ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 622.834.3 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.300

© С.В. Буряк[1], В.Ю. Медяник[1], В.І. Бондаренко[1]
[1] Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОЦІНКА ВЗАЄМОДІЇ СИСТЕМИ «МЕХАНІЗОВАНЕ КРІПЛЕННЯ – ГІРСЬКИЙ МАСИВ» ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ШВИДКОСТЕЙ ПОСУВАННЯ ОЧИСНОГО ВИБОЮ

S. Buriak[1], https://orcid.org/0009-0005-0669-161X
V. Medianyk[1], https://orcid.org/0000-0001-5403-5338
V. Bondarenko[1] https://orcid.org/0000-0001-7552-0236
[1] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

EVALUATION OF THE INTERACTION BETWEEN THE "MECHANIZED SUPPORT – ROCK MASS" SYSTEM TO DETERMINE OPTIMAL ADVANCEMENT RATES FOR THE WORKING FACE

Мета. Обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів очисних комплексів (швидкості посування вибою та граничного часу технологічних простоїв) шляхом оцінки силової взаємодії в системі «механізоване кріплення – гірський масив» для запобігання критичним перевантаженням обладнання

Методика. Застосовано комплексний підхід, що базується на аналізі шахтних інструментальних спостережень та математичному моделюванні напружено-деформованого стану в програмному комплексі *MODEL* (за методикою проф. Савостьянова). Розрахункова схема враховує кінематичні характеристики машини (зокрема, ширину захвату комбайна 0,73 м), параметри опору гідросистеми кріплення, а також фізико-механічні властивості порід Західного Донбасу.

Результати. Досліджено механізм формування зовнішнього навантаження на очисне обладнання в міру відходу від розрізної печі. Доведено, що перші 7 діб простою очисного вибою є критичним періодом, який спричиняє інтенсивне осідання покрівлі, вичерпання робочої податливості гідростійок та перехід кріплення у небезпечний режим роботи на жорстку базу. Обґрунтовано мінімальну раціональну швидкість (кінематичний параметр) посування вибою на рівні понад 4,8 м/добу, що суттєво зменшує силове навантаження на секції. З огляду на геомеханічні фактори визначено, що оптимальна довжина напівпрольоту лави становить 87,5 м, а довжина виїмкового стовпа має дорівнювати 1800 м.

Наукова новизна. Встановлено закономірності перерозподілу опорного тиску та силової реакції механізованого кріплення залежно від темпів посування вибою. Визначено, що динаміка навантажень на металоконструкції має яскраво виражений нелінійний характер під час технологічних простоїв із максимальною концентрацією напружень біля площини вибою (у зоні защемлення).

Практична значимість. Запропоновані кінематичні та просторові параметри системи розробки дозволяють оптимізувати режими експлуатації машинних комплексів. Їх впровадження унеможливить критичні перевантаження металоконструкцій кріплення, подовжить ресурс обладнання та підвищить техніко-економічну ефективність відпрацювання вугільних пластів.

Ключові слова: *механізоване кріплення, силова взаємодія, навантаження, кінематичні параметри, швидкість посування вибою, технологічний простій, напружено-деформований стан.*

Вступ. В умовах сучасного підземного видобутку вугілля, зокрема на шахтах України, гірничі роботи ведуться у дедалі складніших гірничо-геологічних умовах. Збільшення глибини розробки, зростання геостатичного тиску, наявність слабких вміщуючих порід та підвищена газоносність масивів вимагають перегляду традиційних підходів до управління гірським тиском. Ефективність і безпека відпрацювання пологих вугільних пластів довгими очисними вибоями критично залежать від надійності роботи механізованих комплексів, де ключову роль відіграє характер взаємодії складної геомеханічної системи «механізоване кріплення – гірський масив».

