

## ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СПОРУДЖЕННЯ ВИРОБОК У СКЛАДНИХ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

<sup>1</sup>Грінюв В.Г., <sup>1</sup>Хорольський А.О., <sup>1</sup>Виноградов Ю.О.

<sup>1</sup>Інститут фізики гірничих процесів НАН України

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СООРУЖЕНИЯ ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

<sup>1</sup>Гринев В.Г., <sup>1</sup>Хорольский А.А., <sup>1</sup>Виноградов Ю.А.

<sup>1</sup>Інститут фізики горних процесов НАН України

## ENGINEERING ASPECTS OF THE MINE WORKING DEVELOPMENT IN DIFFICULT HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

<sup>1</sup>Hrinov V.G., <sup>1</sup>Khorolskyi A.A., <sup>1</sup>Vynohradov Yu.O.

<sup>1</sup>Institute for Physics of Mining Processes of NAS of Ukraine

**Анотація.** В статті описано новий підхід щодо визначення оптимальних параметрів процесу спорудження виробок у складних гідрогеологічних умовах. Встановлено, що проектування технології кріплення виробок полягає у визначенні сукупності взаємопов'язаних у часі і просторі процесів із виготовлення, транспортування, спорудження тимчасового та постійного кріплення. У роботі запропоновано модель для пошуку оптимального виду кріплення із позиції мінімізації витрат на спорудження та обслуговування виробок. Ідея полягає у представленні етапів із спорудження виробок у вигляді мережевої моделі та застосуванні алгоритмів динамічного програмування для оптимізації процесу на кожному проміжному етапі. Це дозволяє перейти від багатоманіття (за своєю природою) до пріоритетних керуючих факторів, що впливають на ефективність процесу – таким чином досягається оптимізація параметрів спорудження виробок. Особливу увагу уділено дослідженню механізмів поведінки масиву у складних гідрогеологічних умовах. У залежності від виду та прояву підземних вод враховуються різні критерії оцінки: водопріток, фільтрація, водопроникність та ін. На основі уявлень про гідрогеологічні характеристики масиву гірських порід можна проаналізувати доцільність застосування того чи іншого виду кріплення із урахуванням допоміжних етапів. І навпаки виходячи із наявного виду кріплення можна передбачити поведінку масиву гірських порід. Таким чином, проблема забезпечення стійкості виробок у складних гідрогеологічних умовах входить до класу задач динамічного програмування та пов'язана із дослідженням технологічних аспектів фізики гірничих процесів. Характерною особливістю цієї проблеми є наявність взаємооберненого зв'язку між технологією спорудження та гірничо-геологічними умовами, коли гідрогеологічні характеристики масиву впливають на технологію, і навпаки. Зважаючи на вид та характер прояву водопритоку у гірничі виробки можна задавати пріоритетні керуючі фактори із різним ступенем «ваги». Застосування мережевих моделей і алгоритмів динамічного програмування дозволяють оптимізувати процес спорудження виробок, як у цілому, так і на проміжних етапах. Особливу увагу приділено розробці програмного забезпечення.

**Ключові слова:** оптимізація параметрів, мережева модель, програмне забезпечення, гідрогеологічні характеристики, кріплення виробок

**Вступ.** Спорудження та підтримання виробок складний процес, особливо в складних гідрогеологічних умовах. Це пояснюється багатоманіттям пов'язаних у часі та просторі процесів, які різні за природою та ступенем впливу на загальну ефективність. Окрім експлуатаційних, гірничо-геологічних, економічних чинників слід розглядати і технологічні аспекти. Таким чином, прийняття рішення про доцільність застосування того чи іншого виду кріплення представляє собою багато параметричну задачу, яку неможливо вирішити методами лінійного програмування або перебором. При виборі кріплення слід керуватись наступними критеріями: метод вибору повинен бути

науково обґрунтованим, тобто враховувати поведінку масиву порід, а також гідрогеологічні характеристики; необхідно забезпечити роботу системи «кріплення–порода»; запропонований вид кріплення повинен бути економічно обґрунтованим – це досягається за рахунок зниження витрат на матеріали, спорудження, а також завдяки оптимізації зв'язків у виробничих ланках.

