронній конструкції за результатами чисельного моделювання (а - розподіл ізоліній напружень, б - епюри напружень на контактах по лініям I-I' та II-II')

Таблиця 1 – Результати розрахунків навантаження на засіб охорони в зоні впливу тимчасового тиску лави

Одиниці вимірювань навантаження	Результати розрахунків навантаження на засіб охорони					
	за чисельним моделюванням	за виразами				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
На 1 м засобу, МН/м	15,4	3,98	11,04	3,09	-4,05	12,9
На одиницю площі, МПа	14,0	3,6	10,0	2,8	-	11,7
Співвідношення з γ_H , од.	1,25	0,32	0,89	0,25	-	1,04

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. Аверкин Д.И. Обоснование параметров способа охраны выемочных штреков бетонной пакетированной полосой: дис.... канд. техн. наук: 05.15.02. ИГТМ, Днепр, 2017, 197 с.

2. 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.

6. Канин В.А. Физико-технические основы охраны выемочных выработок в условиях неустойчивых пород: дисс.... докт. техн. наук: 05.15.02. УкрНДМИ, Донецк, 2011. 364 с.

7. Методика выбора способов охраны подготовительных выработок от горного давления глубоких шахт. МУП СССР, АН СССР. ИГД им. А.А. Скочинского. Москва, 1972. 27 с.

8. 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.

9. Тимохин А.Н. Обоснование параметров и разработка податливых опор для охраны повторно используемых выработок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02. ВНИМИ, Санкт-Петербург, 1993. 14 с.

10. Ткачев В.А. Обоснование эффективных способов крепления и поддержания подготовительных выработок с учетом взаимовлияния с очистными забоями: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.15.02. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2000. 36 с.

11. Касьян Н.Н., Мокриенко В.Н., Сахно И.Г. Опыт-но-промышленная проверка способа охраны выработки жесткими сооружениями с компенсационными полостями в условиях шахты «Щегловская-Глубокая». *Науковий вісник НГУ*. 2012. №6. С. 30-36.

12. Рябцев О.В. Область рационального использования различных способов охраны выемочных штреков при отработке пластов высоконагруженными лавами. *Геотехническая механика*. 2009. Вып. 82. С. 68-76.

13. Зборщик М.П., Сахно И.Г. Повторное использование выработок высоконагруженных лав - крупный резерв снижения производственных затрат. *Уголь Украины*. 2013. №8. С. 6-12.

14. Симанович А.М., Сребный М.А., Малов В.И., Белинский И.Л. Совершенствование способов охраны подготовительных выработок. Донецк: Донбасс, 1973. 121 с.

15. Хазипов И.В. Разработка способов создания искусственных породных сооружений для охраны повторно используемых выемочных выработок: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02. ДонНТУ, Донецк, 2009. 157 с.

16. 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. P. 115-123. (<https://doi.org/10.15407/mining12.04.115>).

3. Борzych А.Ф. Разработка способов охраны подготовительных выработок при отработке пологих угольных пластов восточного региона Украинского Донбасса. дис.... докт. техн. наук: 05.15.02. ДонГТУ, Донецк, 1998. 367 с.

4. Временная инструкция по охране выемочных выработок полосами из твердеющих материалов. МУП СССР, АН СССР. ИГД им. А.А. Скочинского. Москва, 1981, 20 с.

5. Заславский И.Ю., Компанец В.Ф., Файвишенко А.Г., Клещенков В.М. Повышение устойчивости подготовительных выработок угольных шахт. Москва: Недра, 1991. 235 с.

17. Nekache Radouane, Boukelloul M., Fredj M. Stability Analysis of Underground Mining and their Application on the Mine Chaabte El Hamra, Algeria. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015. Volume 15. P. 232-243.

(<https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.058>)

18. Maji V.B., Adugna A. Numerical modelling of tunneling induced ground deformation and its control. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2016. Volume 50. №2. P. 183-188.

19. Стовпник С.М., Осипов О.С. Геомеханічне обґрунтування засобів забезпечення стійкості тектонічно порушеного масиву на період спорудження великогабаритного тунелю. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2017. № 34. С. 17-27.

20. Nakache R., Boukelloul M.L., Bouhedja A., Fredj M. Stability analysis of the pillars of the underground mine Chaabet El-Hamra, Algeria by analytical and numerical method. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2019. № 2. P. 21-27.