Швидкість посування очисного вибою є одним із головних технологічних параметрів, що безпосередньо впливає на просторово-часовий напружено-деформований стан вугільно-породного масиву. Зміна темпів виймання вугілля визначає динаміку проявів гірського тиску, інтенсивність конвергенції порід покрівлі та, як наслідок, навантаження на робочі елементи кріплення. З одного боку, необґрунтоване зниження швидкості призводить до розвитку реологічних процесів, надмірного опускання покрівлі, втрати стійкості оголень та «затискання» секцій кріплення. З іншого боку, надмірне прискорення посування може викликати динамічні перевантаження системи, відставання кріплення та неконтрольовані обвалення основної покрівлі.

Незважаючи на значний досвід експлуатації механізованих комплексів, механізми адаптації параметрів їх роботи до змінного темпу просування вибою в нестабільних масивах вивчені недостатньо. Відсутність чітких математичних та геомеханічних критеріїв оптимізації цього процесу призводить до зниження продуктивності та підвищення аварійності на дільницях.

Слід відмітити, що сучасний етап розвитку підземного видобутку вугілля в Україні, зокрема на шахтах Західного Донбасу, характеризується інтенсивним веденням гірничих робіт у складних гірничо-геологічних умовах: за наявності слабкометаморфізованих вміщуючих порід та високого прояву гірського тиску. За таких умов забезпечення високої продуктивності та безпеки видобутку безпосередньо залежить від надійної, безперебійної та ефективної роботи очисних механізованих комплексів [1–5].

Основою сучасного очисного обладнання є механізоване кріплення, яке працює у жорсткому динамічному режимі безперервної взаємодії з породним масивом. Технологічні процеси виїмки вугілля, пересування секцій та керування покрівлею створюють складні циклічні навантаження на металоконструкції та елементи гідросистеми кріплення. Практичний досвід експлуатації очисного обладнання на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» доводить, що одним із визначальних експлуатаційних параметрів, який формує величину та характер цих навантажень, є швидкість посування очисного вибою [7–9].

Дослідження свідчать, що зниження темпів посування або технологічні простої (зокрема тривалістю понад 7 діб) призводять до різкого зростання конвергенції порід покрівлі та підошви, що викликає критичне перевантаження секцій кріплення та їх роботу на жорстку базу. З іншого боку, інтенсифікація посування вибою (до 20 м/добу і більше) суттєво змінює ширину зони опорного тиску та зміщує максимум гірського тиску ближче до вибою, вимагаючи відповідної реакції від кріплення.

Тому оцінка взаємодії системи «механізоване кріплення – гірський масив» для наукового обґрунтування та визначення раціональних швидкостей посування очисного вибою є надзвичайно актуальною науково-прикладною задачею геомеханіки. Її вирішення дозволить підвищити техніко-економічні показники ресурсовидобутку, мінімізувати екологічні та технологічні ризики, а також гарантувати безпеку праці гірників.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні раціональних експлуатаційних параметрів очисних комплексів (швидкості посування вибою та граничного часу технологічних простоїв) шляхом оцінки силової взаємодії в системі «механізоване кріплення – гірський масив» для запобігання критичним перевантаженням обладнання.

Матеріали та методи. Режими роботи механізованих кріплень. Робочі процеси руйнування вугільного пласта, пересування секцій механізованого кріплення та наступна посадка покрівлі формують складний безперервно-циклічний характер силових навантажень на елементи очисного комплексу [7–12]. Досвід експлуатації машинних комплексів в умовах Західного Донбасу свідчить, що зміна кінематичних параметрів (швидкості посування вибою) безпосередньо впливає на розподіл опорного тиску та, як наслідок, на силову реакцію кріплення. Наприклад, інтенсифікація швидкості пересування очисного вибою з 3 до 20 м/добу спричиняє розширення зони впливу опорного тиску в 1,6 раза, при цьому коефіцієнт концентрації напружень зростає вдвічі, а максимум навантаження зміщується до площини вибою, що вимагає підвищеного опору від гідросистеми кріплення. Натурними спостереженнями на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» встановлено, що крок обвалення порід основної покрівлі, який супроводжується роботою секцій кріплення на жорстку базу (повне вичерпання податливості), становить близько 30 м.