Отже, проблема спорудження виробок представляє собою «компроміс» між пошуком надійного виду кріплення, яке забезпечить підтримку масиву гірничих порід у складних гідрогеологічних умовах та зменшенням витрат на проведення, обслуговування, демонтаж виробок. Для прийняття адекватного рішення слід відповісти на декілька питань: Які критерії та параметри слід враховувати при виборі? Яким чином можна мінімізувати витрати? Як прийняти оптимальне рішення, яке буде вірним у довгостроковій перспективі? Який підхід та інструменти слід застосувати? Вирішенню цих питань присвячено дане дослідження.

На кожному етапі виробничого процесу слід приймати оптимальне рішення, щодо обґрунтування раціональних параметрів, які полягають не тільки в зменшенні собівартості але і мінімізації негативного впливу водоприпливів у виробки.

Наразі для прийняття рішень щодо вибору оптимальної стратегії застосовують неформальні (евристичні методи), такі як АНР, його різновиди Fuzzy-АНР, TOPSIS, TODIM, PROMETHEE, ELECTRE, VIKOR та кількісні методи прийняття рішень: динамічне програмування, критерії прийняття рішень в умовах невизначеності, лінійне програмування, імітаційне моделювання, теорію ігор. При цьому застосування неформальних методів базується на порівнянні альтернатив (за допомогою формальних оцінок «переваг») між собою для визначення найбільш «впливового» критерію, який слід оптимізувати. Тобто в результаті проведеного аналізу отримують розподіл критеріїв за рівнем впливу на кінцевий результат, але існує вірогідність вибору неефективних рішень, адже ефективність залежить від досвіду проектувальника. Тому, на наше переконання, слід застосовувати кількісні методи, які дозволяють отримати єдине оптимальне рішення та не залежать від досвіду проектувальника. Таким чином розробка наукових основ щодо оптимізації технологічних процесів гірничого виробництва при складних гідрогеологічних умовах є актуальною науково-практичною задачею.

Метою роботи є розробка підходів щодо оптимізації витрат при спорудженні виробок у складних гідрогеологічних умовах.

Ідея полягає у врахуванні гідрогеологічних чинників при побудові мережевої моделі, яка враховує технологічні процеси при спорудженні та експлуатації виробок.

**Постановка задачі.** Для оптимізації технологічних процесів спорудження та експлуатації виробок в складних гідрогеологічних умовах необхідно:

- встановити зв'язок між гідрогеологічними чинниками та технологічними процесами, які дозволяють мінімізувати негативний вплив водоприпливів у виробки;

- визначити критерії доцільності застосування кріплення;
- запропонувати підхід, а також програмні засоби що дозволить мінімізувати витрати на спорудження та експлуатацію виробок.

**Методи дослідження.** Підземні води негативно впливають на стан виробок та технологічні процеси. У відповідності до поставлених задач нами встановлено зв'язок між гідрогеологічними чинниками та технологічними процесами (табл. 1).

Таблиця 1 – Зв'язок між гідрогеологічними та технологічними чинниками спорудження та експлуатації виробок

Негативний вплив підземних вод	Гідрогеологічний чинник	Технологічний чинник та ризик виробництва
Зниження продуктивності прохідницького обладнання	Питомий водопріток	Зниження продуктивності прохідницького обладнання
	Ступінь обводнення порід та водопроникність	Збільшення строків будівництва та витрат
	Напір підземних вод, потужність водоносного прошарку, водопроникність	Затоплення виробок, додаткові витрати на водовідлив
Зменшення стійкості гірничих виробок	Фільтрація, ступінь водонасичення	Додаткові витрати на кріплення виробок, заходи із боротьби з пученням підшви виробок
Зменшення безпеки праці	Водопріток, водопроникність, фільтрація	Руйнування тимчасового або постійного кріплення
Погіршення роботи транспортного обладнання	Водонасичення	Ускладнення транспорту гірничої маси виробками, збільшення термінів будівництва

Із табл. 1 видно, що проблема вибору кріплення полягає не тільки в обґрунтуванні найбільш безпечного та надійного способу, але і найбільш ресурсозберігаючого. При цьому, окрім вартості слід враховувати і часовий фактор. Тому необхідно спираючись на уявлення про закономірності водопроявів підземних вод у гірничі виробки [1] та досвід вирішення багато параметричних задач гірничого виробництва [2] розробити підхід, який враховує як технологічні так і гідрогеологічні чинники, що дозволить мінімізувати ризики на стадії спорудження та експлуатації виробок.

