

ІННОВАЦІЇ, ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГІЙ ТА КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ НАУКОВИХ РОЗРОБОК

УДК 622.22.553.4:519.85

DOI: 10.30929/2074-1537.2019.1.85-103

ОПТИМІЗАЦІЯ СТІЙКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІДСИСТЕМ ОЧИСНОГО ВИБОЮ

А. О. Хорольський, В. Г. Гріньов

Інститут фізики гірничих процесів НАН України
вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, 49005, Україна.
E-mail: khorolskiyaa@ukr.net

О. Р. Мамайкін

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна.
E-mail: mamaikin@yahoo.com

Запропоновано новий підхід щодо оцінки стійкості функціонування виробничих підсистем в очисному вибої вугільних шахт. Для вирішення задачі застосовано комплексний підхід, який базується на впровадженні моделі стійкості виробничих зв'язків в очисному вибої, а також критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності для розробки рекомендацій щодо підвищення техніко-економічних показників. Встановлено, що стійкість функціонування підсистем в очисному вибої визначається співвідношенням потоків вхідних ресурсів у вигляді підготовленого фронту очисних робіт, засобів механізації, технологічних параметрів та вихідних – у вигляді кінцевого рівня продуктивності, собівартості видобутку та ін. Особливу увагу приділено розробці програмного забезпечення для впровадження описаних підходів у виробництво.

Ключові слова: сценарій виробництва; критерій прийняття рішень; раціональний рівень виробництва; оптимізація; програмне забезпечення.

ОПТИМІЗАЦІЯ УСТОЙЧИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПОДСИСТЕМ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

А. А. Хорольський, В. Г. Гринев

Інститут фізики горных процессов НАН Украины
ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, 49005, Украина.
E-mail: khorolskiyaa@ukr.net

А. Р. Мамайкин

Национальный технический университет «Днепро́вская политехника»
просп. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, 49005, Украина.
E-mail: mamaikin@yahoo.com

Предложен новый подход к оценке устойчивости функционирования производственных подсистем в очистном забое угольных шахт. Для решения задачи применен комплексный подход, основанный на внедрении модели устойчивости производственных связей в очистном забое, а также критериев принятия решений в условиях неопределенности для разработки рекомендаций по повышению технико-экономических показателей. Установлено, что устойчивость функционирования подсистем в очистном забое определяется соотношением потоков входящих ресурсов в виде подготовленного фронта очистных работ, средств механизации

ции, технологических параметров и выходных – в виде конечного уровня производительности, себестоимости добычи и др. Особое внимание уделено разработке программного обеспечения для внедрения описанных подходов в производство.

Ключевые слова: сценарий производства; критерий принятия решений; рациональный уровень производства; оптимизация; программное обеспечение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В умовах ринкових відносин, незалежно від типу підприємства та галузі економіки, для успішного функціонування необхідно забезпечити стійкість виробництва. Під стійкістю виробництва розуміють здатність системи стабільно відтворювати заданий рівень продуктивності при заданих умовах. Тому, на стадії проектування необхідно відповісти на декілька питань – Який раціональний рівень виробництва? Чи є потреба у збільшенні продуктивності? Яким чином можна оптимізувати параметри функціонування? Саме вирішенню цих питань присвячено дане дослідження. Встановлення раціонального рівня виробництва дозволяє отримати ряд переваг:

- по-перше, заощадити кошти на придбання засобів механізації адже, якщо відомо, що прийнятний рівень добового навантаження на вибій знаходиться на рівні 1200–1500 т/доб., то недоцільно витратити кошти на придбання механізованого комплексу з продуктивністю 5000 т/доб.;

- по-друге, гармонізувати підготовчі, очисні, допоміжні процеси у просторі, адже, окрім видобутку необхідно забезпечити і транспортування, збагачення вугілля;

- по-третє, зменшити простої, це досягається урахуванням технологічних та гірничо-геологічних умов виймальної ділянки.

Ідея полягає у наступному, що достовірно передбачити кінцевий рівень виробничих потужностей неможливо, фактично, процес виробництва представляє «гру з природою» – з одного боку власник підприємства, який хоче отримати вигоду при найменших витратах, а з іншого боку – невизначеність, тобто невідомо, яка вірогідність виникнення несприятливих сценаріїв виробництва. Для забезпечення стійкості виробництва необхідно визначити прийнятний рівень добового навантаження на вибій для кожного окремого випадку. Це досягається за рахунок застосування класичних критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності, тобто, здійснити перехід від невизначеності, коли відомі лише стани природи (сценарії виробництва) та діапазони зміни параметрів до оцінки реальних ризиків.

У запропонованій роботі наведено модель оцінки стійкості функціонування технологічних схем. Таким чином, обґрунтування раціонального рівня продуктивності дозволяє знайти баланс між потоками вхідних ресурсів, які відображають не тільки рівень механізації, технологічні параметри, але і темпами підготовчих та допоміжних робіт та вихідних ресурсів у вигляді продуктивності та витрат. Застосування методів дискретної математики та алгоритмів оптимізації на мережах та графах, а також розроблене програмне забезпечення дозволяють успішно вирішувати поставлені задачі та впроваджувати їх у виробництво. Отже, розробка наукових основ, щодо управління стійкістю функціональних систем в очисних вибоях є актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Вирішенню проблем пов'язаних із забезпеченням стійкості виробництва присвячені роботи наступних дослідників: Margaret E. Slade [1], E. Topal [2], A.M. Newman [3], Jian-guo Li [4], C Meng [5]. В Україні дослідженню даних проблем присвячені праці А.В. Мерзлікіна [6], В.В. Назимко [7], Федорова В.М. [8]. Слід зазначити, що кожна із запропонованих робіт [1–8] незважаючи на свої переваги підходить до управління стійкістю виробництвом однобоко, вирішується лише окрема задача, яка може полягати у мінімізації собівартості продукції в залежності від умов експлуатації [1], забезпеченні надійності функціонування підсистем видобутку, транспорту та ін. [2], зменшенні простоїв [3], скороченні часових витрат на обслуговування обладнання шляхом запровадження систем автоматизованого контролю [4], прогнозуванні розвитку робіт у часі [5], мінімізації ризиків невиконання виробничого плану [6–8]. Отже, із наведеного аналізу можна зробити припущення, що стійкість виробництва досягається при наступних умовах:

- по-перше, необхідно забезпечити узгодженість між системами видобутку, підтримки виробленого простору, транспорту вугілля; адже недоцільно укомплектовувати очисний вибій комбайном з хвилинною швидкістю 10–15 м/хв., якщо гірничо-геологічні умови не дозволяють розвинути швидкість до 5 м/хв.;

- по-друге, необхідно на стадії проектування визначити граничні показники навантаження на очисний вибій; виходячи із цього будуть обиратись засоби механізації, організовуватись основні та допоміжні операції;

- по-третє, врахувати в просторі та часі узгодженість між очисними, допоміжними процесами; адже для того, щоб вилучити запаси вугілля із шахтного поля спочатку необхідно підготувати їх, тобто, темпи прохідницьких робіт повинні бути узгодженими з темпами очисних робіт;

- по-четверте, мінімізувати ризики виробництва, тобто, мінімізувати збитки в разі невиконання плану робіт та максимізувати прибуток у разі виконання;

- по-п'яте, оптимізувати технологічні процеси, це досягається на основі застосування методів дискретної математики на графах та мережевих моделях, адже недоцільно впроваджувати рішення, навіть, якщо воно дозволяє збільшити продуктивність на 30% при одночасному збільшенні собівартості у 2 рази.

