

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВУГІЛЬНИХ РОДОВИЩ

*А.О. Хорольський, В.Г. Гріньов, Інститут фізики гірничих процесів НАН України, Україна*

В роботі наведено результати досліджень пов'язаних з аналізом закономірностей формування технологічних схем експлуатації вугільних родовищ. Встановлено, що її рівень залежить від співвідношення потоків вхідних та вихідних ресурсів, котрі можна представити впорядкованою структурою – мережевою моделлю, яка відображає сукупність функціональних зв'язків між засобами механізації, технологічними процесами та ін. Для запровадження наведених підходів було розроблено програмне забезпечення.

В умовах існуючих економічних відносин, навіть в розвинутих країнах, підприємства гірничо-видобувного комплексу працюють зі збитками. В Україні за даними ІЕП НАНУ [1] 82% шахт є збитковими, окрім цього існує проблема проведення фронту підготовчих робіт. Слід зазначити, що у зв'язку з військовими діями на сході країна втратила 63% вугледобувних підприємств при цьому не відбулась диверсифікація виробництва – Україна залишається «сировинною» економікою, тому збереження та нарощування рівня видобутку є запорукою не тільки збереження енергетичного суверенітету, але і чинником, який сприятиме стабілізації діяльності підприємств металургійного, машинобудівного комплексів. В умовах відсутності підтримки підприємств з боку держави вже не можливо вирішувати, якусь окрему задачу, не існує частково «прийнятних» рішень, тобто кожна інновація повинна розглядатись з позиції мінімізації собівартості, зниження витрат на обслуговування, максимізації видобутку та ін. Всім цим вимогам відповідає категорія «ефективність» - відношення корисного ефекту до витрат на його отримання. Тому, дослідження рівня ефективності технологічних схем експлуатації вугільних родовищ дозволяє отримати уявлення про чинники, зв'язки та механізми, котрі формують продуктивність, собівартість та ін. Окрім цього, запропоновані підходи повинні бути універсальними.

Із її визначення слідує, що дана категорія не що інше, як співвідношення витрат (засобів) до отриманого ефекту (результату), тоді, для технологічної схеми можна зробити наступне узагальнення: ефективність схеми утворюється сукупністю потоків ресурсів (засоби механізації, витрати на придбання техніки, вартість обслуговування) на вході та формує загальний рівень видобутку (продуктивності) на виході [2]. При цьому, кінцевий результат залежить від рівня взаємозв'язку, тобто сукупності одночасних процесів, а також від області раціонального проектування. Для систематизації даних наведемо в табл. 1 чинники та умови, які формують ефективність технологічних схем.

Таблиця 1. Чинники та умови формування ефективності технологічних схем

Чинник	Характеристика	Умова формування (відповідна чиннику)	Характеристика
технологічний	сукупність умов застосування засобів механізації або характеристики родовища	область раціонального проектування	сукупність умов застосування є раціональним та забезпечує заданий рівень видобутку
експлуатаційний	засоби механізації, технологічні операції та ін., які функціонують	рівень взаємозв'язку	сукупність одночасних виробничих операцій

	(відбуваються) в межах області експлуатації		
економічний	оцінка кінцевих рішень	баланс між потоками вхідних та вихідних ресурсів	витрати на придбання техніки або створення технологічного процесу мінімальні, а ресурс або отриманий об'єм продукції максимальний

Наведені в табл. 1 чинники та умови є загальними, але насправді, їх значно більше – також слід враховувати соціальні, ергономічні та ін. фактори. Роботи [3-6] присвячені вирішенню проблем ефективної експлуатації технологічних схем. Для наочності представимо дані в табл. 2.