Оцінка силової взаємодії системи «механізоване кріплення – гірський масив». Дослідження взаємодії робочого обладнання з породним масивом показало, що розвиток зони руйнування підроблюваних порід ініціюється з моменту відходу очисного комплексу від розрізної печі. Процес стабілізується тоді, коли просування вибою стає співмірним із довжиною лави. У міру віддалення комплексу від монтажної камери [2, 11], у безпосередній покрівлі акумулюються внутрішні напруження, зумовлені згином породних шарів під дією власної ваги та привантаженням від основної товщі. Оцінка розрахункових даних виявила чіткий просторовий розподіл силових впливів: пікові нормальні напруження (від згину) зосереджуються над центральною частиною виробленого простору, тоді як максимальні дотичні напруження концентруються безпосередньо біля площини вибою – у зоні жорсткого защемлення пласта, де саме і працює секція механізованого кріплення [5–7].

Для кількісної оцінки цього зовнішнього навантаження на елементи кріплення було застосовано алгоритм математичного моделювання у програмному комплексі *MODEL*. В основу побудови розрахункової схеми (рис. 2) закладено інтегровані фізико-механічні параметри середовища та експлуатаційні характеристики обладнання. Зокрема, враховано модуль деформації порід ($2 \cdot 10^6$ тс/м²), межу міцності порід на стискання, кінематику виконавчого органу машини (ширина захвату комбайна 0,73 м), а також коефіцієнти, що визначають спосіб управління покрівлею.

Аналіз отриманих епюр навантажень та графічних залежностей (рис. 2) підтверджує, що тривалість технологічних зупинок комплексу є критичним експлуатаційним фактором, який визначає працездатність та ресурс обладнання. Доведено, що протягом перших 7 діб простою лави відбувається стрімке збільшення конвергенції покрівлі та розширення просторової зони опорного тиску. У цей період силове навантаження на гідростояки та перекриття секцій зростає по експоненті, досягаючи режиму граничних динамічних перевантажень (на тлі зниження тримальної здатності самого породного масиву). Збільшення часу простою понад 7 діб призводить до того, що процеси породного деформування уповільнюються, набуваючи плавної стабілізації, однак кріплення при цьому вже перебуває у небезпечному режимі роботи на жорстку базу (при повному вичерпанні податливості гідросистеми).

Результати та обговорення. Дослідження напружено-деформованого стану масиву в околиці лави. У програму MODEL вводяться такі вихідні дані для розрахунку що наведені нижче у таблиці 1 [9].

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку

Параметр	**Познач.**	**Значення**	**Од. вим.**
Модуль деформації породи основної покрівлі в об'ємному стані	E_0	2000000	тс/м²
Міцність породи основної покрівлі на стискання	$^{R}_{sg}$	3000	тс/м²
Тривала потужність пласта або вміщувальних порід	S_n	1000	тс/м²
Коефіцієнт жорсткості для основної покрівлі	β_0	0,06	1/м
Потужність пласта	m	1,0	м
Довжина напівпрольоту лави	dl	87,5	м
Кут падіння пласта	α	2	град.
Ширина захвату комбайна	r_k	0,73	м
Час зупинки вибою	t	0	діб
Коефіцієнт управління покрівлею повним обваленням	d_5	0,6	-
Коефіцієнт управління покрівлею частковою закладкою	d_6	0	-
Коефіцієнт управління покрівлею повною закладкою	d_7	0	-
Висота кріплення в завалі	$k_г$	0,9	м
Вологість порід основної покрівлі	W	5	%
Коефіцієнт тріщинуватості основної покрівлі	NTR	0,6	-
Кут сполучення лави зі штреком	AUM	90	град.

Відповідно до заданих початкових умов розроблено розрахункову модель (рис. 1) з відповідними епюрами діючих навантажень. На її базі виконано аналіз напружено-деформованого стану породного масиву залежно від динаміки посування лави. Виявлено закономірний зв'язок між геометричними параметрами зони впливу та швидкістю пересування очисного вибою. Встановлено, що зростання часу простоїв ініціює зменшення лінійної відстані від лінії вибою до зони, у якій геомеханічні напруження відповідають фоновим значенням незайманого масиву.