21. Ghosh C.N., Behera S.K., Prabhat K. Mandal, Prashant, Phanil K. Mandal, Das A.J. and Singh P.K. Development of technology for extraction of locked up coal using artificial pillars. Conference: NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries At: New Delhi, India. 2017. Volume I. P. 417-424.

22. 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.

23. Kovalevska 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. P. 73-79.

(<https://doi.org/10.1201/b13157-13>)

24. 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>)

25. 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.

26. 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>)
27. Guangchao Zhang, Saijiang Liang, Yunliang Tan, Fuxing Xie, Shaojie Chen 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. P. 121–134. (<https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa9ca4>)
 28. Назимко В.В. Досвід застосування пакету FLAC3D для дослідження стійкості підготовчої виробки. *Геотехнічна механіка*. 2015. №125. С. 178–188.
 29. 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. P. 261–267. (<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.024>)
 30. Сдвижова 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.
 31. Małkowski Piotr, Ostrowski Łukasz. Wpływ właściwości mechanicznych skał otaczających wyrobisko korytarzowe na zjawisko wypiętrzania spągu. *Przegląd Górnictwa*. 2014. № 12. S. 78–90.
 32. 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.
 33. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. Москва: Недра, 1987. 221 с.
 34. 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.
 35. Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Снігур В.Г. Експериментальні дослідження зривання порід підшви підготовчих виробок на пологих пластах Донбасу. Дніпропетровськ: ЛізуновПрес, 2014. 224 с.
 36. 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*. 2000. № 12. С. 130–137.
 37. Десятерик Н.И., Кардаков В.Е., Нелюбов А.И. Охрана подготовительных выработок разгруженными от опорного давления ленточными целиками угля. *Уголь Украины*. 1981. № 11. С. 14–15.
 3. 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 vyrobotok pri otrabotke pologikh ugol'nykh plastov vostochnogo regiona Ukrainского Donbassa]. (Dr. Tech. Sci.), DonSTU. (in Russian).
 4. Vremennaya instruktsiya po ohrane vyimochnykh vyrobotok polosami iz tverdeyuschiy materialov. (1981). MUP SSSR, AN SSSR, IGD im. A.A. Skochinskogo, Moscow. (in Russian)
 5. Zaslavskiy I.Yu., Kompanets V.F., Fayvishenko A.G., Kleschenkov V.M. (1991). Povyshenie ustoychivosti podgotovitel'nykh vyrobotok ugol'nykh shaht. Moscow: Nedra. (in Russian)
 6. Kanin V.A. (2011). Physical and technical basics of excavation workings in conditions of unstable rocks [Fiziko-tehnicheskie osnovy okhrany vyimochnykh vyrobotok v usloviyakh neustoychiviy porod]. (Dr. Tech. Sci.), UkrNIMI, Donetsk. (in Russian)
 7. Metodika vyibora sposobov okhrany podgotovitel'nykh vyrobotok ot gornogo davleniya glubokikh shaht. (1972). MUP SSSR, AN SSSR, IGD im. A.A. Skochinskogo, Moscow. (in Russian)
 8. Solomoychenko D.A. (2015). Obosnovanie ustoychivosti povtorno ispolzuemykh podgotovitel'nykh vyrobotok pri razrabotke pologozalegayuschiy ugol'nykh plastov: (Ph. D.), SPBU. (in Russian)
 9. Timokhin A.N. (1993). Justification of parameters and development of compliant supports for the protection of reusable workings [Obosnovanie parametrov i razrabotka podatlivykh opor dlya okhrany povtorno ispolzuemykh vyrobotok]. (Ph. D.), VNIMI, Donetsk. (in Russian)
 10. Tkachev V.A. (2000). Obosnovanie effektivnykh sposobov krepleniya i podderzhaniya podgotovitel'nykh vyrobotok s uchetom vzaimovliyaniya s ochistnyimi zaboyami: (Dr. Tech. Sci.), SRSPU (NPI) (in Russian)
 11. 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 okhrany vyrobotki zhestkimi sooruzheniyami s kompensatsionnyimi polostyami v usloviyakh shahty "Scheglovskaya-Glubokaya"]. *Scientific Bulletin of National Mining University*, No 6, 30–36. (in Russian).
 12. 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 okhrany vyimochnykh shtrekov pri otrabotke plastov vyisokonagruzhennymi lavami]. *Geo-Technical Mechanics*, No 82, 68–76. (in Russian)
 13. Zborschik M.P., Sakhno I.G. (2013). Povtorno ispolzovanie vyrobotok vyisokonagruzhennykh lav - krupniy rezerv snizheniya proizvodstvennykh zatrat. *Ugol Ukrainy*, No 8, 6–12. (in Russian)
 14. Simanovich A.M., Srebnyi M.A., Malov V.I., Belinskiy I.L. (1973). Sovershenstvovanie sposobov okhrany podgotovitel'nykh vyrobotok. Donetsk: Donbass. (in Russian)
 15. 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

