

М.І. СТУПНІК, В.О. КАЛІНІЧЕНКО, О.В. КАЛІНІЧЕНКО, д-ри техн. наук, професори,
О.Л. ШЕПЕЛЬ, І.П. КУШНЕРЬОВ, М.Б. ФЕДЬКО, кандидати техн. наук, доценти
Криворізький національний університет
В.В. ПІЛЬЧИК, голов. інж., ДП «СхідГЗК»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ВІДКРИТО-ПІДЗЕМНОГО ВИДОБУТКУ З УТИЛІЗАЦІЄЮ ГІРНИЧИХ ВІДХОДІВ У ВИРОБЛЕНОМУ ПРОСТОРІ ШАХТ ТА КАР'ЄРІВ

Мета. Метою даної роботи є дослідження напружень та деформацій конструктивних елементів гірничих технологій при переході з відкритого на підземний спосіб видобутку корисних копалин.

Методи дослідження. Використані наступні методи: аналіз актуальних досліджень напружено-деформованого стану масиву в зонах контакту відкритих робіт з підземними, математичне моделювання технологічної системи «кар'єр – шахта», дослідження варіацій напружень і деформацій в залежності від стадії відпрацювання родовища; стандартні методи аналізу та оброблення результатів досліджень.

Наукова новизна. Встановлені нові закономірності зміни напружено деформованого стану масиву під час різних технологічних фаз переходу з відкритого на підземний спосіб видобутку. Встановлені характер і параметри розвитку напружень та деформацій масиву в залежності від черговості відпрацювання камер, потужності, міцності та кута падіння покладу.

Практична значимість. Створена методика дослідження напружено-деформованого стану масиву при поєднанні з технологій відкритого та підземного видобутку залізорудної сировини, інтегрована з математичним моделюванням комбінованих масивів для візуалізації завдань та розв'язання задач поставлених в роботі. На базі встановлених основних характеристик напружено-деформованого стану масиву під дном кар'єру запропонована технологія комбінованого відпрацювання покладу з переходом на підземний спосіб видобутку. Після переходу на підземний видобуток магнетитових кварцитів запропоновано технологію з утилізацією пустих порід у виробленому просторі підземних очисних камер та на дні кар'єру.

Результати. Виконаними аналітичними дослідженнями напружено-деформованого стану гірського масиву встановлено, що застосування технологій з закладкою виробленого простору дозволяє стабілізувати рівень напружень та деформацій в гірському масиві. Встановлено, що залежність величини максимальних вертикальних зсувів елементів борта кар'єру від глибини розробки добре описується логарифмічною функцією. Доведено, що утилізація відходів гірничого виробництва в виробленому просторі шахт та кар'єрів дозволяє зменшити негативний вплив гірничодобувних підприємств на довкілля Криворізького залізорудного басейну.

Ключові слова: руда, відкрито-підземний видобуток, аналітичні дослідження, напруження, деформації, утилізація відходів, екологія.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-3-9

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Прогрес у технологіях видобутку корисних копалин та жорсткі екологічні вимоги до гірничодобувної промисловості в умовах збільшення глибини відпрацювання покладів і погіршення гірничо-геологічних характеристик родовищ призвели до пошуку нових способів відпрацювання покладів залізних руд в Криворізькому залізорудному басейні.

Геомеханічний стан масиву гірських порід є вирішальним фактором, що обумовлює вибір способу та технологій ведення гірничих робіт. Визначення характеру напружено-деформованого стану і величин діючих напружень в гірському масиві дозволяє сформулювати якісну і кількісну картину рівня придатності застосовуваних технологій та їх здатності до модернізації у майбутньому.

Параметри геомеханічного стану масиву є ключовим елементом досліджень для розробки проектних рішень по зміні технологій видобутку корисних копалин. Мова йде перш за все про трансформацію відкритого видобутку магнетитових кварцитів шляхом абсорбції елементів технології підземного видобутку залізорудної сировини. У цьому контексті контроль зсувів гірських порід в зонах підробки кар'єрних полів підземними гірничими виробками є однією з найважливіших проблем, яка частково вирішується аналітичними дослідженнями геомеханічного стану гірського масиву [1, 2].

Аналіз досліджень і публікацій. Формування виробленого простору при підземному відпрацюванні рудних покладів супроводжується порушенням умовної рівноваги сил в масиві. Налягаюча товща гірських порід має потенційну енергію за рахунок сил гравітації.