Для вирішення цих задач може бути застосований підхід запропонований В.Г. Грін'ювим [9], коли в процес планування вводиться визначення «області раціонального проектування», тобто незалежно від умов експлуатації та параметрів родовища існує область, яка визначається сукупністю технологічних, економічних, організаційних параметрів, котрі дозволяють забезпечити мінімально прийнятний, із умов беззбитковості, рівень продуктивності. Таким чином, створюється ефект прогнозування розвитку робіт у просторі і часі.

Отже, у відповідності до розглянутих умов можна зробити припущення, що стійкість виробництва досягається відтворенням достовірно заданих показників продуктивності шляхом узгодженості у часі і просторі основних та допоміжних операцій при мінімальних ризиках. При цьому необхідно, щоб запропоноване рішення було оптимальним, тобто параметр, який характеризує процес видобутку, транспортування та ін. повинен бути найкращим (найменшим) з поміж можливих.

Мета роботи полягає у розробці наукових основ забезпечення стійкості функціональних підсистем в очисному вибої за рахунок мінімізації ризиків виробництва та прогнозування показників продуктивності. Для цього необхідно вирішити ряд задач:

- запропонувати підхід, щодо мінімізації ризиків пов'язаних з вибором засобів механізації;
- розробити просторово-часову модель, яка враховує розвиток та концентрацію робіт в очисному вибої та дозволяє прогнозувати показники продуктивності;
- запропонувати інструменти для оптимізації технологічних процесів та навести системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесів проектування.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. *Методи дослідження.* Враховуючи викладене, ефективність залучення у відпрацювання якої-небудь ділянки шахтного поля, або консервація для подальшої корпоративного відпрацювання (особливо у випадку передбачуваного закриття шахти) може бути представлена наступним функціональним співвідношенням

$$F(\alpha, \beta, \gamma) \rightarrow \max, \text{ при } 0 \leq d_{it} \leq P_i, \quad (1)$$

де $F(\alpha, \beta, \gamma)$ – функціонал, що характеризує ефективність вилучення запасів; α – важко прогнозовані некеровані характеристики, пов'язані із змінами потужності шахти (змінний попит); β – прогнозовані некеровані характеристики, пов'язані з гірничо-геологічними умовами відпрацювання; γ – вектор параметрів, які оптимізуються; d_{it} – обсяг видобутку i -ю лавою в t -й рік прогнозування; P_i – максимальний обсяг видобутку i -ю лавою, обмежений якісними характеристиками гірничої маси і межею, пов'язаною з провітрюванням гірничих робіт.

Якщо технічні аспекти прогнозуються досить надійно, то визначення параметрів α , β і γ умовах змінної потужності і нестабільності фінансових субсидій досить проблематично. Облік впливу гірничо-геологічних характеристик β докладно висвітлено в літературі [10, 11]. Величина коефіцієнта γ може визначатися залежно від ступеня відповідності виїмкової техніки умовам лави і ефективності видобутку, яка визначається якістю гірничої маси, витратами на 1 т і організацією ведення робіт [12].

Відомі труднощі пов'язані з визначенням коефіцієнта α . Тут важливий рейтинг шахти по її віднесенню до перспективних або малоперспективних. Від цього залежать можливості інвестування, пов'язані з оснащенням лав і відповідний календарний план відпрацювання нових ділянок поля. Фактично цільова функція являє собою сумарну величину диференціальної гірничої ренти, найважливішою складовою частиною якої є R_j собівартість 1 т вугілля. Зазначені вище міркування слугували основою використання динамічної імітаційної моделі управління руху запасів у шахтному полі.

Оскільки значення змінної d_{it} визначаються технологією та організацією видобутку в конкретній лаві, тому що оптимізуються параметри x_i можуть змінюватися лише в визначених межах. Для того щоб висловити функцію мети в кусково – лінійному вигляді, вибирається певна сітка значень навантаження на пласт x

$$F(x)_t = \sum_{j=1}^n R_j(x_{ij}), \quad (2)$$

$$d_{ij \min} = d_{1j} < d_{2j} < \dots < d_{pj} \equiv d_{ij \max} \Rightarrow$$

$$x_j = d_{1j}w_{1j} + d_{2j}w_{2j} + \dots + d_{kj}w_{kj} + \dots + d_{pj}w_{pj}. \quad (3)$$

Значення x_i визначаються як середньозважена величина де ваги w_{kj} задовольняють умові

$$\sum_{k=1}^p w_{kj} = 1, w_k = 0, k = 1, 2, \dots, p. \quad (4)$$

Далі невідома величина x_i визначається відповідно до (2), а умова (3) включається в систему обмежень моделі. Цільова функція приймає наступний вигляд

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p R_{ik} x_{ik} w_{ik} \rightarrow \max. \quad (5)$$

Необхідно відзначити, що рішення наведеної вище задачі стандартними методами оптимального програмування можливо лише в тих випадках, коли у вирішенні використовуються позитивні значення одного, максимум двох ваг для суміжних точок w_{kj} . У розглянутій моделі функція мети ввігнута (5) і підлягає максимізації, тому в апроксимуючій моделі вона має властивості ваг суміжних точок, і в принципі може бути вирішена методами програмування.

Таким чином, на основі співвідношень (1–5) можна сформулювати умову стійкості функціональних підсистем, згідно її стійкість досягається за рахунок максимального можливого, але узгодженого із допоміжними підсистемами, рівня продуктивності x_{ik} при мінімальній собівартості видобутку R_j та мінімальних коливаннях w_{kj} рівня продуктивності.

Для визначення достовірного та обґрунтованого рівня продуктивності x_{ik} необхідно скористатись підходами із галузі дослідження операцій – оцінити можливі варіанти за допомогою критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності. Нами застосовано критерії Вальда, Лапласа, Севіджа, максимакса, Гурвіца та узагальнений критерій Гурвіца. Кожен із критеріїв [13, 14] базується на передбаченні достовірності виникнення негативного або позитивного сценарію виробництва, при цьому, ще на стадії проектування інженер повинен визначитись, що для нього більш важливо – мінімізувати збитки або максимізувати прибуток. Далі буде наведено область застосування кожного критерію та методи обчислення на практиці.