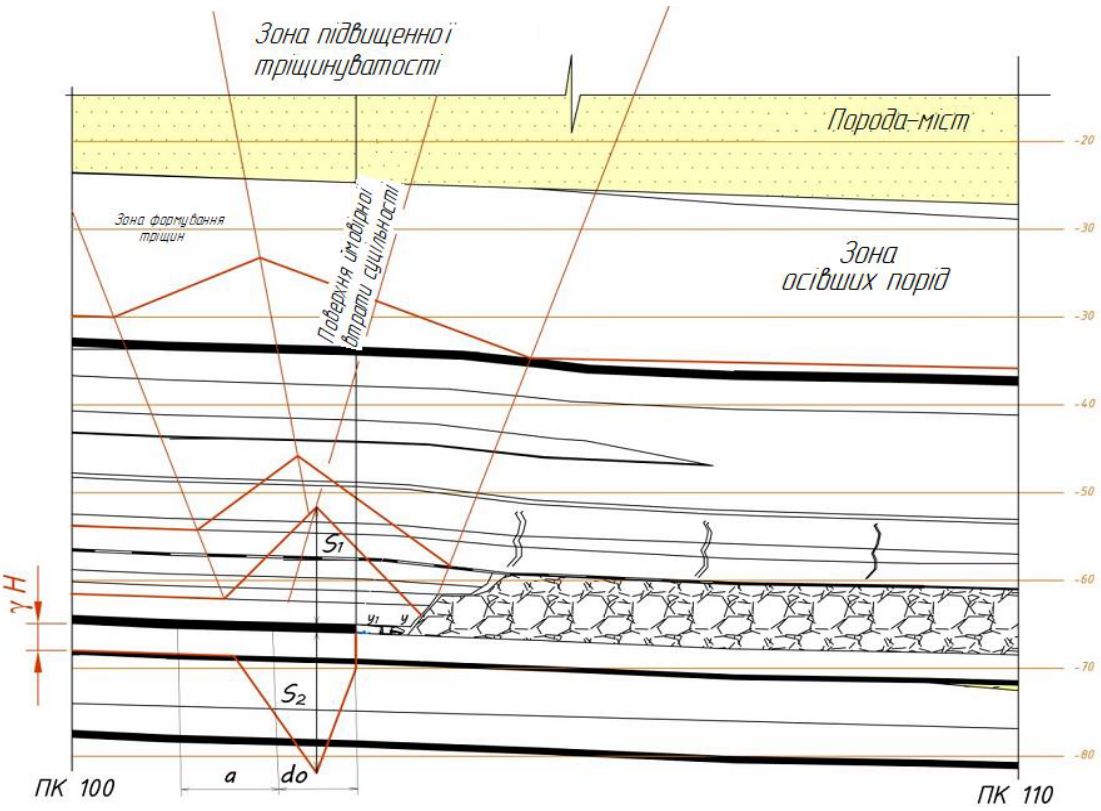


Рис. 1. Розрахункова схема з нанесенням епюр навантажень і геометричних параметрів: a – відстань від межі очисних робіт до точки, де напруження відповідають напруженням незайманого масиву; d_0 – відстань від площини вибою лави до максимуму реакції; S_1 – величина максимального навантаження; S_2 – величина максимальної реакції; y_1 – опускання осідання покрівлі над передньою стійкою кріплення; y_2 – опускання осідання покрівлі над задньою стійкою кріплення

Аналіз наведених діаграм (рис. 2–4) дозволяє виокремити два етапи розвитку геомеханічних процесів залежно від тривалості простою вибою. Протягом перших 7 діб фіксуються найбільш інтенсивні зміни напружено-деформованого стану масиву: стрімке зростання геометричних параметрів і величини осідання покрівлі на тлі помітного зниження силових характеристик. На наступному етапі (після 7-ї доби) процеси деформування суттєво уповільнюються, набуваючи затухаючого характеру, а зміни силових показників стають мінімальними. Отже, динаміка напружено-деформованого стану характеризується максимальною активністю в початковий період простою з подальшим переходом до плавної стабілізації (рис. 3, 4)