Очевидно, що розподіл цієї енергії в навколишньому масиві за вертикальним, горизонтальним і тангенціальним напрямками визначається розподілом силового поля, характер якого впливає на величини відповідних напружень.

При цьому в навколишньому масиві виникають сили розтягнення і стискання, які формують напруження, що відчутно проявляють себе в зоні утворення очисної виробки.

Вивченням гірничого тиску та фізичних процесів, що відбуваються в гірському масиві при відпрацюванні твердих корисних копалин, займаються відповідно давно фахівці багатьох країн. Значний внесок у теорію гірничого тиску та фізичних процесів у гірському масиві в різний час зробили Булат А.Ф. [8], Несмашний Є.О. [9], Parisean W.G. [12], Ritter W. [10], Talobre J.A. [11], Четверик М.С. [7], Цариковский В.В. [8] та багато інших учених, у тому числі і автори цієї роботи [1-6].

В той же час, на сьогодні практично відсутні дослідження напружено деформованого стану масиву при застосуванні екологічно безпечних технологій відкрито-підземного видобутку з розміщенням відходів гірничого виробництва в виробленому просторі шахт та кар'єрів.

Постановка задачі. Отже, метою представлених досліджень є вивчення напружено-деформованого стану масиву при трансформації відкритої технології розробки на відкрито-підземну з переміщенням відходів гірничого виробництва у вироблений простір шахт і кар'єрів.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання:

проведено аналіз існуючих варіантів переходу з видобутку корисних копалин відкритим способом на технології комбінованого відкрито-підземного та підземного видобутку;

удосконалено методику досліджень напружено-деформованого стану масиву в зоні переходу з технологій відкритого видобутку на технології відкрито-підземного видобутку залізорудної сировини;

досліджена ймовірність зсувів гірських порід та встановлено закономірності деформації підроблених підземними гірничими роботами кар'єрних полів;

встановлені закономірності зміни напружено-деформованого стану гірського масиву при переході на видобування магнетитових кварцитів камерними системами розробки з утилізацією відходів гірничого виробництва в виробленому просторі шахт і кар'єрів.

Викладення матеріалу та результати. Для дослідження напружено-деформованого стану гірського масиву при перехідних технологіях існує ряд розрахункових методів, користуючись якими можна розрахувати розподіл напружень навколо відкритих і підземних гірничих виробок та змодельовати поведінку масиву гірських порід в процесі технологічного видобутку корисних копалин.

Серед найбільш розповсюджених виділяють наступні методики: моделювання методом фотопружності, математичні методи, наприклад, вельми поширений метод кінцевих елементів (МКЕ) та інші.

У даній роботі розрахунок напружень і деформацій виконувався за допомогою програми «Ansys 22» [3-5].

Розрахунки виконувались для умов Криворізького залізрудного басейну, де видобуток магнетитових кварцитів здійснюється в кар'єрах п'яти гірничозбагачувальних комбінатів (ГЗК).

Враховуючи досягнення більшістю кар'єрів глибин 350 – 400 м, значне підвищення собівартості видобутку з пониженням глибини розробки та критичний стан екології в межах залізодобувного басейну, реальною перспективою є перехід на відкрито-підземний та подальший підземний видобуток магнетитових кварцитів.

Забезпечення стійкості та несучої здатності бортів кар'єрів – важлива умова безпечного відпрацювання родовищ відкрито-підземним способом. У зв'язку з цим для геомеханічного обґрунтування стійкості технологічних елементів відкрито-підземного комплексу проведено дослідження впливу технологічних параметрів на формування напружено-деформованого стану масиву для типового кар'єру Криворізького залізрудного басейну.

На рис. 1 представлено загальну вихідну розрахункову схему для варіанту з видобутком корисних копалин відкритим способом.

У подальшому дана розрахункова схема буде використовуватися для дослідження технологій переходу з відкритого способу відпрацювання покладів на технології комбінованого відкрито-підземного відпрацювання родовищ.