Для R_j мінімізації собівартості необхідно представити структуру вхідних та вихідних потоків у вигляді мережевої моделі та оптимізувати за параметром «питома собівартість».

Для дослідження коливань рівня продуктивності w_{kj} нами застосовано імітаційне моделювання. Зупинимось на кожній задачі окремо.

Результати дослідження. Для проведення ефективних і достовірних досліджень немає необхідності розглядати всю систему цілком, а досить розглянути одну з її підсистем. Ця вихідна підсистема повинна бути простою, відносно самостій-

ІННОВАЦІЇ, ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГІЙ ТА КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ НАУКОВИХ РОЗРОБОК

ною, мати структуру, властиву всій системі, та характеризувати її поведінку в цілому. Цим вимогам задовольняє підсистема «видобувна ділянка», в якій відбуваються два основні процеси, що перебувають у постійній взаємодії: очисні роботи та роботи із приведення запасів видобувної ділянки в ступінь готових до вилучення. Підсистема «видобувна ділянка», прийнята до моделювання, включає також процеси з підвищення надійності виробок, що примикають, та дільничного транспорту. Зазначені основні процеси виконуються в міру інвестування та узгоджені між собою в часі та просторі. Підсистема «видобувна ділянка» має риси, властиві всій системі «виробничий процес видобування вугілля», але значно простіша.

Перед розглядом окремих варіантів досліджувану підсистему необхідно привести в стійкий стан. Найважливішою у цьому сенсі вимогою є відповідність темпів протікання всіх процесів визначеної інтенсивності проведення очисних робіт, тобто темпу видобутку.

У якості основних параметрів, що характеризують стійкість досліджуваної технологічної системи, розглядаються параметри інцидентів, тобто наявність запасів вугілля різного ступеню готовності до вилучення на даний відрізок планування розвитку гірничих робіт. До них належать: K_1 – параметр пропорційності, що показує, протягом якого часу можуть вестися очисні роботи при визначеній їх інтенсивності тільки за рахунок запасів, підготовлених прохідницькими ділянками в розглянутий момент часу t ; K_2 – параметр пропорційності, що показує, протягом якого часу можуть вестися прохідницькі роботи із середнім темпом тільки за рахунок розкритих запасів у розглянутий момент часу t ; K_3 – параметр пропорційності, що показує, протягом якого часу можуть вестися прохідницькі роботи із середнім темпом за рахунок запасів, що прирізають, або перерозподілені між шахтами (рис. 1).



Рисунок 1 – Схема руху запасів при змінних швидкостях посування лав

Якщо протягом якогось інтервалу часу t_1 в результаті прохідницьких робіт підготовлено до виїмки кількість запасів Z_1 (рис. 1), а видобувні роботи в цей же інтервал часу відпрацьовують кількість запасів Z_2 (причому $Z_1 > Z_2$), то накопичується певна величина запасів, готових до виїмки Z_3 . Це і є рівень запасів, величина якого на кінець інтервалу може бути визначена таким чином

$$Z_3 = (Z_1 - Z_2)t_1. \quad (6)$$

Тоді рівень запасів Z_{t_2} , підготовлених прохідницькими роботами, по відношенню до очисних робіт, на кінець наступного інтервалу часу t_2 буде дорівнювати рівню запасів, підготовлених прохідницькими роботами за попередній інтервал Z_3 , плюс різниця темпу ведення прохідницьких робіт z_n і темпу видобутку z_d за інтервал t_2

$$Z_{t_2} = Z_3 + (z_n - z_d)t_2. \quad (7)$$

При збереженні зазначеного співвідношення між темпом ведення прохідницьких робіт і темпом видобутку рівень запасів буде накопичуватися. Рівень запасів, готових до виїмки, є виробником по відношенню до очисних робіт, які по відношенню до цих запасів є споживачем. На кожній стадії переходу вугілля з корисної копалини в промисловий продукт (через розкриті, підготовлені та готові до виїмки запаси) можуть виникати і накопичуватися аналогічні рівні запасів. Різниця полягає лише в їх відношенні один до одного, як виробників і споживачів. Так, рівень запасів, підготовлених на стадії розкриття (рівень розкритих запасів), виступає як виробник по відношенню до рівня запасів, підготовлених до виїмки. Останні одночасно виступають, як споживач розкритих запасів і як виробник по відношенню до запасів, готових до виїмки.

Для встановлення впливу інтенсифікації очисної виїмки на характер та темп протікання виробничого процесу при різних значеннях показників пропорційності, тобто при різних величинах запасів вугілля, підготовлених прохідницькими роботами, було розглянуто 12 варіантів зміни навантажень на очисні вибої на шахтах ПАТ «ДТЕК Свердловантрацит». Імітація інтенсифікації очисної виїмки в моделі припускає «імпульсне введення стимулюючих дій». Тобто мало місце раптове збурювання, викликаного зміною зовнішнього введення навантаження на очисний вибій до деякої нової величини, яка потім підтримувалася постійно.

Якщо система, що моделюється, не має достатніх запасів для нормальної роботи при новій інтенсивності очисної виїмки, то стрибкоподібне введення на це відреагує негайно зміною темпів ведення процесів. Ступінь забезпеченості запасами системи при новій інтенсивності очисної виїмки характеризується амплітудою та частотою коливань темпів, періодом їх загасання або посилення. Моделювання проводилося на прикладі 77 лави пласту k_1^2 потужністю 1,7 м (довжина лави 300 м, обладнана комплексом 2МКД-90), шахта «Красний Партизан».

У якості експериментального введення інтенсивність очисної виїмки була збільшена на 17,5% (з 2500 до 3000 т/доб.). Збільшення інтенсивності очисної виїмки на 17,5% привело до коливань темпу ведення прохідницьких робіт, які в окремі моменти досягали 40% первісного значення (рис. 2).

Тому виникла необхідність якнайшвидшої підготовки додаткових запасів для створення фронту робіт. Однак обмеження, накладені на темп проведення прохідницьких робіт із застосуванням буро-вибухових робіт, а також фронту робіт з прирізання додаткових запасів або запасів з одночасним погіршенням концентрації гірничих робіт, не дозволили створити запасів зі швидкістю, необхідною для стабільного ведення очисних робіт з інтенсивністю 3000 т/доб. Це стало причиною того, що мали місце й коливання темпу видобутку, які в окремі відрізки часу досягали 50% (рис. 2).