Таблиця 2. Аналіз праць присвячених вирішенню проблем ефективної експлуатації технологічних схем

Дослідник (група дослідників)	Країна	Наукова новизна
Сургай М.С., Кіяшко Ю.І., Виноградов В.В. [3]	Україна	Розроблено та впроваджено на галузевому рівні методику оцінки техніко-економічного стану вугільних шахт України, на базі якої розроблено підхід до створення еталонних моделей роботи високонадійних шахт.
Мамайкін О.Р. [4]	Україна	Обґрунтовано параметри технологічних схем антрацитових шахт для їх адаптації до інновацій.
Баскетін А. [5]	США	Застосовано АНР (МАІ) підхід - метод багатокритеріальної оптимізації для вирішення задач підвищення експлуатації родовищ корисних копалин.
Гайдар А., Наоум О., Хоус С., Тах Дж. [6]	США	Застосовано генетичні алгоритми оптимізації технологічних схем.

Аналіз праць [3-6] свідчить про те, що незважаючи на велику кількість існуючих підходів, засобів до підвищення ефективності проблема є недостатньо вирішеною. По-перше, це пояснюється «багатофакторністю» - неможливо розглядати кінцевий результат, як похідну від оптимізації або покращення окремого процесу, явища; по-друге, кожне дослідження базується на врахуванні одного параметру або групи чинників, в той же час не враховуються умови функціонування або взаємозв'язки між процесами. Значний внесок для вирішення даних задач та проблем пов'язаних з інтенсифікацією процесів гірничого виробництва внесли вчені Інституту фізики гірничих процесів НАН України. В.Г. Грінювим розроблено наукові основи та підходи до вибору очисного обладнання, керування процесами зміни стану мінеральних ресурсів вугільного родовища, оцінки та стабілізації стану вугільної та суміжних галузей. Подальші дослідження, пов'язані з пошуком раціональної області експлуатації, дослідженням

фактичної номенклатури обладнання, розробкою відповідних рекомендацій відбиті в працях співробітників інституту: П.П. Ніколаєва, П.В. Череповського, О.П. Каліущенко, О.І. Деуленко, В.Г. Синкова та ін. З 2015 р. і по теперішній час ведеться робота над систематизацією отриманих даних [7], узагальненням і розробкою універсальних підходів до вибору очисного обладнання [8], підвищення надійності технологічних схем [9] – все це дозволило розробити універсальний підхід, який базується на урахуванні системних принципів [10, 11]. До системних принципів відносяться: цілісність, ієрархічність, структуризація, системність, множинність. В табл. 3 наведено системні принципи наведеного підходу [12].

Таблиця 3. Системні принципи формування ефективності технологічних схем з заданими параметрами

Системні принципи	Інтерпретація	
	для технологічних ланцюжків обладнання	для технологічних схем
цілісність	сукупність одиниць обладнання (наприклад: кріплення, комбайн, конвеєр) розглядають, як єдине ціле без виокремлення на окремі типи (комбайн та ін.)	сукупність технологічних процесів, операцій або об'єктів інфраструктури розглядають, як єдине ціле
ієрархічність	урахування зв'язків не тільки між типами обладнання, але і між складальними одиницями (наприклад, при виборі конвеєру слід звернути увагу на систему переміщення комбайну)	слід враховувати зв'язки між виробничими операціями, наприклад, при модернізації транспортної мережі аналізують процеси розділення гірничої маси із підготовчих виробок та ін.
структуризація	можливість оптимізації не тільки всього ланцюжку, але і окремих зв'язків (наприклад, «комбайн-конвеєр», «конвеєр-комбайн» та ін.)	знаходження оптимального рішення на кожному етапі транспортування, видобутку, збагачення та ін.
системність	параметри області застосування кожного типу очисного обладнання (потужність пласта, кут падіння, довжина вибою) відповідають умовам експлуатації технологічного ланцюжку	при модернізації технологічної схеми враховується тип корисної копалини, характеристики рельєфу місцевості або породи покрівлі, підшви та ін.
множинність	наявність стандартних мережевих моделей для різних умов експлуатації	для набору технологічних циклів існує «банк» прийнятних рішень

Основною вимогою при розробці підходу на базі системних підходів є можливість структурної оптимізації. Процес отримання серії системних ефектів з метою оптимізації прикладної мети в залежності від заданих обмежень називається структурною оптимізацією. Після встановлення системних принципів, визначення чинників та умов, які впливають на рівень ефективності слід зосередити увагу на методологічній частині, тобто, перейти з понятійного рівня на категорійний. Сьогодні існує ряд методів і засобів підтримки прийняття рішень в гірничому виробництві, які спрямовані на вдосконалення процесу видобутку [13–17]. Найбільш часто використовують методи теорії прийняття рішень (MCDA), суть яких полягає

в розстановці пріоритетів, виборі найбільш значущих чинників з подальшою оптимізацією. Варто зазначити, що в результаті застосування MCDA отримане рішення буде не оптимальним, а ефективним відповідно до заданої функцією «корисності».