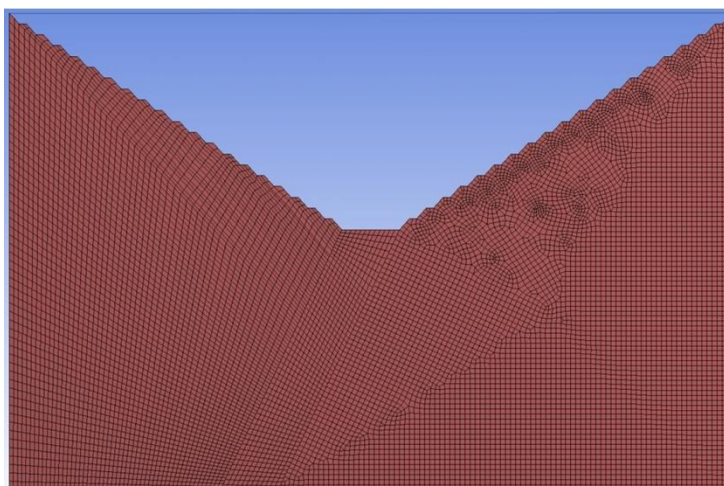


Рис. 1. Вихідна розрахункова схема видобутку корисних копалин відкритим способом

На рис. 2 представлено результати розрахунків величин деформацій (максимальних вертикальних зсувів) елементів кар'єру.

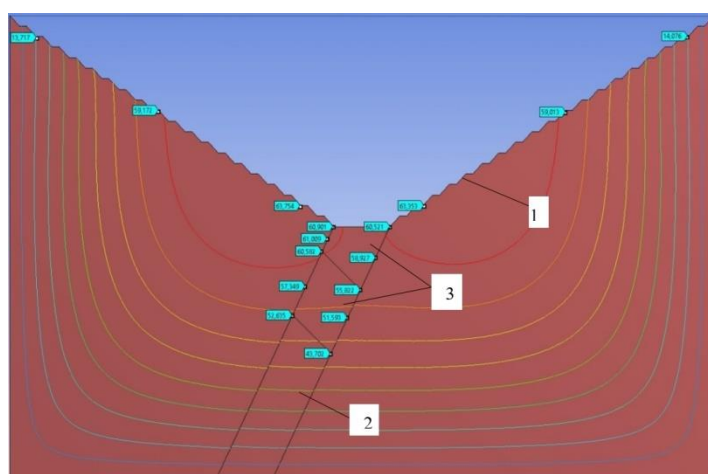


Рис. 2. Результати розрахунків величини деформацій гірського масиву при видобутку корисних копалин відкритим способом: 1 – контури кар'єру; 2 – рудний поклад; 3 – контур майбутніх камер I та II черги

Результати розрахунків величин напружень і деформації (максимальних вертикальних зсувів) у гірському масиві дають можливість встановити наступне.

Величина максимальних вертикальних зсувів борта кар'єру на його уступах збільшується з поглибленням кар'єру з 13...14 мм на верхніх горизонтах (уступах) на глибинах 30...45 м від денної поверхні до 60...63 мм на нижніх уступах на глибинах 270...300 м на дні відпрацьованого кар'єру.

Залежність величини максимальних вертикальних зсувів елементів борта кар'єру (уступів) від глибини розташування досліджуваної ділянки від денної поверхні представлена на рис. 3.

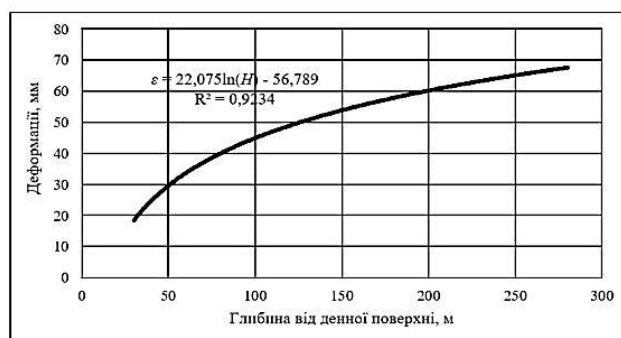


Рис. 3. Залежність величини максимальних вертикальних зсувів елементів борта кар'єру від глибини розробки

Для зручності використання представлена залежність апроксимується наступним чином

$$\varepsilon = 22,075 \ln(H) - 56,789;$$

$$R^2 = 0,9234,$$

де ε – величина максимальних вертикальних зсувів борта кар'єру, мм; H – глибина розташування горизонту (уступу) від денної поверхні, м; R – достовірність апроксимації, долі од.