ІННОВАЦІЇ, ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГІЙ ТА КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ НАУКОВИХ РОЗРОБОК

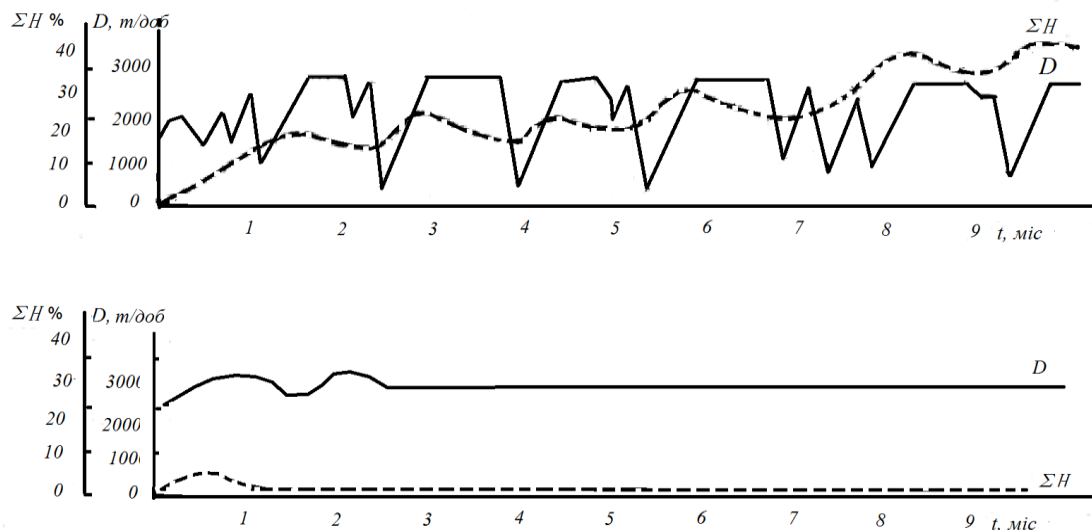


Рисунок 2 – Динаміка інтенсивності очисної виїмки при різних значеннях коефіцієнтів K

При другому циклі експериментів коливання темпів ведення процесів на ділянці значно менші у порівнянні з першим циклом; період загасання коливань, тобто період стабілізації роботи системи при новій інтенсивності очисної виїмки, у другому випадку також менше, ніж у першому.

Аналіз розглянутих варіантів дозволив відзначити наступне:

- зростання інтенсивності очисної виїмки викликає значні коливання темпів проведення процесів, що передують очисній виїмці;
- при однаковій інтенсивності очисної виїмки система стійкіша при більш високих значеннях коефіцієнтів пропорційності, тобто при наявності більших запасів вугілля різного ступеня готовності до вилучення.

Для оцінки ступеня впливу інтенсифікації очисної виїмки на характер протікання процесів, що їй передують, були розглянуті різні варіанти поведінки системи при різних значеннях коефіцієнтів пропорційності. При незмінній величині заданих параметрів рівень відхилення прямо пропорційний середній величині інтенсивності очисної виїмки. Тому середнє значення інтенсивності очисної виїмки в кожному місяці оцінювалося середньомісячним рівнем відхилення від планованих обсягів видобутку вугілля (10%). Аналіз даних, отриманих у результаті програвання моделі, показав, наступне:

- зниження рівня невиконання обсягів виробництва, тобто зростання середньої інтенсивності проведення очисних робіт, супроводжувалось збільшенням коефіцієнтів пропорційності, тобто запасів, підготовлених прохідницькими роботами;
- зростання інтенсивності очисної виїмки, що приводить до зниження рівня невиконання планових завдань на 1%, збільшує запаси, підготовлені прохідницькими роботами, у середньому на 5%. Отже, інтенсифікація очисної виїмки стосується не лише процесу видобування вугілля, але й змінює характер та параметри попередніх процесів.

У якості результуючого показника, що дозволяє оцінити стійкість роботи видобувної ділянки по виконанню планових завдань з видобутку вугілля, тобто

при заданій інтенсивності очисної виїмки, прийнятий сумарний рівень невиконання планових завдань ΣH , який, як і його доданки, залежить від коефіцієнтів. Ці коефіцієнти є незалежними аргументами, тобто $\Sigma H = f(K_1; K_2; K_3)$.

Величина ΣH визначена при будь-яких значеннях коефіцієнтів та їх комбінаціях. Таким чином, між сумарним рівнем невиконання плану й зазначеними коефіцієнтами існує безпосередня залежність. Розв'язок задачі зводиться до визначення таких коефіцієнтів, при яких значення функції буде мінімальним. Для її розв'язування може бути використаний градієнтний метод, заснований на побудові послідовності точок, кожна з яких визначається з попередньої шляхом зрушення уздовж напрямку, що не виходить за межі припустимої області та при якому убиває функція, що мінімізується. Певній комбінації коефіцієнтів у n -мірному просторі завжди відповідає певне значення функції. Покрокова зміна значень коефіцієнтів проводиться до знаходження мінімального значення функції.

Обмеження на змінні величини в моделі обумовлені характером та можливостями технологічної схеми ділянки пласта, що моделюється. Розміри ділянок, які підготовлюються до відпрацювання, свідчать про можливість збільшення навантаження на вибій на 30–40% без загрози нестачі фронту робіт.

На особливу увагу заслуговують результати оптимізації коефіцієнтів пропорційності, що визначають величини запасів різного ступеня готовності до вилучення на видобувній ділянці при інтенсивності очисної виїмки 1200 т/доб. Значення коефіцієнтів, отримані в результаті оптимізації системи резервів запасів при інтенсивності очисної виїмки 1200 т/доб та більше, досягнуті на інших шахтах або в минулому досягалися границь, обумовлених технологією ведення робіт [15, 16]. Для подальшого поліпшення результуючих показників необхідно реалізувати або зміни технологічної схеми, або змінити параметри, що визначають ефективність системи. Головні з таких параметрів – це концентрація гірничих робіт та регулювання витрат ресурсів. Для вирішення цих задач скористаємось методами дискретної математики – мережевими моделями та графами.

Для оптимізації за параметром питома собівартість видобутку представимо структуру зв'язків у вигляді мережевої моделі (рис. 3).

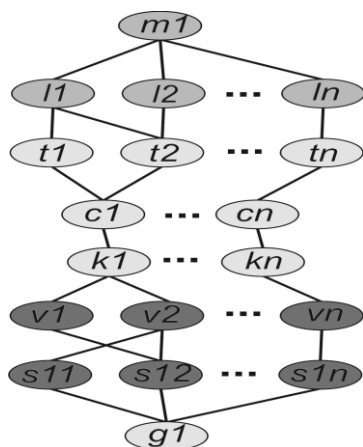


Рисунок 3 – Мережева модель для оптимізації параметрів експлуатації

Вершинам моделі відповідають потоки вхідних ресурсів у вигляді технологічних чинників: m_1 – прийнята виймальна потужність пласта, м; l_1, l_2, \dots, l_n – можливі довжини очисного вибою, м; прийнятих типів очисного обладнання у вигляді типорозмірів видобувних комплексів t_1, t_2, \dots, t_n , очисних комбайнів c_1, \dots, c_n , забійних конвеєрів k_1, \dots, k_n , які формують потоки вихідних ресурсів у вигляді величини добового навантаження на вибій v_1, v_2, \dots, v_n т/доб. при собівартості видобутку $s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1n}$ грн/т.