При виборі кріплення керуються показником доцільності [3, 4], який враховує ймовірнісну надійність та ймовірнісну ефективність

$$k_D = V + k_{ef},$$

де  $k_D$  – коефіцієнт доцільності виду кріплення;  $V$  – ймовірнісна надійність кріплення;  $k_{ef}$  – ймовірнісна ефективність кріплення.

При цьому, якщо ймовірнісна надійність кріплення визначається лише із

досвіду, на основі спостережень за кількістю вивалів та обрушення порід, то ймовірна ефективність характеризується співвідношенням між вартістю закріплення 1 м<sup>3</sup> виробки запропонованим кріпленням до вартості закріплення 1 м<sup>3</sup> – іншим, або еталонним

$$k_{ef} = \frac{Q_{\min}}{Q_{et}}, k_{ef} \rightarrow 1,$$

де  $k_{ef}$  – ймовірна ефективність;  $Q_{\min}$  – вартість закріплення 1 м<sup>3</sup> виробки;  $Q_{et}$  – вартість закріплення 1 м<sup>3</sup> виробки еталонним видом кріплення.

Із визначення ймовірної ефективності слідує, що при  $k_{ef} < 1$  – кріплення доцільно застосовувати, а при  $k_{ef} \geq 1$  – недоцільно.

Таким чином, у якості критерію ефективності кріплення слід обрати вартість закріплення 1 м<sup>3</sup> виробки. Цей показник залежить не тільки від вартості ресурсів але і від узгодженості технологічних процесів на кожному етапі будівництва та експлуатації виробок (табл. 2).

Таблиця 2 – Витрати на спорудження та експлуатацію кріплення

Складові витрат у загальній вартості	Етап спорудження та експлуатації	Ризики пов'язані з водопритоками
Матеріали з, яких буде виготовлено кріплення	Початковий етап	Відсутні
Транспортні та складські витрати	Навантаження, транспорт та розвантаження кріплення	Присутні. Необхідно враховувати водопроникність
Інструменти, часові витрати	Підготовчі етапи (буріння отворів під анкери та ін.). Транспортування гірничої маси	Присутні. Слід мати уявлення про товщину водоносних прошарків масиву
Матеріали, трудомісткість	Спорудження тимчасового кріплення	Присутні. Необхідно аналізувати фільтрацію
Витрати на обслуговування, трудомісткість	Спорудження постійного кріплення та подальша експлуатація	Присутні. Аналізується водоприток у виробки

Незалежно від типу обраного кріплення складові витрат наведені у табл. 2 ідентичні, проте різні на проміжних етапах, тобто при порівнянні набризкбетонного та анкерного кріплення аналізується кількість матеріалів на спорудження кріплення, часові витрати, трудомісткість, проте рівень механізації та технологічні етапи різні. Тому, проблема вибору кріплення полягає у багатоманітності параметрів які слід проаналізувати. На перший погляд вони різні за своєю природою та ступенем впливу на ефективність процесу. Проте, в залежності від етапу зведення кріплення не обов'язково враховувати всі параметри. Тобто при вирішенні задачі пошуку найбільш оптимального транспортного ланцюжку за яким буде доставлене кріплення до виробки недоцільно аналізувати витрати на проведення водовідливних каналок, підривку подошви виробки, а на етапі спорудження тимчасового кріплення

недоцільно приймати рішення про вибір матеріалу. На кожному етапі є свій керуючий параметр, який може бути оптимізований, при цьому інші параметри знаходяться на більш низькому ієрархічному рівні – це і є декомпозиційний підхід. Урахування впливу кожного етапу на загальну ефективність процесу та прийняття єдиного вірного рішення на кожній стадії технологічного процесу дозволяють прийняти оптимальне рішення. Оптимальним будемо вважати кріплення з найменшою вартістю та мінімальними ризиками прояву водопритоків у виробки. Для вирішення цієї проблеми можуть бути застосовані методи динамічного програмування.