У гірничій справі використовується метод аналізу ієрархій АНР (MAI), який був розроблений Т. Сааті та адаптований до умов функціонування підприємств гірничодобувного комплексу вченими: М. Атаеї [M. Ataei] [13], С. Алпай [S. Alpay]. Однак, існує ряд труднощів: важливість і пріоритет критерію встановлює особа приймає рішення (ОПР) - для достовірного прийняття рішень повинна бути узгодженість між ОПР (оптимальність по Парето); велика вибірка і опитування не завжди гарантує правильний вибір, крім того, критерії вибору не завжди відповідають розв'язуваній задачі. З огляду на специфіку гірничого виробництва були розроблені модифікації методу з урахуванням відхилень від моделі раціонального вибору (TODIM) [14], а також відхилень від «ідеального» значення з наступною нормалізацією [15] (Grey-АНР).

Так само, набув поширення метод аналізу переваг (PROMETHEE), суть якого полягає в завданні функції переваги, порівняно варіантів і подальшому ранжируванні отриманих функцій переваги. Даний метод використовували Вонг Чен [Wang Chen] для вирішення завдань транспортування вугілля в очисному забої, Чанг Жанпінг [Zhang Jianping] для збалансування поставок матеріалів. Застосування даного важко реалізувати, тому що достовірно не відомі вагові коефіцієнти кожної групи параметрів (обладнання, технологічні параметри, техніко-економічні показники).

Аналіз АНР методу і його різновидів (TODIM, Grey-АНР), а так же методу аналізу переваг PROMETHEE встановив, що існує проблема не співмірності і суперечливості критеріїв вибору. Тому, виникла ідея прийняття «компромісного» вирішення [16]. Даний метод використовувався на стадії проектування транспортних ланцюжків, вирішенні завдань організації виробництва в очисному забої. Однак, існує проблема «нечітких», невизначених об'єктів, у яких різні характеристики, наприклад: стійкість покрівлі, категорія порід підосви виробки та ін. Для вирішення поставленого завдання було запропоновано використовувати методи нечітких множин [17], при цьому для ефективного проектування варто скласти базу «вдалих» проектних рішень, яка може бути представлена графами і мережевими моделями.

Отже, як свідчить аналіз праць [13-17] необхідно, щоб запропонований підхід відповідав наступним вимогам: наочність, можливість зберігання «банку» вдалих рішень, швидкість обробки інформації та універсальність – усім цим вимогам відповідають графи та мережеві моделі. Для підвищення ефективності технологічної схеми будь-яку структуру очисного обладнання або технологічного ланцюжку можна представити у вигляді графу – впорядкованої структури, яка відображає співвідношення між умовами експлуатації, засобами механізації та відповідним рівнем продуктивності. Подальше представлення в вигляді мережевої моделі дозволяє оптимізувати структуру, тобто знайти конфігурацію виробничих взаємозв'язків з найменшим значенням параметру. В роботі [18] описано методологію, а в [19] практичну реалізацію. Кожному набору умов застосування або технологічного процесу відповідає окремий універсальний граф, оптимальному рішенню – найкоротший маршрут в мережевій моделі серед існуючих, при цьому мережеву модель слід вважати впорядкованою, якщо отриманий маршрут є найкоротшим з поміж існуючих (табл. 4).