ІННОВАЦІЇ, ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГІЙ ТА КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ НАУКОВИХ РОЗРОБОК

Тоді, суть процесу оптимізації полягає у знаходженні найкоротшого маршруту у вихідному графі g_1 вибору альтернатив, при цьому маршрут повинен проходити через кожну на рівні технологічних параметрів, обладнання, вихідних ресурсів. На основі проведених досліджень [17, 18] із обґрунтування області раціональної експлуатації було розроблено методика вибору очисного обладнання на основі теорії графів [19], а для впровадження у виробництво створено відповідне програмне забезпечення (рис. 4).



Рисунок 4 – Вікно програми, яка дозволяє оптимізувати параметри експлуатації та обирати обладнання

Таким чином застосування алгоритмів оптимізації на мережах та графах дозволяють підвищити розмірність задач, скоротити часові витрати на прийняття рішень. При цьому слід зазначити, що область застосування не обмежується гірничо-видобувною галуззю, а може бути застосовано при управлінні запасами, при розробці технологічних циклів із виготовлення продукції [20–22], прогнозуванні показників діяльності [23, 24].

Обговорення результатів. Отже, для успішної оптимізації технологічних процесів та прогнозування показників діяльності системи необхідно мінімізувати коливання показників добового навантаження на вибій та мінімізувати ризики це досягається за рахунок зменшення невизначеності. Для цього застосуємо класичні критерії прийняття рішень в умовах невизначеності.

В нашому дослідженні розглядаються критерії Вальда, «максимакса», Лапласа, Севіджа, Гурвіца, узагальнений критерій Гурвіца.

Кожен із критеріїв має свою область застосування і базується на відношенні особи, що приймає рішення до ризиків. Якщо мова йде про інноваційне рішення, коли аналізується доцільність впровадження нової технології, то оптимістичний підхід буде більш доцільним адже недоотримання прибутку може негативно вплинути на весь процес в подальшому. Якщо задача полягає у підтриманні вже існуючих виробничих потужностей, то більш доцільний песимістичний підхід.

Пошук оптимальної технологічної схеми X^* в умовах невизначеності проводиться на основі критеріїв порівняння альтернатив $X_1^*, X_2^*, \dots, X_i^*$, де $i = 1, 2, \dots, N$ – порядковий номер схеми, в умовах невизначеності. Застосування кожного із критеріїв дозволяє сформулювати гіпотезу о «виграші» альтернативи при відомому стані природи M . Тобто, існують альтернативи, які забезпечують видобуток Q_1, Q_2, \dots, Q_i при цьому вартість на придбання та обслуговування, відповідно R_1, R_2, \dots, R_i , а величина виграшу $X_{11}, X_{21}, \dots, X_{ij}$ при різних станах природи $M = 1, 2, \dots, j$.

Тоді, зрозуміло, що оптимальною буде альтернатива X_{ij}^* у якої при заданому стані природи M виграш буде максимальним X_{ij} . Кожен із критеріїв дозволяє оцінити різні формати життєдіяльності підприємства. Вірогідності виграшу X_{ij} для різних сценаріїв виробництва $M = 1, 2, \dots, j$ можна представити матрицею «гри»

$$\begin{matrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} \end{matrix} \quad (8)$$

В умовах коли виробництво, ще не почалось величина «виграшу» тотожна з витратами на виробництво, тобто

$$X_{11} = R_{11}; X_{12} = R_{12}; \dots, X_{ij} = R_{ij}. \quad (9)$$

Тоді, вибір раціонального сценарію виробництва полягає у виборі альтернативи для кожного стану природи. При цьому, стан системи може характеризуватись різними сценаріями розвитку: α – об'єктивна вірогідність отримати негативні результати, β – проміжні результати, γ – вірогідність повного успіху. Сукупність усіх вірогідностей $\zeta = \alpha + \beta + \gamma = 1$, або

$$\zeta = \alpha \frac{\sum P}{m} + \beta \frac{\sum I}{n} + \gamma \frac{\sum S}{p}, \quad (10)$$

де $\sum P$ – сукупність негативних результатів; $\sum I$ – сукупність проміжних результатів; $\sum S$ – сукупність успішних результатів; m, n, p – кількість негативних, проміжних, успішних результатів відповідно.

Попарне порівняння альтернатив за парними оцінками $(\alpha; \gamma)$ дозволяє отримати найбільш прийнятну стратегію на кожному етапі.

ІННОВАЦІЇ, ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГІЙ ТА КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ НАУКОВИХ РОЗРОБОК

Із (10) можна зробити припущення, що коли вірогідність досягнення успіху порівняно велика $\gamma \geq 0,3$, а вірогідність негативних результатів не перевищує $\alpha \leq 0,7$, то можна обрати альтернативу з потенціалом до збільшення видобутку $Q \rightarrow \max$ – умовно це IV група (продуктивність понад 2000 т/доб.), а у випадку коли висока вірогідність негативних результатів $\alpha \rightarrow 0$, то варто обрати альтернативу з показниками продуктивності $Q \equiv Q_E$ тотожними рівню ефективності Q_E – умовно це I група (продуктивність 1000–1100 т/доб.). Існують також проміжні групи II (продуктивність 1100–1500 т/доб.) та III (продуктивність 1500–2000 т/доб.).

Застосування приведених у дослідженні критеріїв дозволяє розрахувати величину «виграшу» X_{ij} , тому слід більш детально зупинитись на кожному із критеріїв та описати область застосування.

Критерій Вальда, згідно з ним оптимальною буде та альтернатива, яка забезпечить найкращий виграш серед можливих при несприятливому розвитку подій $\gamma = 0; \alpha = 1$, тобто «мінімакс» – мінімум серед втрат.

Критерій Вальда доцільно використовувати при розрахунку ризиків виробництва та для вугільних шахт з несприятливими гірничого-геологічними умовами. На стадії доробки запасів та при відсутності капіталовкладень проектування нових технологічних схем без урахування цього критерію неможливе.

Критерій «максимакса», він є оберненим до критерію Вальда, тобто вірогідність виграшу висока $\gamma = 1; \alpha = 0$. Згідно з цим критерієм оптимальною буде альтернатива, яка здатна забезпечити найбільший виграш.

Критерій «максимакса» можна використовувати, якщо гірничо-геологічні умови сприятливі, відсутні обмеження за газовим фактором, робочим режимом очисного комбайну, пропускна здатність транспортного ланцюжку достатня. Даний критерій слід застосовувати для шахт, які займаються видобутком дефіцитних марок вугілля, так як попит максимальний.