**Результати дослідження.** Як зазначалось раніше, незалежно від виду кріплення етапи спорудження та експлуатації виробок ідентичні, тому життєвий цикл кріплення можна представити у вигляді мережевої моделі, яка враховує альтернативні варіанти.

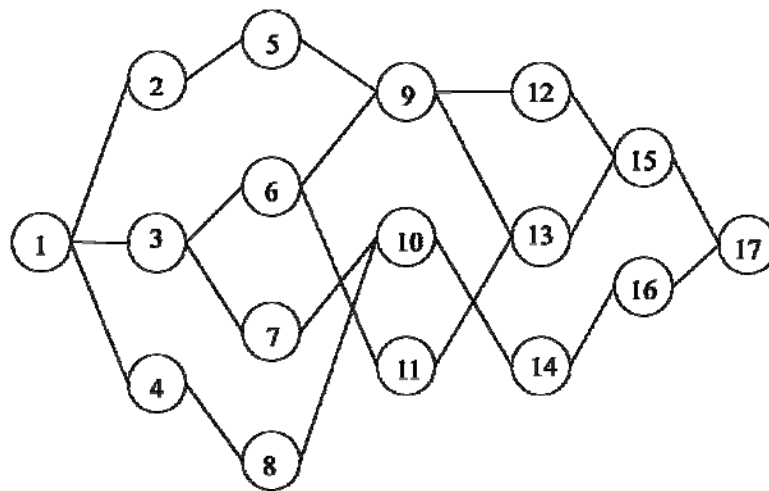


Рисунок 1 – Мережева модель пошуку оптимального виду кріплення

Кожній вершині (1–17) відповідає окреме рішення (альтернатива), яке може бути прийняте, а відстань між вершинами (ребро) має свою довжину, яка відповідає значенню параметра, який слід оптимізувати (собівартість, трудомісткість, часові витрати та ін.). При цьому зв'язки між вершинами є взаємовиключними, тобто, якщо кріплення набризгбетонне (2) або анкерне (3) то можливість повторного застосування відсутня (15), при цьому відсутні витрати і на демонтаж. Теж саме і у зворотному порядку можна розглядати модель, якщо неможливо демонтувати кріплення (16) із виробленого простору, то анкерне кріплення (3) не застосовується.

При цьому модель структурована за етапами (рівнями), тобто вершинами (2–4) можуть відповідати альтернативні варіанти кріплення, (5–8) можливі варіанти транспорту, (9–11) можливі технології зведення тимчасового кріплення і т.д. Для пошуку оптимальної стратегії необхідно, щоб були проаналізовані усі етапи, тобто необхідно знайти найкоротший маршрут від вершини 1 до вершини 17. Сукупність вершин, які відповідають етапам та відстаней між вершинами, які відповідають значенню оптимізаційного параметру формують мережеву модель.

Для знаходження найкоротшого маршруту слід застосувати алгоритм Беллмана-Форда [5]. Логіка пояснюється тим, що процес пошуку оптимального рішення можна проводити, як у прямому порядку від вершини 1 до 17, так, зазвичай, і у зворотному від вершини 17 до 1. Найкоротший маршрут знаходиться наступним чином. Кожне ребро  $(i, j)$  має свою довжину  $t_{ij}$ . У спрямованому ациклічному графові можна помітити вузли цілими числами від 1 до  $N$  таким чином, що для кожного ребра  $(i, j)$  справедлива нерівність  $i < j$ .

Пошук оптимального рішення полягає у знаходженні найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла 17. Нехай  $f_i$  – довжина найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла  $i$ , тоді  $f_1=0$ . З визначення  $f_i$  також виходить, що  $f_i + t_{ij}$  – довжина найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла  $j$  за умови, що останнім ребром маршруту є ребро  $(i, j)$ .