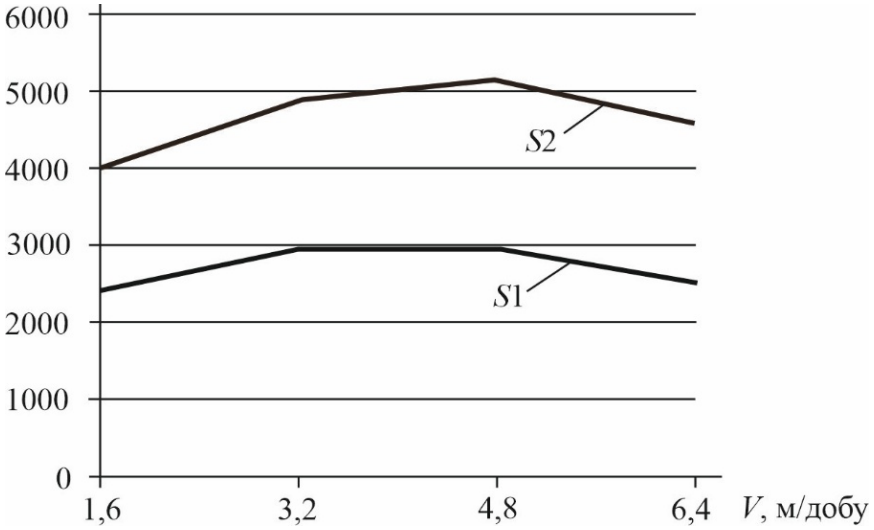


Рис. 2. Залежність величини зони опорного тиску від швидкості пересування очисного вибою (V)

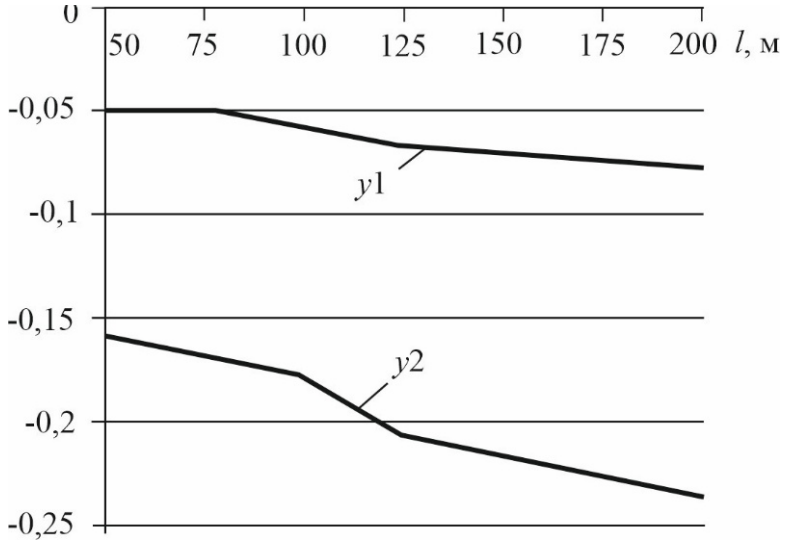


Рис. 3. Залежність величини опускань осідання покрівлі від довжини напівпрольоту лави