Критерій Лапласа базується на принципі недостатності обґрунтованості, тобто оптимальною буде альтернатива з максимальним середнім виграшем. Для чотирьох станів природи $M = 1..4$ відповідно вірогідність виграшу складе $\gamma = 1/M = 0,25$.

Критерій Лапласа можна застосовувати при довгостроковому плануванні виробництва, а також для ситуацій, проектна потужність очисного вибою достатня для експлуатації впродовж декількох років.

Звісно, що у проектувальника можуть виникнути труднощі при аналізі альтернатив за трьома критеріями. Ще більші труднощі виникають, коли отримані абсолютно протилежні значення при аналізі за критерієм Вальда $W_{ij} (\alpha = 1; \gamma = 0)$ та максимаксом $M_{ij} (\alpha = 0; \gamma = 1)$.

Із практики багаторічного моніторингу діяльності вугледобувних підприємств та прогнозування показників роботи В.Г. Грін'ювим запропоновано універсальний підхід, який базується на застосуванні середньозваженого критерію,

який враховує, як позитивні так і негативні прогнози. При цьому вважають, що вірогідність вдалого сценарію $\gamma = 2/5$, а невдалого $\alpha = 3/5$, тоді середньозважена величина виграшу за В.Г. Гріншовим складе

$$P_{ij} = \frac{3W_{ij} + 2M_{ij}}{5}. \quad (11)$$

Раніше нами розглянуті критерії враховували виграші, проте слід враховувати і ризики. У нашому випадку ризики пов'язані з недоотриманням прибутку. Для цього скористаємось критерієм Севіджа.

Критерій Севіджа, ґрунтується на тому, що оптимальною буде та альтернатива у якої величина «недоотриманого виграшу» буде мінімальною, тобто чим менша буде різниця між недоотриманим виграшем R_{ij} та реальним X_{ij} тим краще. Даний критерій будується не на матриці «ігор», а на матриці «ризиків».

Критерій Севіджа слід використовувати, на початковому етапі проектування або коли дані про потенціал видобувного комплексу та ризики виробництва відсутні. Даний підхід досить логічний, адже величина реального видобутку буде тотожна проектним характеристикам видобувного комплексу. Можна стверджувати, що при $S_{ij} - X_{ij} = 0$ буде досягнуто збалансованість ресурсів, тобто при мінімальних витратах комплекс забезпечить заявлені проектні характеристики.

Критерій Гурвіца базується на врахуванні крайніх станів системи через застосування «коефіцієнту оптимізму» $0 \leq \lambda \leq 1$. При $\lambda = 0$ критерій стає ідентичним критерію Вальда, а при $\lambda = 1$ – максимакса. На відміну від інших критеріїв він враховує лише максимальні $X_{i \max}$ та мінімальні $X_{i \min}$ виграші.

Даний критерій доцільно використовувати коли відсутній досвід експлуатації вказаних альтернатив обладнання на підприємстві. Велику роль грає відношення проектувальника до ризиків, тобто при $\lambda \leq 0,4$ оптимальною буде альтернатива з меншими втратами, а при $\lambda \geq 0,4$ – з максимальним виграшем.

Узагальнений критерій Гурвіца дуже схожий на попередній критерій, однак на відміну від звичайного критерію Гурвіца він обчислює середньозважені значення виграшу.

В більшості випадків вказаний критерій дозволяє отримати ідентичні рішення і для песимістичного і для оптимістичного сценаріїв розвитку виробництва, через те, що матриця станів впорядкована з високою достовірністю можна зробити припущення про вірогідність того чи іншого сценарію розвитку виробництва.

Узагальнений критерій Гурвіца доцільно використовувати при довгостроковому проектуванні підприємств коли дані попередніх порівнянь мають суперечливий характер.

В загальному випадку спільне застосування критеріїв дозволяють отриману однозначну відповідь про раціональний об'єм виробництва.

Отже, збільшення відтворення розкритих, підготовлених та готових до вилучення запасів для приведення у відповідність їх кількості з новою інтенсивністю очисної виїмки неможливе без прискорення темпів ведення процесів, метою здійснення яких є відтворення цих запасів. Прискорення темпів ведення зазначених процесів можливе як на основі їх інтенсифікації, тобто збільшення швид-

ІННОВАЦІЇ, ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГІЙ ТА КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ НАУКОВИХ РОЗРОБОК

кості проведення виробок за рахунок збільшення продуктивності праці та переоснащення новою, більш високопродуктивною технікою, так і на основі екстенсифікації, тобто збільшення числа підготовчих вибоїв. Як в одному, так і в другому випадках реалізація цих заходів призведе до зниження стійкості роботи шахти через збільшення обсягів проведення виробок, що, природно, супроводжується збільшенням обсягів породи, що вилучається.

Причому, як вказувалося раніше, порівняно невелике збільшення інтенсивності очисної виїмки вимагає значних та послідовно зростаючих з кожною стадією приростів обсягів запасів, а значить, й обсягів транспортування породи для їх підготовки. Крім того, у результаті інтенсифікації виробничого процесу може знадобитися збільшення пропускних здатностей транспорту та вентиляції. Однак, як правило, основні технологічні ланки шахт (крім гірничих робіт) мають достатні резерви пропускної здатності.

ВИСНОВКИ. В процесі виконання дослідження встановлено, що функціональна стійкість підсистем виробництва досягається відтворенням достовірно заданих показників продуктивності шляхом узгодженості у часі і просторі основних та допоміжних операцій при мінімальних ризиках. При цьому необхідно, щоб запропоноване рішення було оптимальним, тобто параметр, який характеризує процес видобутку, транспортування та ін. повинен бути найкращим (найменшим) з поміж можливих. Це дозволяє зробити наступні висновки:

- обґрунтування раціонального рівня виробництва полягає у знаходженні балансу між максимально можливою продуктивністю у разі оптимістичного сценарію виробництва та мінімально можливою у разі виникнення песимістичного сценарію виробництва, тобто зменшенні невизначеності та переходу до прогнозування ризиків;

- потреба у збільшенні продуктивності виникає при випередженні фронту підготовчих робіт та узгодженості між іншими підсистемами транспорту, збагачення та ін., при цьому для діючих очисних вибоїв необхідно унеможливити коливання рівня добового навантаження;

- оптимізація параметрів функціонування технологічних схем здійснюється представленням виробничого циклу у вигляді потоків вхідних та вихідних ресурсів, сенс полягає в наступному, що умови експлуатації, засоби механізації, узгодженість між системами видобутку, підтримки виробленого простору і транспорту формують кінцевий рівень продуктивності та собівартість; аналіз альтернатив дозволяє формувати структуру видобувного комплексу з заданими показниками добового навантаження на вибій;

- застосування мережевих моделей, а також алгоритмів оптимізації (Дейкстри, Флойда та ін.) дозволили розробити відповідне програмне забезпечення та впровадити результати у виробництво.