Обов'язкова умова динамічного програмування – безперервність процесу, що оптимізується, тому в даному випадку приймається поетапна зміна стану проектних балансових запасів. Найкоротший шлях від вузла 1 до вузла  $j$  повинен містити деяке ребро в якості кінцевого і тому

$$f_j = \min_{i(i,j)} (f_i + t_{ij})$$

Якщо ребро виходить із вузла  $i$  та входить у вузол  $j$ , то його позначають як  $(i, j)$ . Для усіх ребер, що входять у вузол  $j$ , має місце нерівність  $(i < j)$ . Це означає, що вираз (1) використовується для обчислень  $f_j$  при  $j=1, 2, \dots, 17$ . Замість того, щоб вирішувати задачу безпосередньо, було здійснено занурення її в клас завдань про найкоротший шлях, а саме обчислення  $f_i$  для усіх  $j$ . Така особливість характерна фактично для кожної моделі багатокрокового процесу.

При оптимізації моделі освоєння родовища, окрім принципу оптимуму Р. Беллмана, повинні виконуватись додаткові вимоги [6]:

- при переході з етапу на етап слід враховувати тільки зв'язки-поєднання логічно або технологічно сумісних реальних варіантів;
- на усіх етапах процесу отримання кінцевої продукції діють параметри, які керуються, одним відомством.

Принцип оптимальності для нашого завдання: підшлях найкоротшого шляху сам є найкоротшим шляхом. Більше універсальний варіант принципу включає поняття стратегії.

Стратегія визначає ребро  $(i, j)$ , що входить в кожний з вузлів  $j$ , окрім першого ( $j = 1$ ). Існує безліч стратегій для цієї ациклічної мережі. Стратегія називається оптимальною для вузла  $j$ , якщо вона виявляє ребра, що утворюють найкоротший шлях від вузла 1 до вузла  $j$ . Оптимальна стратегія характеризує оптимальний сценарій освоєння родовища. При цьому для автоматизації процесу слід застосувати програмне забезпечення, адже для моделі (Рис. 1), яка складається з 17 вершин, необхідно проаналізувати  $17^2=289$  можливих варіантів.

При цьому, у залежності від етапу зведення кріплення параметри, які слід враховувати будуть різні.

**Обговорення результатів.** Створений підхід дозволяє враховувати гідрогеологічні параметри. Це здійснюється наступним чином – знаючи ступінь обводненості масиву та його гідрогеологічні характеристики можна передбачити заходи із підвищення стійкості виробок. Наприклад, знаючи, що існує ризик прориву води необхідно застосувати анкерне кріплення, це дозволить зменшити водопроникність води у виробки, а також закласти витрати на проведення каналок під водостік. Додаткові технологічні етапи можна поєднати вже з існуючими. Для цього в мережевій моделі (рис. 1) можна зробити поправку на ступінь гідрогеологічного ризику та закласти певний коефіцієнт збільшення витрат (зафарбовані вершини) на проміжному етапі (хвиляста лінія).

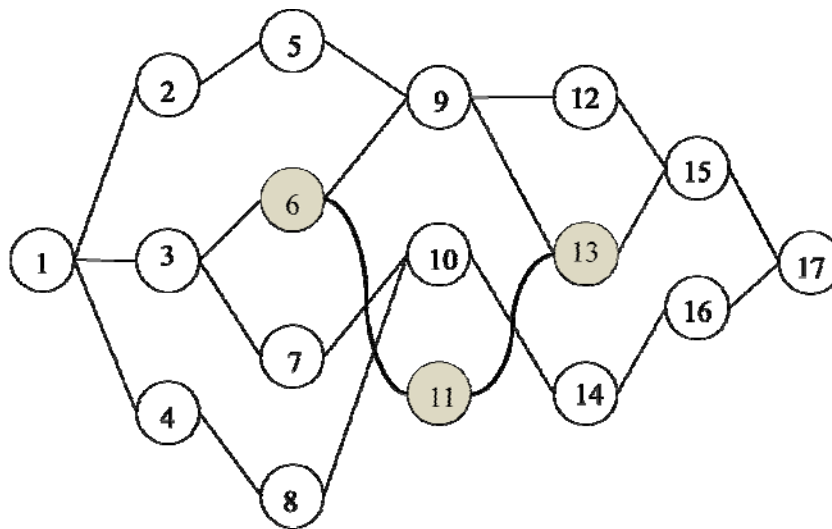


Рисунок 2 – Мережева модель пошуку оптимального виду кріплення з урахуванням гідрогеологічних чинників

І навпаки, при розгляді моделі в зворотному випадку маючи уявлення про застосоване кріплення (наприклад анкерне) можна зробити послаблення зв'язків у моделі (рис. 2) тобто ймовірність водопритоків у виробку буде знижено, що дозволить зменшити витрати на допоміжні операції.