Згідно виконаних досліджень величина напружень в гірському масиві під дном кар'єру збільшується від денної поверхні на дні кар'єру вглиб гірського масиву. Ця закономірність підтверджується відомими дослідженнями, які були виконані для аналогічних умов іншими науковцями і практиками. Величина похибки не перевищує 12-15%.

Величина напружень коливається від 0,7...1,2 МПа на дні кар'єру до 4,6...4,9 МПа під дном кар'єру на глибині розташування майбутніх підземних очисних камер.

Встановлені дослідженнями залежності коректно описуються експоненційною функцією виду

$$\sigma_1 = 1,0778 e^{0,0088h};$$

$$R^2 = 0,9663,$$

де σ_1 – величина максимальних напружень в гірському масиві, МПа; h – відстань розташування майбутніх підземних камер від дна кар'єру, м; R – достовірність апроксимації, долі од.

На базі встановлених основних характеристик напружено-деформованого стану масиву під дном кар'єру запропонована технологія комбінованого відпрацювання покладу з переходом на підземний спосіб видобутку. Суть технології полягає в наступному.

В першу чергу відпрацьовують камеру умовної другої черги по вертикалі (1) під прикриттям стелини, роль якої виконує камера умовної першої черги (2), яка розташована вище, рис. 4.

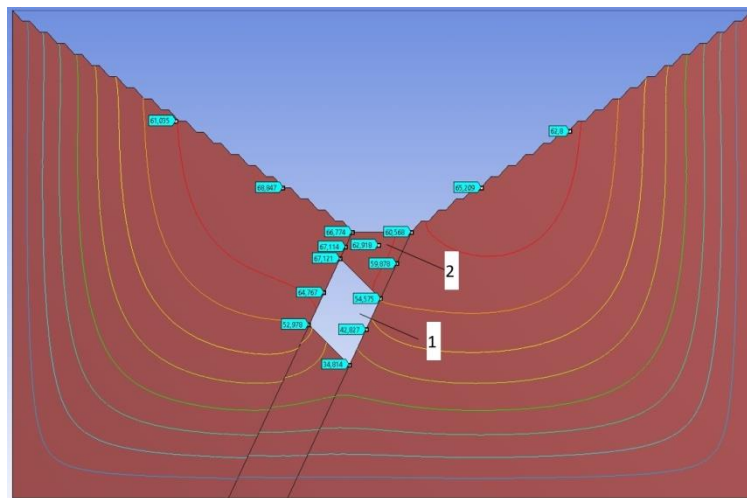


Рис. 4. Розподіл ізоліній деформацій масиву в процесі відпрацювання камери умовної другої черги

На рис. 4 представлено розподіл ізоліній деформацій масиву в процесі відпрацювання камери умовної другої черги

Аналіз результатів досліджень дає підґрунтя для констатації, що після вилучення запасів камери другої черги спостерігається збільшення величини деформації гірського масиву.

Деформації фіксувались в контрольних точках масиву. Так, в контрольній точці на рівні середніх (по вертикалі) уступів кар'єру величина деформацій збільшилась по висячому боку з 59,2 мм до 61,1 мм, а на днищі кар'єру з 60,9 мм до 66,8 мм. В лежачому боку це збільшення склало відповідно з 59,0 мм до 62,8 мм та з 60,5 мм до 60,6 мм. Такі величини практично не впливають на загальний характер деформацій бортів кар'єру.

Після повного відпрацювання очисної камери другої черги (1) і випуску із неї видобутої руди очисний простір заповнюють твердіючою закладкою.

В подальшому, після повного затвердіння закладної суміші, починають відпрацювання висчерпаної камери умовної першої черги (2), рис. 5.

Після її повного відпрацювання очисний простір готовий для заповнення відпрацьованого обсягу очисної камери (2) пустими породами від проходки виробок та інших відходів гірничого та переробного виробництва.

Крім того, камера умовної другої черги (1) буде виконувати роль штучної стелини при відпрацюванні нижчерозташованої очисної камери умовної третьої черги (3), рис.5.

На рис. 5 представлено розподіл ізоліній деформацій масиву в процесі відпрацювання камери умовної третьої черги (по вертикалі) під прикриттям штучного цілика твердіючої закладки камери другої черги на етапі заповнення умовної камери першої черги пустими породами.