References

1. Averkin D.I. (2017). Validation of Parameters for the Metod of Gate Road Supporting by Concrete Packed Wall [Obosnovanie parametrov sposoba okhrany vyimochnykh shtrekov betonnoy paketirovannoy polosoy]: (Ph. D.), IGTM, Dnipro (in Russian)
2. Bazhin N.P., Glushihin F.P., Shklyarskiy M.F. (1982). Vliyanie osnovnykh faktorov na proyavleniya gornogo davleniya v podgotovitel'nykh vyrobotkakh. *Ugol Ukrainy*, No 8, 7–9. (in Russian)

ohranyi povtorno ispolzuemyih vyiemochnyih vyirabotok]: (Ph. D.), DonNTU, Donetsk.(in Russian)

16. 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, 115-123.

(<https://doi.org/10.15407/mining12.04.115>).

17. Nekache Radouane, Boukelloul M., Fredj M. (2015). Stability Analysis of Underground Mining and their Application on the Mine Chaabte El Hamra, Algeria. *Procedia Earth and Planetary Science*, Volume 15, 237-243.

(<https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.058>)

18. Maji V.B., Adugna A. (2016). Numerical modelling of tunneling induced ground deformation and its control. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, Volume 50, №2, 183-188.

19. Stovpnyk S.N., Osypov A.S. (2017). The geomechanical confirmation of methods for stabilization of tectonic mass rocks for period of building the tunnel of biggest dimensions [Heomekhanichne obgruntuvannia zasobiv zabezpechennia stiiikosti tektonichno porushenoho masyvu na period sporudzhennia velykohabarytnoho tuneliu]. *Visnik NTUU «KPI». Series «Mining»*, No 34, 17-27. (in Ukrainian)

20. Nakache R., Boukelloul M.L., Bouhedja A., Fredj M. (2019). Stability analysis of the pillars of the underground mine Chaabet El-Hamra, Algeria by analytical and numerical method. *Naukovyi Visnyk NHU*, № 2, 21-27.

21. Ghosh C.N., Behera S.K., Prabhat K. Mandal, Prashant, Phanil K. Mandal, Das A.J. and Singh P.K. (2017). Development of technology for extraction of locked up coal using artificial pillars. *Conference: NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries At. New Delhi*.

22. 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, 176-187. (in Russian)

23. Kovalevska I., Illiashov M., Fomychov V., Chervatuk V. (2012). The formation of the finite-element model of the system "undermined massif-support of slope". *Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining*, 73-79.

(<https://doi.org/10.1201/b13157-13>)

24. 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, 1-12.

(<http://dx.doi.org/10.15407/mining10.03.001>)

25. 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, 76-81. (in Ukrainian)

26. 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*, 9, 1671.

(<https://doi.org/10.3390/su9101671>)

27. 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*, 15, 121-134.

(<https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa9ca4>)

28. Nazimko V.V (2015). An experience of FLAC3D use during entry stability investigation [Dosvid zastosuvannia paketu FLAC3D dlia doslidzhennia stiiikosti pidhotovchoi vyrobky]. *Geo-Technical Mechanics*, No 125, 178-188. (in Ukrainian)

29. Das Arka Jyoti, Mandal Prabhat Kumar, Ghosh Chandra Nath, Sinha Amalendu (2017). Extraction of locked-up coal by strengthening of rib pillars with FRP – Acomparative study through numerical modelling. *International Journal of Mining Science and Technology*, № 27, 261-267.

(<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.024>)

30. Sdvizhkova 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 geomekhanicheskikh protsessov na sopryazhenii podgotovitelnoy vyirabotki s lavoy v usloviyakh shahtyi «Komsomolskaya» GP «Antratsit»]. *Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry*, No 2(14), 72-79. (in Russian)

31. Małkowski Piotr, Ostrowski Łukasz. (2014). Wpływ właściwości mechanicznych skał otaczających wyrobisko korytarzowe na zjawisko wypiętrzania spągu. *Przegląd Gorniczy*, № 12, 78-90.