Таким чином, на початку проектувальнику запропоновано мережеву модель, яка дозволяє обирати оптимальне кріплення. У разі відсутності інформації про несприятливі гідрогеологічні чинники пошук кріплення ведеться за параметром «витрати на зведення 1 м<sup>3</sup> виробки» та ін. В разі, якщо відомо, що масив обводнений, то слід певні зв'язки у мережевій моделі підсилити, що відіб'ється з збільшенні витрат, а інші послабити.

На сьогодні в Інституті фізики гірничих процесів НАН України розроблена програма пошуку оптимального маршруту у динамічній моделі на мінімум (програма проходить стадію реєстрації).

Програма дозволяє знаходити найкоротший маршрут в мережевій моделі, який відповідає оптимальному рішення. Запропонована програма може стати складовою модулю з вибору раціонального виду кріплення. У відповідності до технологічних операцій при спорудженні та експлуатації різних видів

кріплення можна створити банк проектних моделей. В подальшому знаючи закономірності поведження масиву в складних гідрогеологічних умовах при застосуванні того чи іншого виду кріплення можна передбачити заходи із підвищення стійкості виробок та мінімізувати витрати. При цьому характерною особливістю алгоритмів динамічного програмування є те, що отримане рішення буде оптимальним на кожному етапі.

Фрагмент робочого вікна програми наведено на рис. 3.