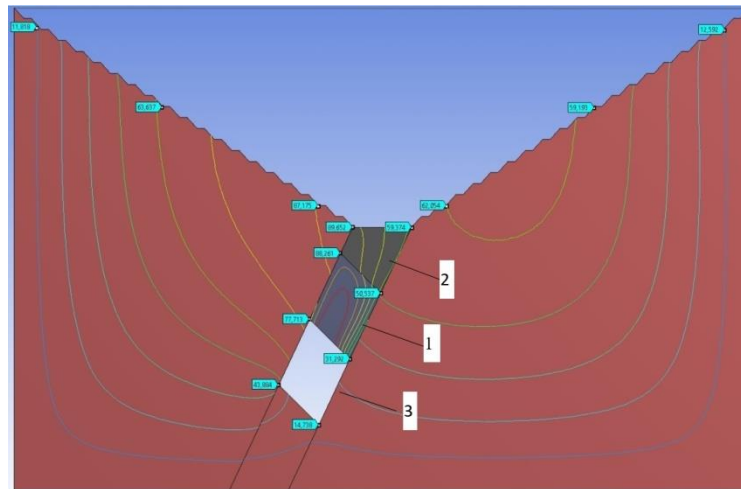


Рис. 5. Розподіл ізоліній деформацій масиву в процесі відпрацювання камери умовної третьої черги під прикриттям штучного цілика твердіючої закладки на етапі заповнення умовної камери першої черги пустими породами від проходки виробок; 1, 2, 3 – відповідно камери другої, першої та третьої черги

Аналіз результатів досліджень дозволив виявити наступні закономірності. Величина деформацій (вертикальних зміщень) на рівні середніх уступів кар'єру у висячому боці збільшилась з 61,1 мм у попередньому варіанті до 67,7 мм, а на рівні дна кар'єру з 66,8 мм до 89,7 мм. В лежачому боці аналогічні зміщення змінилися відповідно 62,8 мм до 59,2 мм та з 60,6 мм до 59,4 мм.

Таким чином, якщо в висячому боці спостерігалось незначне збільшення вертикальних зміщень масиву в контрольних точках, то в лежачому боці ми мали деяке зниження загальних деформацій за рахунок розвантаження.

На рис. 6 представлено розподіл ізоліній деформацій масиву в процесі наступного етапу утилізації відходів гірничодобувного виробництва безпосередньо в контурі кар'єру над ділянкою переходу з відкритих на підземні роботи.

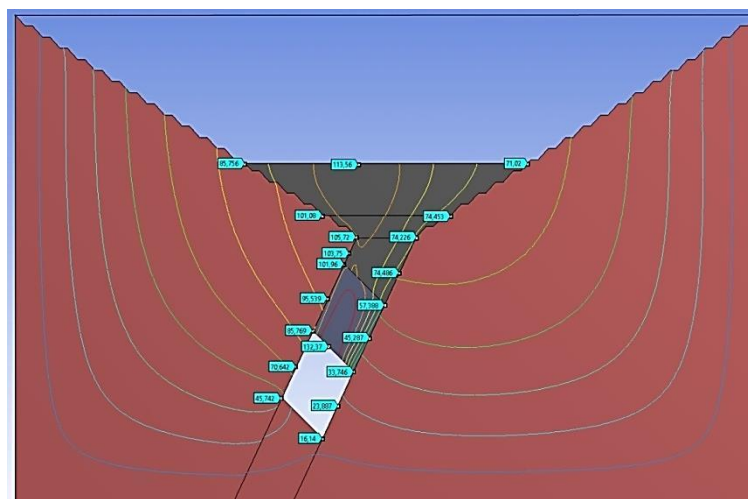


Рис. 6. Розподіл ізоліній деформацій масиву в процесі здійснення технологічного етапу утилізації відходів гірничодобувного виробництва в чаші кар'єру над ділянкою переходу з відкритих на підземні роботи

Аналіз отриманих результатів дав змогу стверджувати наступне.

Величина вертикальних зміщень масиву в контрольних точках в висячому боці на рівні середніх уступів деформації поверхні збільшилися з 67,7 мм у попередньому варіанті до 85,8 мм. На рівні дна кар'єру відповідні зміщення збільшилась з 89,7 мм до 105,7 мм.

В лежачому боці аналогічні зміщення збільшилися з 59,2 мм до 71 мм та з 59,4 мм до 74,2 мм відповідно.

Додатково нами були досліджені деформації штучного цілика твердіючої закладки при заповненні верхньої камери пустими породами і для варіанту з подальшим заповненням дна кар'єру відходами гірничодобувної промисловості.