Зважаючи на часову зміну загального рівня ефективності виробництва подальші дослідження слід направити на розробку динамічних моделей, які дозволять обґрунтувати оптимальні технологічні зв'язки не тільки в межах одного підприємства, але і в системі «вугілля–кокс–метал», «вугілля–електроенергія».

ЛІТЕРАТУРА

1. Slade M. E. Valuing Managerial Flexibility: An Application of Real-Option Theory to Mining Investments. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2001. Vol. 41 (2), pp. 193–233.
2. Topal E. Early start and late start algorithms to improve the solution time for long-term underground mine production scheduling. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2008. Vol. 108 (2), pp. 99–107.
3. Newman A. M., Kuchta M. Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine. *European Journal of Operational Research*, 2007. Vol. 176 (2), pp. 1205–1218.
4. Li J., Zhan K. Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment. *Engineering*, 2018. Vol. 4(3), pp. 381–391.
5. Meng Ch., Srinivas S., Maghsoudi A., Son Y.-D., Dessureault. S. Data-driven modeling and simulation framework for material handling systems in coal mines. *Computers & Industrial Engineering*, 2013. Vol. 63 (4), pp. 766–779.
6. Маевский В. С., Захарова Л. Н., Мерзликин А. В. Стохастическое моделирование рисков невыполнения программы развития горных работ на угольной шахте. *Наукові праці ДонНТУ. Серія Проблеми моделювання і автоматизації проектування*, 2011. № 10 (197). С. 101–110.
7. Назимко В. В., Мерзлікін А. В., Захарова Л. М., Ареф'єв Є. М. Аналіз відповідності програми розвитку гірничих робіт вугільної шахти проектно-орієнтованому стилю управління, 2014. *Гірничий вісник*, № 98, С. 48–52.
8. Федоров В. Н. К вопросу технического регулирования производственных процессов современной шахты, 2010. *Уголь*. № 2. С. 49–51.
9. Гринев В. Г. Оценка перспектив повышения эффективности получения конечной продукции из угля, 2008. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*. № 11. С. 126–135.
10. Cai D., Baafi E., Porter I. Modelling a longwall production system using flexsim 3D simulation software. *Mine planning and equipment selection*. 2012. Vol. 2, pp. 107–114.
11. Семенченко А. К., Шабает О. Е., Семенченко Д. А. и др. К вопросу повышения технического уровня высокопроизводительных комплексов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-електромеханічна*, 2007. № 14 (127). С. 81–92.
12. Салли С. В. Оценка целесообразности отработки оставшихся запасов малоэффективных антрацитовых шахт, 2007. *Науковий вісник НГУ України*. № 1. С. 7–11.
13. Schniederjans, M. J., Hamaker, J. L., Schniederjans, A. M. *Information technology investment: Decision-making methodology* : World Scientific Pub Co Inc., 2010. 120 p.
14. Hurwicz L. What is the Coase Theorem? *Japan and the World Economy*, 1995. Vol. 7(1), pp. 49–74.
15. Fomichov V., Sotskov V., Pochepov V., Mamaikin O. Formation of a calculation model determining optimal rate of stoping face movement with a large

deformation of a rock massif, 2018. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 13(7), pp. 2381–2389.

16. Mamaikin O., Sotskov V., Demchenko Y., Prykhorchuk O. Productive flows control in coal mines under the condition of diversification of production, 2018. *E3S Web of Conferences*. Vol. 60, p. 00008.

17. Хорольський А. О. Технологічні аспекти експлуатації вугільних родовищ. *Школа підземної розробки: Матеріали міжнар. конф. (Бердянськ, 4–8 вересня 2017)*. Дніпро, 2017. С. 99–100.

18. Хорольський А. О. Підвищення надійності технології розробки вугільних родовищ на основі оптимізації мережевих моделей відповідних їм структур очисного обладнання, 2017. *Геотехническая механика*. № 136. С. 196–204.

19. Гринев В. Г. *Графы и сети для выбора горно-шахтного оборудования*. Днепр : Пороги, 2016. 247 с.

20. Кононенко М., Мальцев Д. Усовершенствование технологии очистных работ во вторичных камерах в условиях Южно-Белозерского месторождения, 2008. *Науковий вісник НГУ*. №. 4. С. 32–35.

21. Зубко С. А., Кононенко М. Н. Обоснование рациональных параметров технологии буровзрывных работ при добычи железных руд подземным способом. *Межд. науч.-техн. конф.: Школа подземной разработки*, 2007. С. 302–306.

22. Khomenko O. Y. Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2012. Vol. 4, pp. 44–54.

23. Zhanchiv B., Rudakov D. V., Khomenko O. Ye., Tsendzhav L. Substantiation of mining parameters of Mongolia uranium deposits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2013. Vol. 4, pp. 28–35.

24. Толкач О. М., Соболевський Р. В., Стенюк М. П. Побудова регресійної моделі взаємозв'язків основних показників якості пірофілітових сланців. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, 2012. № 60 (1). С. 134–138.

OPTIMIZATION OF THE SOUNDNESS OF THE OPERATION OF SUBSYSTEMS IN LONGWALL FACE

A. Khorolskyi, V. Hrinov

Institute for Physics of Mining Processes the NAS of Ukraine

vul. Simferopolskaya, 2A, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail: khorolskiyaa@ukr.net

A. Mamaikin

Dnipro University of Technology

prosp. Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail: mamaykin@yahoo.com

Purpose. Is the development of a tool to estimate the state of operation schedules of coal mines relying upon the analysis of actual state of an operation schedule taking into consideration hierarchic connections between the system components. **Methodology.** Comprehensive research method has been applied. The method involves statistical analysis to determine the dependence between performance potential index and a number of independent indices concerning production and commercial operations of a

mine, and multicriteria method to estimate level of potential and coal mine reception of innovations. Methods of discrete mathematics have been used in the context of network models to optimize operational parameters and to normalize a structure of manufacturing relations. **Originality.** Regularities, concerning formation of production and commercial operations of mines, have been determined. The regularities involve concentration level of mining, labour productivity, stope advance, and prime cost of end product. Mathematical models, describing “performance potential” index, have been developed. The index is based upon the analysis of dependences between it and mining and geological as well as technological parameters of a mine. It has been proved that simulation of optimum parameter values of operation schedule means complete implementation of economic potential of the mine, i.e. ultimately achievable (reference) level since the level correspondence makes operation schedule of a mine receptive to innovations. **Practical value.** A model has been proposed to analyze the efficiency of operation schedules of coal mines as for the estimation of a level of potential and coal mine reception of innovations. Further representation of a structure of manufacturing relations in the form of a network model helps reduce prime cost of mining and to increase labour productivity. The approach can be applied in the process of operative and long-term planning of activities by coal industry enterprises as well as enterprises belonging to the related industries, and to determine ultimately achievable rate of economic surplus value. Corresponding software has been developed to implement the methods.