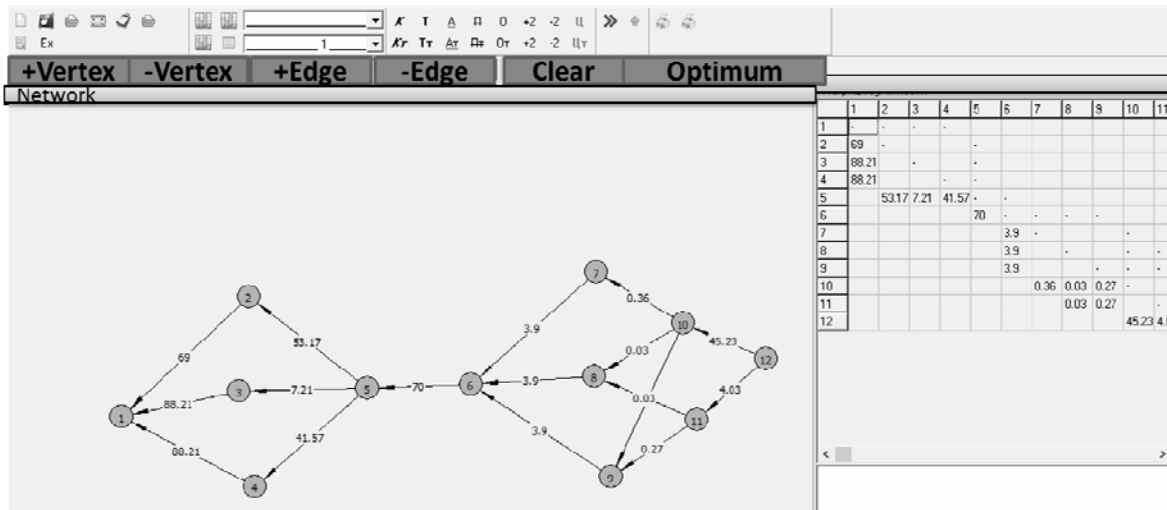


Рисунок 3 – Фрагмент робочого вікна програми

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження встановлено зв'язок між гідрогеологічними характеристиками масиву гірничих порід та технологічними етапами, які їм відповідають. Уявлення про фільтрацію води, обводненість масиву та ін. дозволяє передбачити заходи із підвищення стійкості гірничих виробок та врахувати ризики на стадії проектування. Із визначення «доцільність застосування кріплення» слідує припущення, що загальна ефективність визначається не тільки надійністю засобів підтримання виробленого простору, але і його вартістю, яка в більшій мірі залежить від узгодженості проміжних етапів. Застосування декомпозиційного підходу дозволяє вирішити проблему, яку, на перший погляд, неможливо вирішити, для цього необхідно враховувати ризики та визначити керуючі параметри, які будуть оптимізовані. Подальше представлення усього циклу зі спорудження та експлуатації кріплення у вигляді мережевої моделі дозволяє застосувати алгоритми динамічного програмування. Найявні програмні засоби сприяють створенню банку проектних моделей і рішень, що зробить їх універсальними не тільки у гірництві але і громадському будівництві.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Krukovskiy O. Krukovska V. Vynohradov Y. Mathematical modeling of unsteady water filtration into anchored mine opening // *Mining of Mineral Deposits*. 2017. Vol. 11(2). pp. 21-27.
2. Hrinov V.G. Khorolskiy A.A. Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment // *E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering*, 2018. Vol. 60. pp. 1-10.
3. Kumar R., Kaushik S.C. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. // *Building and environment*, 2005. Vol. 40(11), pp. 1505-1511.



4. Sally S., Pochepov V. Mamaykin O. Theoretical aspects of the potential technological schemes evaluation and their susceptibility to innovations // Progressive technologies of coal, coalbed methane, and ores mining, 2014. pp. 479–483.
5. Goodfellow R., Dimitrakopoulos R. Simultaneous stochastic optimization of mining complexes and mineral value chains // Mathematical Geosciences, 2017. Vol. 49(3). pp. 341-360.
6. Shi Q., Erhan K. New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimization problems // Expert Systems with Applications, 2016. Vol. 43(1). pp. 59-65.

#### REFERENCES

1. Krukovskiy, O., Krukovska, V., and Vynohradov, Y. (2017), "Mathematical modeling of unsteady water filtration into anchored mine opening", Mining of Mineral Deposits, Vol. 11(2), pp. 21-27.
2. Hrinov, V.G. and Khorolskiy, A.A. (2018), "Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment", E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering, Vol. 60, pp. 1-10.
3. Kumar, R., and Kaushik, S. C. (2005), "Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings", Building and environment, no. 40(11), pp. 1505-1511.
4. Sally, S., Pochepov, V. and Mamaykin, O. (2014), "Theoretical aspects of the potential technological schemes evaluation and their susceptibility to innovations", Progressive technologies of coal, coalbed methane, and ores mining, pp. 479–483.
5. Goodfellow, R., and Dimitrakopoulos, R. (2017), "Simultaneous stochastic optimization of mining complexes and mineral value chains", Mathematical Geosciences, Vol. 49(3), pp. 341-360.
6. Shi, Q. and Erhan, K. (2016), "New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimization problems", Expert Systems with Applications, Vol. 43(1), pp. 59-65.

---

#### Про авторів

**Грінюв Володимир Герасимович**, доктор технічних наук, професор, завідувач лабораторії проблем розробки родовищ корисних копалин, Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України (ІФГП НАН України), Дніпро, Україна, [grinevv@ukr.net](mailto:grinevv@ukr.net).

**Хорольський Андрій Олександрович**, кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу управління станом гірничого масиву, Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України (ІФГП НАН України), Дніпро, Україна, [khorolskiyaa@ukr.net](mailto:khorolskiyaa@ukr.net).

**Виноградюв Юрій Олексійович**, кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу управління станом гірничого масиву, Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України (ІФГП НАН України), Дніпро, Україна, [my\\_pochta\\_1r@ukr.net](mailto:my_pochta_1r@ukr.net).

#### About the authors

**Hrinov Volodymyr Herasymovych**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of laboratory, Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine (IPMP, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, [grinevv@ukr.net](mailto:grinevv@ukr.net).

**Khorolskiy Andrii Oлександрovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Researcher, Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine (IPMP, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, [khorolskiyaa@ukr.net](mailto:khorolskiyaa@ukr.net).