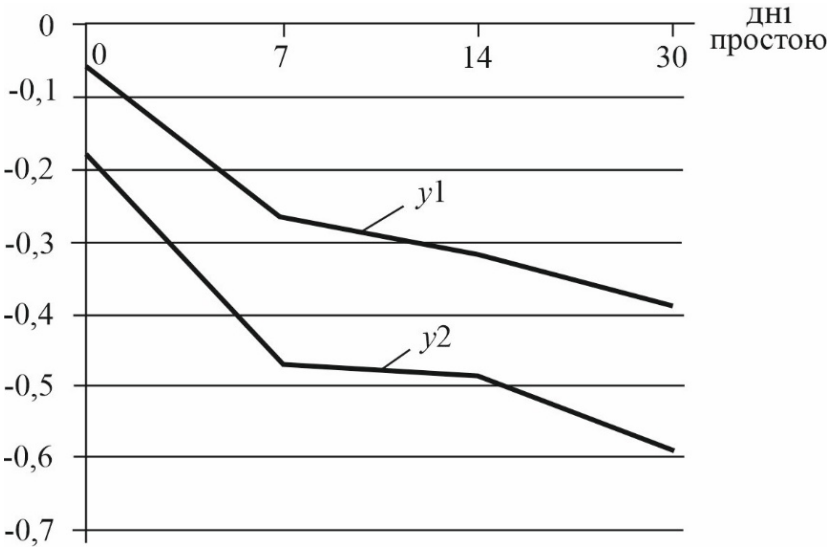


Рис. 4. Залежність величини опускань осідання покрівлі від часу простою вибою

Висновки. На основі виконаної оцінки силової взаємодії в системі «механізоване кріплення – гірський масив» та математичного моделювання (у програмному середовищі MODEL із використанням підходів проф. Савостьянова) отримано такі результати.

Встановлено, що критичним періодом формування максимальних навантажень на очисне обладнання є перші 7 діб технологічного простою вибою. У цей проміжок часу відбувається найбільш інтенсивне осідання порід покрівлі, що призводить до критичного зростання тиску на перекриття та гідросистему секцій.

З огляду на динаміку конвергенції та високий ризик вичерпання робочої податливості гідростійок (перехід кріплення на жорстку базу з подальшим руйнуванням елементів), науково доведено неприпустимість зупинки роботи очисного комплексу на термін 7 і більше діб.

Обґрунтовано раціональний кінематичний параметр експлуатації обладнання: для мінімізації силового навантаження на металоконструкції кріплення і забезпечення його надійної роботи, оптимальна швидкість посування очисного вибою має становити не менше 4,8 м/добу.

Для забезпечення стабільних режимів безперебійної експлуатації машинного комплексу в гірничо-геологічних умовах розглянутого масиву раціональна довжина виїмкового стовпа визначена на рівні 1800 м.

В умовах слабометаморфізованих порід зміна кінематики посування лави (високі та змінні швидкості) суттєво впливає на силову взаємодію обладнання з робочим середовищем. Встановлення наведених закономірностей напружено-деформованого стану дозволяє приймати обґрунтовані інженерні рішення щодо вибору режимів експлуатації механізованих комплексів, що забезпечує зниження ризиків аварійних поломок машин та підвищення техніко-економічних показників відпрацювання лав.

Формування надійних підходів до експлуатації очисних комплексів можливе лише за умови глибокої інтеграції теоретичних моделей системи «машина – середовище» та результатів комплексного інструментального моніторингу безпосередньо у вибоях.

Перелік посилань

1. Дичковський, Р., Шаварський, Я., Саїк, П., Фальштинський, В., Лозинський, В., & Перерва, А. (2023). *Технологічні параметри концентрації процесів видобування вугілля з тонких пластів: монографія*. Журфонд.
2. Півняк, Г., Бешта, О., & Табаченко, М. (2013). *Традиційні та нетрадиційні системи енергозабезпечення урбанізованих і промислових територій України: монографія* (Г. Півняк, Ред.). Національний гірничий університет.
3. Шашенко, О.М., Сдвіжкова, О.О., & Гапєєв, С.М. (2008). *Деформованість та міцність масивів гірських порід: монографія*. Національний гірничий університет.
4. Khalymendyk, Y., & Baryshnikov, A. (2016). Substantiation of cable bolts parameters for supporting mine workings in conditions of laminated rocks. *Mining of Mineral Deposits*, *10*(1), 9–15. https://doi.org/10.15407/mining10.01.009
5. Skipochka, S., Krukovskyi, O., & Serhiienko, V. (2025). Classification and rating of the main factors influenced on the mine working stability in uranium mines. *Geo-Technical Mechanics, 173*, 22–37. https://doi.org/10.15407/geotm2025.173.022