Key words: operation schedule, decision-making criterion, production level, optimization, software.

REFERENCES

1. Slade, M. E. (2001). Valuing Managerial Flexibility: An Application of Real-Option Theory to Mining Investments. *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 41 (2), pp. 193–233.
2. Topal, E. (2008). Early start and late start algorithms to improve the solution time for long-term underground mine production scheduling. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 108 (2), pp. 99–107.
3. Newman, A. M., Kuchta, M. (2007). Using aggregation to optimize long-term production planning at an under-ground mine. *European Journal of Operational Research*. Vol. 176 (2), pp. 1205–1218.
4. Li, J., Zhan, K. (2018). Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment. *Engineering*. Vol. 4(3), pp. 381–391.
5. Meng, Ch., Srinivas, S., Maghsoudi, A., Son, Y.-D., Dessureault, S. (2013). Data-driven modeling and simulation framework for material handling systems in coal mines. *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 63(4), pp. 766–779.
6. Maevskij, V. S., Zaharova, L. N., Merzlikin, A. V. (2011). Stohasticheskoe modelirovanie riskov nevypolneniya programmy razvitiya gornyh rabot na ugol'noj shahte [Stochastic modeling of the risks of non-fulfillment of the mine development program at the coal mine]. *Naukovi praci DonNTU. Seriya Problemi modelyuvannya i avtomatizacii proektuvannya*, Vol. 10 (197), pp. 101–110. (in Russian).

7. Nazimko, V. V., Merzlikin, A. V., Zaharova, L. M., Aref'ev, E. M. (2014). Analiz vidpovidnosti programi rozvitku girnichih robit vugil'noi shahti proektno-orientovanomu stilyu upravlinnya [Analysis of the compliance of the coal mine mining program with the design-oriented management style]. *Girnichij visnik*, Vol. 98, pp. 48–52. (in Ukrainian).
8. Fedorov, V. N. (2010). K voprosu tekhnicheskogo regulirovaniya proizvodstvennyh processov sovremennoj shahty [On the issue of technical regulation of production processes of the modern mine]. *Ugol'*. Vol. 2, pp. 49–51. (in Russian).
9. Grinev, V. G. (2008). Ocenka perspektiv povysheniya effektivnosti polucheniya konechnoj produktsii iz uglya [Evaluation of prospects for improving the efficiency of obtaining final products from coal]. *Fiziko-tekhnichni problemi girnichogo virobництва*. Vol. 11, pp. 126–135. (in Russian).
10. Cai, D., Baafi, E., Porter, I. (2012). Modelling a longwall production system using flexsim 3D simulation software. *Mine planning and equipment selection*. Vol. 2, pp. 107–114.
11. Semenchenko, A. K., Shabaev, O. Ye., Semenchenko, D. A. (2007). K voprosu povysheniya tekhnicheskogo urovnya vysokoproizvoditel'nyh kompleksov [On the issue of improving the technical level of high-performance complexes]. *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: girnicho-elektromekhanichna*. Vol. 14 (127), pp. 81–92. (in Russian).
12. Salli, S. V. (2007). Ocenka celesoobraznosti otrabotki ostavshihsysya zapasov maloefektivnyh antra-citovih shaht [Evaluation of the feasibility of refining the remaining reserves of ineffective anthracite mines]. *Naukovij visnik NGU Ukraini*. Vol. 1, pp. 7–11. (in Russian).
13. Schniederjans, M. J., Hamaker, J. L., Schniederjans, A. M. (2010). Information technology investment: Decision-making methodology : *World Scientific Pub Co Inc*. 120 p.
14. Hurwicz, L. What is the Coase Theorem? (1995). *Japan and the World Economy*. Vol. 7(1), pp. 49–74.
15. Fomichov, V., Sotskov, V., Pochepov, V., Mamaikin, O. (2018). Formation of a calculation model determining optimal rate of stoping face movement with a large deformation of a rock massif. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 13(7), pp. 2381–2389.
16. Mamaikin, O., Sotskov, V., Demchenko, Y., Prykhorchuk, O. (2018). Productive flows control in coal mines under the condition of diversification of production. In *E3S Web of Conferences*. Vol. 60, p. 00008.
17. Khorolskyi, A. O. (2017). Tekhnologichni aspekti ekspluatacii vugil'nih rodovishch [Technological aspects of the operation of coal deposits]. In *Shkola pidzemnoi rozrobki*. Dnipro, pp. 99–100. (in Ukrainian).
18. Khorolskyi, A. O. (2017). Pidvishchennya nadijnosti tekhnologii rozrobki vugil'nih rodovishch na osnovi optimizacii merezhevih modelej vidpovidnih im struktur ochisnogo obladnannya [Enhancement of the reliability of the technology of coal deposits development on the basis of optimization of network models of the cor-

responding structures of the mining equipment]. *Geotekhnicheskaya mekhanika*. Vol. 136, pp. 196–204. (in Ukrainian).

19. Grinev, V. G. (2016). *Grafy i seti dlya vybora gorno-shahtnogo oborudovaniya* [Graphs and networks for the selection of mining equipment]: Porogi. 247 p. (in Russian).

20. Kononenko, M., Mal'cev, D. (2008). Usovershenstvovanie tekhnologii ochistnyh rabot vo vtorichnyh kamerah v usloviyah Yuzhno-Belozerskogo mestorozhdeniya [Improvement of wastewater treatment technology in secondary chambers under the conditions of the South Belozersky field]. *Naukovij visnik NGU*. Vol. 4, pp. 32–35. (in Russian).

21. Zubko, S. A., Kononenko, M. N. (2007). Obosnovanie racional'nyh parametrov tekhnologii burovzryvnyh rabot pri dobychi zheleznyh rud podzemnym sposobom [Justification of the rational parameters of the technology of drilling and blasting operations in the extraction of iron ore by the underground method]. *In Shkola podzemnoj razrabotki*, Dnipro, pp. 302–306. (in Russian).

22. Khomenko, O. Y. (2012). Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Vol. 4, pp. 44–54.

23. Zhanchiv, B., Rudakov, D. V., Khomenko, O. Ye., Tsendzhav, L. (2013). Substantiation of mining parameters of Mongolia uranium deposits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Vol. 4, pp. 28–35.

24. Tolkach, O. M., Sobolevs'kyj, R. V., Stenjuk, M. P. (2012). Pobudova regresijnoi' modeli vzajemozv'jazkiv osnovnyh pokaznykiv jakosti pirofilitovyh slanciv [Construction of the regression model of the interconnections of the main indicators of the quality of pyrophyllite shale], *Visnyk Zhytomyr'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu. Serija: Tehnichni nauky*, Vol. 60 (1), pp. 134–138. (in Ukrainian).

Стаття надійшла 24.05.2019.