**Vynohradov Yurii Oлександрovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Junior Researcher, Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine (IPMP, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, [my\\_pochta\\_1r@ukr.net](mailto:my_pochta_1r@ukr.net).

---

**Аннотация.** В статье описан новый подход к определению оптимальных параметров процесса сооружения выработок в сложных гидрогеологических условиях. Установлено, что проектирование технологии крепления выработок состоит в определении совокупности взаимосвязанных во времени и пространстве процессов по изготовлению, транспортировке, сооружению временного и постоянного крепления. В работе предложена модель для поиска оптимального вида крепления с позиции минимизации расходов на строительство и обслуживание выработок. Идея заключается в представлении этапов по сооружению выработок в виде сетевой модели и применении алгоритмов динамического программирования для оптимизации процесса на каждом промежуточном этапе. Это позволяет перейти от многообразия (по своей природе) к приоритетным управляющим факторам, которые влияют на эффективность процесса – таким образом, достигается оптимизация параметров процесса сооружения выработок. Особое внимание уделено исследованию механизмов поведения массива в сложных гидрогеологических условиях. В зависимости от вида и проявления подземных вод учитываются различные критерии оценки: водоприток, фильтрация, водопроницаемость и др. На основе представлений о гидрогеологических характеристиках массива горных пород можно проанализировать целесообразность применения того или иного вида крепления с учетом вспомогательных этапов. И наоборот, исходя из имеющегося вида крепления можно предсказать поведение массива горных пород. Таким образом, проблема обеспечения устойчивости выработок в сложных гидрогеологических условиях входит в класс задач динамического программирования и связана с исследованием технологических аспектов физики горных процессов. Характерной особенностью этой проблемы является наличие взаимобратных связей между технологией сооружения и горно-геологическими условиями, когда гидрогеологические характеристики массива влияют на технологию, и наоборот. Учитывая вид и характер проявления водопритока в горные выработки можно задавать приоритетные управляющие факторы с разной степенью «веса». Применение сетевых моделей

и алгоритмов динамического программирования позволяют оптимизировать процесс сооружения выработок, как в целом, так и на промежуточных этапах. Особое внимание уделено разработке программного обеспечения.

**Ключевые слова:** оптимизация параметров, сетевая модель, программное обеспечение, гидрогеологические характеристики, крепление выработок.

**Annotation.** In the article, a new approach to identification of optimal parameters for the process of support setting in the mine in difficult hydrogeological conditions is described. It is established that development of the support setting technologies consists in determination of a set of interrelated in time and space processes of manufacture, transportation, construction of temporary and permanent supports. In the article, a model is proposed for searching an optimal type of supports in terms of minimization of costs for their setting and maintenance in the workings. The idea lies in presentation of stages of the support setting in the form of a network model and appliance of algorithms for dynamic programming for the process optimization at its each intermediate stage. This approach allows to transit from the variety of factors (by its nature) to the priority key factors affecting the efficiency of the process. In this way, optimization of parameters for the support setting process is achieved. Particular attention was focused on studying the mechanisms of massif behavior in difficult hydrogeological conditions. Depending on the groundwater type and manifestation, different assessment criteria are taken into account, namely: water inflow, filtration, water penetration, etc. By basing on understanding of the rock mass hydrogeological characteristics, it is possible to analyze feasibility of using this or that type of supports with taking into account auxiliary stages of their setting. And, on the contrary, by based on the known type of supports, one can forecast behavior of the rock mass. Thus, the problem of providing stability for the working supports in difficult hydrogeological conditions is included into the class of dynamic programming problems and is associated with the study of technological aspects of the mining processes physics. A characteristic feature of this problem is existence of an inverse relationship between the support setting technology and the mining-and-geological conditions when hydrogeological characteristics of the massif affect the technology, and vice versa. Given the type and nature of the manifestation of water inflow into the mine workings, it is possible to specify priority control factors with varying degrees of "weight". Application of network models and algorithms of dynamic programming allow optimizing the process of support setting in general and at the intermediate stages. Particular attention was paid to the software development.

**Keywords:** parameter optimization, network model, software, hydrogeological characteristics, support setting.

*Стаття надійшла до редакції 28.10. 2019*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук. С.П. Мінсьєвим*