6. Khomenko, O., Kononenko, M., & Netecha, M. (2016). Industrial research into massif zonal fragmentation around mine workings. *Mining of Mineral Deposits, 10*(1), 50–56. http://dx.doi.org/10.15407/mining10.01.05
7. Табаченко, М.М., Дичковський, Р.О., & Фальштинськький, В.С. (2012). *Довідник з гірничого обладнання дільниць вугільних і сланцевих шахт: навч. посібник*. Національний гірничий університет.
8. Бондаренко, В., Медяник, В., & Буряк, С. (2024). До питань обґрунтування параметрів експлуатації шахтного очисного механізованого комплексу у зонах підвищеного гірського тиску. У *Topical aspects of modern scientific research* (с. 185–193). CPN Publishing Group.
9. Skipochka S., Krukovskyi O., Musiienko S., Serhiienko V. (2025). Study of stability of rocks beyond their strength limit under external local influences. *Geo-Technical Mechanics, 174*, 138–150. https://doi.org/10.15407/geotm2025.174.138
10. Kovalevska, I., Barabash, M., & Snihur, V. (2024). Development of a research methodology and analysis of the stress state of a parting under the Global science: prospects and innovations. *Proceedings of the 11th International scientific and practical conference* (p. 183–192). Cognum Publishing House.
11. Круковський, О.П., Пілюгин, В.І., & Демиденко, О.Г. (2025)–Ефективна система підготовки запасів при відпрацюванні високонавантажених лав шахт ПрАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ». *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки, 5*, 262–270. https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-30
12. Kovalevska, I., Barabash, M., & Snihur, V. (2018). Development of a research methodology and analysis of the stress state of a parting under the joint and downward mining of coal seams. *Mining of Mineral Deposits*, *12*(1), 76–84. https://doi.org/10.15407/mining12.01.076

ABSTRACT

Purpose. Justification of optimal operating parameters for mining complexes (face advance rate and maximum permitted downtime) by assessing the force interaction within the ‘mechanized support – rock mass’ system to prevent critical equipment overloads

The methods. A comprehensive approach was adopted, based on the analysis of in-mine instrumental observations and mathematical modelling of the stress-strain state using the MODEL software package (following the methodology of Prof. Savostyanov). The calculation scheme takes into account the kinematic characteristics of the machine (in particular, the shearer’s working width of 0.73 m), the resistance parameters of the hydraulic support system, and the physical and mechanical properties of the rock masses in the Western Donbas.

Findings. The mechanism by which external loads are generated on mining equipment as it moves away from the open-cut furnace has been investigated. It has been demonstrated that the first seven days of downtime at the working face constitute a critical period, during which intensive roof subsidence occurs, the working compliance of the hydraulic props is exhausted, and the support system transitions to a hazardous operating mode on a rigid base. A minimum rational advance rate (kinematic parameter) for the working face of over 4.8 m/day has been justified, which significantly reduces the force load on the sections. Taking geomechanical factors into account, it has been determined that the optimal half-span length of the longwall is 87.5 m, whilst the length of the cut-off pillar should be 1,800 m.

The originality. Patterns have been identified in the redistribution of bearing pressure and the force reaction of mechanized support, depending on the rate of face advance. It has been established that the load dynamics on the steel structures exhibit a distinctly non-linear character during operational downtime, with maximum stress concentration occurring near the face plane (in the pinch zone).

Practical implementation. The proposed kinematic and spatial parameters of the mining system make it possible to optimize the operating modes of the mining complexes. Their implementation will prevent critical overloads on the steel support structures, extend the service life of the equipment and improve the technical and economic efficiency of coal seam mining.

Keywords: *mechanized support, force interaction, load, kinematic parameters, face advance rate, process downtime, stress-strain state.*

дата першого надходження статті до видання	13.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	17.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

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