Отримані результати дозволили зробити наступні висновки.

Величина деформації штучної стеліни при відпрацюванні камери третьої черги і при заповненні камери першої черги пустими породами у висячому боці склала 77,7 мм, в лежачому боці – 31,3 мм. При подальшому заповненні кар'єру пустими породами ці деформації дещо збільшуються і складають відповідно в висячому боці – 85,8 мм а в лежачому боці штучної стеліни – 33,7 мм.

На нашу думку, таке збільшення деформацій штучної стеліни є допустимим і не впливає на безпеку відпрацювання камер третьої черги під прикриттям штучного цілика твердіючої закладки.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Виконаними дослідженнями встановлено, що величина максимальних вертикальних зсувів борта кар'єру на його уступах в контрольних точках збільшується з глибиною кар'єру з 59,2 мм на середніх горизонтах (уступах) до 61...62,8 мм на дні кар'єру на глибині 300 м від поверхні.

Після переходу на підземний видобуток магнетитових кварцитів запропоновано технологію з утилізацією пустих порід у виробленому просторі підземних очисних камер та на дні кар'єру. При цьому деформації (вертикальні зміщення) масиву дещо збільшуються. Так, при заповненні камери першої черги відходами гірничодобувного або збагачувального виробництва величина деформацій досягла величини 89,7 мм, а при подальшому заповненні чаші кар'єру величина деформацій досягла величини 105,7 мм.

В той же час величина деформації штучної стеліни при відпрацюванні камери третьої черги та заповненні камери першої черги пустими породами склала 77,7 мм, а при подальшому заповненні кар'єру пустими породами ці деформації дещо збільшуються і складають відповідно 85,8 мм.

Таке збільшення деформацій штучної стеліни є допустимим і не впливає на безпеку відпрацювання камер третьої черги під прикриттям штучного цілика твердіючої закладки.

Встановлено, що залежність величини максимальних вертикальних зсувів елементів борта кар'єру від глибини розробки добре описується логарифмічною функцією.

Результати розрахунків величини напружень в гірському масиві дали можливість встановити, що величина напружень в гірському масиві під дном кар'єру збільшується від денної поверхні на дні кар'єру вглиб гірського масиву. Встановлено, що величина напружень коливається від 0,7...1,2 МПа на дні кар'єру до 4,6...4,9 МПа під дном кар'єру на глибині розташування майбутніх підземних очисних камер.

Встановлені закономірності добре підтверджується відомими дослідженнями, які були виконані для аналогічних умов іншими науковцями і практиками. Величина похибки не перевищує 12-15%.

Це дає змогу стверджувати, що представлена методика досліджень є надійною і може бути використана для подальших досліджень.

Отже, запропонована технологія з утилізацією відходів гірничого виробництва в виробленому просторі шахт та кар'єрів є технічно коректною та дозволяє зменшити негативний вплив гірничодобувних підприємств на екологічний стан Криворізького залізничного басейну.

Список літератури

1. **Калініченко О.В.** Удосконалення концепції управління напружено-деформованим станом гірського масиву при підземних гірничих роботах / Сборник научных трудов «Научно-исследовательского горнорудного института». Кривой Рог, 2015. С. 104–111.
2. **Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В.** Економічна оцінка ризиків можливих геомеханічних порушень денної поверхні в полях шахт Кривбасу / Науковий вісник Національного гірничого університету. Дніпропетровськ, 2012. №6(132). С. 126–130.
3. **Ступнік М.І., Калініченко В.О., Музика І.О., Калініченко О.В.** [та ін.]. Інформаційні технології – складова процесів моніторингу та керування напружено-деформованим станом масиву / Розробка родовищ: щорічний наук.-техн. зб. Дніпропетровськ: Літограф, 2015. С. 175–181.
4. **Stupnik N., Kalinichenko V., Kalinichenko E., Muzika I., Fed'ko M., Pis'menniy S.** The research of strain-stress

state of magnetite quartzite deposit massif in the condition of mine "Gigant-Gliboka" of central iron ore enrichment works (CGOK) / Metallurgical and mining industry, 2015. No.7. P. 377–382.

5. **Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В.** Дослідження напружено-деформованого стану гірського масиву покладу магнетитових кварцитів в умовах шахти «Гігант-Глибока» ПАТ «ЦГЗК» / Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost', 2015. №5. С. 85–88.