Слід зазначити, що графова інтерпретація одна з найбільш вдалих та універсальних. Окрім цього, незалежно від способу та методу багатокритеріальної оптимізації на кожному із етапів можна перейти до графів, мережевих моделей і навпаки. Автор всесвітньо відомого АНР (MAI) – методу аналізу ієрархій Т. Сааті відмічає, що графи дозволяють структурувати задачі прийняття рішень, котрі базуються на пріоритетах [20]. Інакше кажучи, якщо розглядаємо технологічний процес в, якому кожна із операцій (етапів) має різний ступінь значущості та впливу, то можна задати ступінь «ваги» ребра, не що інше, як пріоритет (рис. 1).

Із рис. 1 стає зрозумілим, що застосування графів та мереж дозволяє не тільки не тільки відображати дані про наявні взаємозв'язки, але і оцінити пріоритети кожного типу обладнання або процесу на загальний рівень ефективності. Для знаходження єдиного оптимального рішення необхідно за вершини прийняти тип обладнання або етап процесу, а за довжину між

вершинами – значення параметру, який слід мінімізувати. Для підвищення розмірності задач, які можуть бути вирішені в гірництві застосовують алгоритми оптимізації на мережах та графах.

Таблиця 4. Терміни та умовні позначення, які використані при розробці системних підходів до підвищення ефективності технологічних схем

Термін	Умовне позначення	Характеристика
універсальний граф		уніфікована форма відображення даних про технологічні схеми та відповідні їм умови функціонування
параметри	потужність пласта, м	
	довжина вибою, м	
	видобуток, т/доб.	
	альтернатива	
мережева модель		уніфікована форма відображення даних про раціональні типи очисного обладнання, які представлені вершинами, та відповідний їм рівень оптимізаційних параметрів, який виражається довжиною між цими вершинами
оптимізація		визначення структури технологічного процесу з найменшим значенням оптимізаційного параметру (зазвичай оптимальний маршрут виділяють іншим кольором, а вершини закреслюють) з поміж існуючих варіантів
впорядкування		визначення структури очисного обладнання з найменшим значенням оптимізаційного параметру з поміж можливих (маршрут виділено пунктиром)

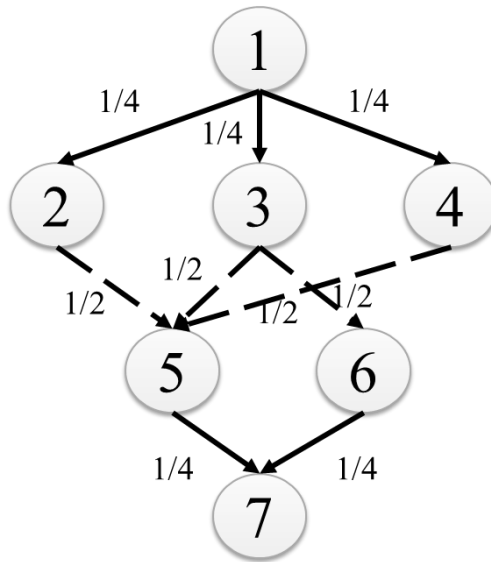


Рис. 1. Мережева модель технологічного процесу з різними ступенями пріоритету

Для запровадження розглянутих методів було розроблено відповідне програмне забезпечення (рис. 2).