32. Solodiantin O.V., Dudka I.V., Tereshchuk R.M., Hryhoriev O.Ie. (2017) Okhorona pidhotovchykh vyrobok, shcho vykorystovuiut povtorno, v umovakh antratsytovykh shakht. Dnipro: NGU. (in Ukrainian)

33. Fadeev A.B. (1987). Metod konechnykh elementov v geomehanike. Moscow: Nedra. (in Russian)

34. Bondarenko V.I., Kovalevska I.A., Symanovych H.A., Koval O.I., Fomichov V.V. (2012). Eksperymentalni doslidzhennia stiiikosti vyimkovykh vyrobok, yaki povtorno vykorystovuiutsia na polohykh plastakh Donbasu. Dnipropetrovsk: LisunovPres. (in Ukrainian)

35. Bondarenko V.I., Kovalevska I.A., Symanovych H.A., Snihur V.H. (2014). Eksperymentalni doslidzhennia zdymannia porid pidoshvy pidhotovchykh vyrobok na polohykh plastakh Donbasu. Dnipropetrovsk: LisunovPres. (in Ukrainian)

36. 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, 130-137. (in Russian)

37. Desyaterik N.I., Kardakov V.E., Nelyubov A.I. (1981). Ohrana podgotovitelnykh vyirabotok razgruzhennyimi ot opornogo davleniya lentochnyimi tselikami uglya. *Ugol Ukrainy*, No 11, 14-15. (in Russian)

Надійшла до редакції 26.03.2020

Рецензент д-р техн. наук, проф. С.В. Подкопаяв.

Негрії Сергій Григорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Розробка родовищ корисних копалин» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: serhii.nehrii@donntu.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3195-8401.

Єфремов Ігор Олексійович – доктор технічних наук, завідувач кафедри «Розробка родовищ корисних копалин» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

Негрії Тетяна Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Охорона праці» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: tetiana.nehrii@donntu.edu.ua, orcid.org/0000-0002-4239-3178.

DETERMINATION OF LOAD ON PROTECTIVE EQUIPMENT IN THE ZONE OF INFLUENCE OF BREAKAGE FACE

Purpose: determining the load of the overhanging roof rocks on protective equipment for specific mining, geological and technical conditions and establishing an acceptable methodology for such conditions.

Methodology: analysis of the results of modern scientific and technical achievements in terms of preparatory workings, mine field observations of the state of mine workings, modelling using the finite element method to determine the load on protective means.

Results: the analysis of the research results to ensure the sustainability of the preparatory workings behind the faces has been carried out; the approaches and methods for determining the load on the protective equipment have been considered, and the need to establish an acceptable methodology, the use of which would be applied for the most critical section of the workings (the zone of influence of the temporary bearing pressure behind the face), has been substantiated. Based on the results of mine instrumental observations of the state of preparatory workings in the conditions of the seam c_{18} of Colliery Group "Pivdenodonbaske No. 1", a numerical model has been developed, the calculation of which made it possible to determine the stress arising at the contact of the protective equipment and roof rocks in the face influence zone. Comparison of the simulation results and the existing methods for calculating the load on the protective constructions made it possible to determine the most suitable one for such conditions, and it has been proposed to simplify the calculations by admitting of the stress in the zone of the breakage face influence above the protective equipment reaches (1.1 ... 1.5) γH .

Scientific novelty: on the basis of numerical modelling, the patterns of load distribution on the protective equipment in the influence zone of breakage face have been investigated.

Practical significance: the acceptable methods for determining the load in the zone of influence of the breakage face have been identified, and the solutions to simplify the calculation of such load have been proposed.

Keywords: protective equipment, influence zone of breakage face, load on the protective equipment, numerical modelling, calculating methodology.

Nehrii Serhii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), State higher education institution "Donetsk National Technical University" (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine).

E-mail: serhii.nehrii@donntu.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3195-8401.

Yefremov Ihor – Doctor of Technical Sciences, State higher education institution "Donetsk National Technical University" (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine).

Nehrii Tetiana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), State higher education institution "Donetsk National Technical University" (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine).

E-mail: tetiana.nehrii@donntu.edu.ua, orcid.org/0000-0002-4239-3178