6. **Stupnik N., Kalinichenko V.** Parameters of shear zone and methods of their conditions control at underground mining of steep-dipping iron ore deposits in Kryvyi Rig basin / Geomechanical Processes During Underground Mining. School of Underground Mining. Dnipropetrovsk, 2012. P. 15–19.

7. **Четверик М.С., Бубнова О.А., Бабій К.В., Батур М.О.** Швидкість розвитку деформацій у підробленому гірському масиві при підземному вийманні корисних копалин на основі маркшейдерських спостережень / Геотехническая механика. Днепропетровск: НАН ИГТМ, 2016. №130. С. 3–12.

8. **Цариковский В.В., Булат А.Ф., Приходченко В.Л.** Контроль процессов разрушения руд Кривбасса геофизическими методами для повышения эффективности их отработки / Проблемы горнодобывающей промышленности металлургического комплекса Украины. Кривой Рог: НИГРИ, 1998. С. 21–24.

9. **Несмашный Е.А., Ткаченко Г.И., Болотников А.В.** Обзор технологий и технических средств для геомеханического мониторинга состояния бортов карьеров и отвалов / Разработка рудных месторождений. Кривой Рог, 2010. Вып. 93. С. 89–94.

10. **Ritter W.** Die statish der Tunnelgewolbe. Berlin, 1979. 346 p.

11. **Talobre J.A.** La mécanique des roches. Paris: Dunod, 1967. 443 p.

12. **Parisean W.G.** Estimation of support load requirements of underground mine openings by computer simulation of mining sequence / Truns. foc. MiningEng. AJME, 1987. Vol. 262. №2 (june). P. 100–109.

Рукопис подано до редакції 21.03.24

УДК 681.518

М. В. КІЯНОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.,

В. А. ПІКІЛЬНЯК, В. П. НЕЧАСВ, кандидати техн. наук, доценти,

Н. М. КІЯНОВСЬКА, канд. пед. наук, доц.

Криворізький національний університет

ЛОГІКА ВИБОРУ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ТРАЄКТОРІЙ НАВЧАННЯ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ СПЕЦІАЛЬНОСТІ "ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА" ЧЕРЕЗ ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗВИТКУ ФАХОВИХ СЕРЕДОВИЩ

Мета. Головною метою проведеного дослідження було вирішення задач створення логіки і алгоритму вибору індивідуальних траєкторій навчання здобувачів вищої освіти спеціальності "прикладна механіка" на етапі мінімальних власних знань, досвіду здобувачів вищої освіти у обраній спеціальності.

Методи дослідження. Для вирішення цього завдання використано методи дослідження наявних трендів (закономірностей) змін сучасного машинобудування у відповідності до задач інноваційного розвитку держави та світових трендів розвитку організаційних, змістовних, структурних засад машинобудування в умовах використання прогресивних інформаційних технологій, автоматизованих засобів інжинірингу, ресурсів новітніх інформаційних середовищ.

Наукова новизна. Спеціальність «Прикладна механіка» інтегрує фахові напрямки, які є найбільш актуальними для сучасного машинобудування у форматах сучасних технологій і програмних задач вищої освіти. На основі проведеного дослідження встановлені результати створення та розвитку фахових середовищ з різним складом професійних компетенцій, які змінюють логіку та алгоритм прийняття рішення щодо вибору індивідуальної траєкторії навчання.

Практична значимість. Мета дослідження досягається шляхом поєднання нормативних вимог до рівня і змісту вищої освіти з врахуванням особливостей новітніх форм фахових середовищ сучасного машинобудування для працевлаштування і прискореної адаптації фахівців спеціальності «Прикладна механіка». Визначено орієнтири для ефективного спрямування освітніх зусиль на отримання відповідних компетенцій в кожній сфері індивідуальних траєкторій навчання.

Результати. Виконана класифікація видів і структури фахових середовищ сучасного машинобудування. Встановлено склад професійних компетенцій, що забезпечують підготовку фахівців для кожної структурної частини фахового середовища. Запропонована логіка та алгоритм прийняття рішення щодо вибору індивідуальної траєкторії навчання, які полягають у поєднанні регламентних вимог до рівня і змісту освіти з закономірностями зміни об'єкту навчання.

Ключові слова: траєкторії навчання, фахове середовище, професійні компетенції, здобувачі вищої освіти, спеціальність «Прикладна механіка», машинобудування

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-9-15