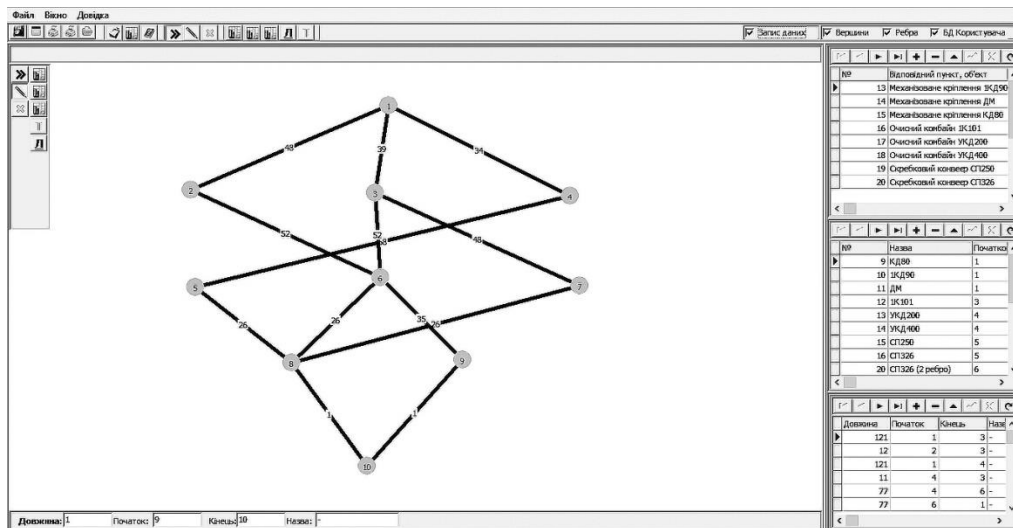


Рис. 2. Робоче вікно програми

Для оптимізації технологічного процесу на робочу область вікна слід нанести точки, котрі відповідають етапу, засобу механізації та ін., а за відстань прийняти значення оптимізаційного параметру. Програма автоматично визначить оптимальне рішення. Слід зазначити, що характерною особливістю програми є властивість «структурної оптимізації» - тобто серії системних ефектів в залежності від заданих обмежень. Інакше кажучи, кінцеве рішення залежить від набору умов експлуатації та побажань проектувальника. В табл. 5 наведено область застосування наведених підходів.

Як видно із табл. 5 область застосування наведених підходів досить різноманітна та не обмежується потребами вугільної промисловості. Графова інтерпретація демонструє закономірності формування рівня ефективності технологічних схем, яка характеризується співвідношенням потоків вхідних та вихідних ресурсів. Більш того, топологічна модель побудови графу демонструє сукупність функціональних зв'язків між засобами механізації, виробничими операціями та ін.

Таблиця 5. Область застосування наведених підходів

Галузь	Основне призначення	Допоміжне призначення
вугільна	проектування технологічних схем видобутку, транспортування, збагачення вугілля; збалансування транспортних потоків корисної копалини та допоміжних матеріалів; розробка планів ліквідації аварій, зниження витрат на ремонт та обслуговування;	наявність інформації про раціональну область експлуатації для технологічних схем;
розробка рудних родовищ корисних копалин	проектування транспортних ланцюжків, організація виробничого циклу з видобутку корисної копалини;	наявність «банку» вдалих рішень – це дозволить здійснювати оперативне керівництво розвитком гірничих робіт;
машинобудівна галузь	проектування виробничого циклу з виготовлення обладнання; зниження витрат на складальні операції;	оцінка пріоритетів на виготовлення обладнання;
альтернативна енергетика	проектування схем розміщення вітряків, сонячних батарей та ін.;	топологічні моделі;

В результаті проведеного дослідження було встановлено, що ефективність технологічної схеми це інтегральний показник, який формується групою технологічних, експлуатаційних, економічних чинників в межах області раціонального проектування та залежить від функціональних зв'язків. При цьому ефективність функціонування підприємства прямо пропорційно залежить від рівня взаємозв'язку між засобами механізації і обернено пропорційно від задіяних ресурсів. Характерною особливістю інструментів описаних в роботі є можливість застосування їх в сукупності з MCDA методами на будь-якій стадії дослідження, а також в якості доповнення до існуючих підходів.

#### Список літератури

1. Концептуальні положення щодо інституціонального забезпечення ефективності господарювання у вугільній промисловості (наукова доповідь) / О.І. Амоша, Л. Л. Стариченко, Д. Ю. Череватський [та ін.]. Київ: Інститут економіки промисловості НАН України, 2015. 32 с.
2. Хорольський А.О. Формування структури комплексного механізованого вибою з заданим рівнем видобутку / А.О. Хорольський, В.Г. Гріньов // Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2018: Матеріали міжнародної конференції, 27–28 квітня 2018 р. – Дніпро: Національний гірничий університет, 2018. – С. 31–39.
3. Сургай Н.С., Виноградов В.В., Кияшко Ю.И. Производительность очистных комплексов нового технического уровня и пути её повышения. Уголь Украины. 2001. № 6. С. 3-7.
4. Мамайкін О.Р. Обґрунтування параметрів технологічних схем антрацитових шахт для їх адаптації до інновацій: автореф. дис. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук: спец. 05.15.02

- «Підземна розробка родовищ корисних копалин» / О.Р. Мамайкін. – Дніпропетровськ. – 21с.
5. Bascetin A., Oztas O., Kanli A. EQS: a computer software using fuzzy logic for equipment selection in mining engineering. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2006. Vol. 106. pp. 63 – 70.
  6. Haidar A., Naoum S., Howes R., Tah J. Genetic Algorithms Application And Testing For Equipment Selection. *Journal of Construction Engineering and Management*. 1999. Vol. 1. pp. 32–38.
  7. Хорольский А.А. Совершенствование технологии механизированной добычи угля на основе рационального выбора комплектаций очистного оборудования / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев, В.Г. Сынков // *Материалы международной конференции «Форум горняков – 2016»*, 5 октября – 8 октября 2016 г., Днепропетровск. – Д.: Национальный горный университет, Т2. – С.158–167.
  8. Гринев В.Г. Графы и сети для выбора горно-шахтного оборудования. Днепропетровск, 2016. 247 с.
  9. Хорольский А.А. Сетевые модели как инструмент повышения организационно технологической надежности производства / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // *Материалы V Международной научно-практической интернет-конференции «Инновационные технологии в образовании, науке и производстве»* (18-19 ноября 2017 г). Минск : Белорусский национальный технический университет. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/36360>.
  10. O'Connor, J., & Mc. Dermott, I. (1997). *The art of systems thinking: essential skills for creativity and problem solving*. London: Thorsons.
  11. Khomenko, O., Kononenko, M., & Myronova, I. (2017). Ecological and technological aspects of iron-ore underground mining. *Mining Of Mineral Deposits*, 11(2), 59-67. <https://doi.org/10.15407/mining11.02.059>.
  12. Хорольський А.О. Системні принципи та оціночний критерій надійності при оптимізації технологічних схем вугільних родовищ / А.О. Хорольський, В.Г. Грінєв // *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. Серія: «Технічні науки». — 2017. — № 2(80). — С. 199–207.
  13. Ataei, M.; Jamshidi, M.; Sereshki, F., & Jalali I. (2008). S.M.E. Mining method selection by ANP approach. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 108(12), 741-749.
  14. Dehghani, H., Siami, A., & Haghi, P. (2017). A new model for mining method selection based on grey and TODIM methods. *Journal of Mining & Environment*, 8(1), 49-60. <http://dx.doi.org/10.22044/JME.2016.626>.
  15. Tzeng, G., & Huang, J. (2011). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Boca Raton, FL, USA: Chapman and Hall/CRC Press.
  16. Vujić, S., Miljanović, I., Milutinović, A., Đorđević, D., Gojković, N., & Gajićet, G. (2011). Multiattributive prediction of terrain stability above underground mining operations. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 21(2), 275-291. <https://doi.org/10.2298/YJOR1102275V>.
  17. Nazimko, V.V. (2013). Pytannia pobudovy systemy avtomatyzovanoho upravlinnia proektom. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, (14), 61-67.
  18. Хорольский А.А. Рациональный выбор состава механизированных комплексов в условиях эксплуатации забоев Донбасса / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев, В.Г. Сынков // *Материалы міжнародної конференції «Форум гірників – 2015»* (30 вересня – 3 жовтня 2015 р.). Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2015. – Т. 1. – С. 58–68.
  19. Хорольский А.А. Выбор комплексов горно-шахтного оборудования на основе теории графов / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев, В.Г. Сынков // *Науковий вісник НТУУ «КПІ»*. Серія: «Гірництво». — 2016. — № 31. — С.57–64.
  20. Saaty, Thomas L. (2008). «Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process». *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)* 102 (2): 251–318.