

УДК 622.22.553.4:519.85

<https://doi.org/10.37101/ftp23.01.012>

**НОВІ ПІДХОДИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ
ПО РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ ВІДПРАЦЮВАННЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ
КОПАЛИН**

В.Г. Грінюв^{1*}, А.О. Хорольський¹

¹Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України,
м. Дніпро, Україна

*Відповідальний автор: e-mail: grinevv@i.ua

**NEW APPROACHES AND RESULTS OF RESEARCHES
ON RATIONALIZATION OF EXTRACTION OF MINERALS FROM
BOWELS OF THE EARTH**

V. Hrinov^{1*}, A. Khorolskyi¹

¹Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of
Ukraine, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: e-mail: grinevv@i.ua

ABSTRACT

Purpose. Ground of space of planning - area that on the base of well-known criteria of efficiency and methods of optimization is certain all project parameters and can provide rationalization of working off a deposit from the bowels of the earth.

Methods. Rationalization of working off the deposits of minerals can be realized due to possibility of application of well-known methods of optimization criteria of efficiency for the choice of technological parameters in difficult tasks.

Findings. Software is from specialized computer programs in relation to the choice of optimal acquisitions of cleansing equipment, for being of the shortest routes in a network to the model, dynamic programming of alternative count on a minimum, determination of rational level of products, for making decision in the conditions of vagueness.

Originality. Results of research for methodologies of the modern planning of parameters of working off strategic and critical mineral resources are new approach of ground of area of effective exploitation of deposits within the limits of providing of the rational use of bowels of the earth. For the choice of technological parameters in the difficult tasks of mastering of supplies of minerals from balance to the eventual products application of well-known methods of optimization and criteria of efficiency offer with bringing in of modern information technologies.

Practical implications. Offered approach scientific procedures of making decision allows to ground the area of effective exploitation alternative developers with different rights on using the bowels of the earth and different possibilities after finances, labour and material resources, to conduct the economic overvalue of

supplies of deposits perspective for foreign investments, and also by frequent variant calculations it is possible to ground the change of standards.

Keywords: rational working off deposits, ecology, planning technology, computer program, design of scenarios, dynamic programming, innovation

1. ВСТУП

Потребу нашої держави у відпрацюванні корисних копалин важко переоцінити. В країні наявні родовища рідкісних та благородних металів, горючих корисних копалин, залізорудної сировини та ін. Станом на 2020 рік розвідано понад 8 тисяч родовищ, які включають понад 90 видів корисних копалин. Але наразі належного відпрацювання немає.

Причини цього достатньо описані науковцями та журналістами [1, 2]. Така негативна реальність пояснюється, в першу чергу, браком уваги і державних ресурсів, а також не досить фаховим відношенням до складної науково-технічної проблеми ефективної розробки цінних родовищ з екологічно шкідливим виробництвом, які розташовані фактично в центрі Європи.

Технічно питання здавалося б вирішується просто. Згідно з діючими нормативами обґрунтування способу і системи розробки родовища, виробничої потужності і терміну дії підприємства, видів гірничо-видобувного обладнання, засобів механізації, інших проектних рішень і розрахункових параметрів слід проводити методами, які застосовуються в практиці проектування гірничодобувних підприємств, з використанням чинних галузевих норм технологічного проектування, державних будівельних норм, проектів діючих підприємств-аналогів, даних науково-технічних досліджень.

Однак діючі нормативи для визначення оптимальних варіантів промислового освоєння геологічних об'єктів стратегічних та критичних мінеральних ресурсів в даний час не працюють тому, що таких аналогів розробки, наприклад, золоторудних родовищ немає ні в Україні, ні в Європі. Також в Європі не має вже вугільних підприємств. Значний досвід і прогресивні технології вилучення з надр благородних металів існують на американському, азіатському і африканському континентах [3, 4].

Крім того, зараз в цивілізованих країнах, все частіше, в якості головного критерію для ухвалення рішень при освоєнні ресурсів надр, на перше місце виходить екологічний аспект. Його оцінку можна здійснити тільки за рахунок здійснення фінансового порівняння двох сценаріїв освоєння родовища – оптимального з економічної точки зору з екологічно переважним.

Таким чином, перш ніж займатися розробкою технічних рішень, проектуванням і впровадженням тієї або іншої технології видобутку і переробки корисної копалини, необхідно проводити зіставлення і аналіз можливостей розробника і показників родовища. З одного боку виступає власник ліцензії з правом на користування надрами і його фінансовими та іншими ресурсами, з іншого боку аналізуються усі геолого-технічні дані родовища на конкретній території. На цьому матеріалі, використовуючи відомі критерії ефективності і методи оптимізації, можна обґрунтувати простір проектування [5] – область, визначену усіма проектними параметрами, які можуть забезпечити раціональну експлуатацію родовища.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Особливістю ефективного освоєння запасів стратегічних мінеральних ресурсів, наприклад, рідкісних і благородних металів, а також критичних у вигляді родовищ вугільній галузі є необхідність організації раціональної експлуатації таких родовищ на базі вирішення багатьох питань, які не пов'язані безпосередньо з гірничими роботами [6, 7]. Для освоєння родовищ корисних копалин з мінімальними витратами, мінімально можливим збитком і максимальним прибутком потрібна узгоджена взаємодія в межах екологічних норм будівництва, видобутку, транспорту і переробки, як ланок однієї системи, яка працює на кінцевий результат у вигляді ринкового товару.

Наукові підходи щодо раціоналізації відпрацювання родовищ корисних копалин шляхом створення оптимального проектування інтенсифікації видобутку корисних копалин повинні бути пов'язані із залученням сучасних інформаційних технологій [8], що забезпечить екологічність, раціональне використання надр, безпеку ведення гірничих робіт та підвищення якості видобутої сировини.

Для обґрунтування методології сучасного проектування освоєння родовищ до виробництва кінцевої продукції необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити особливості відпрацювання родовищ корисних копалин, які полягають в організації заходів, які безпосередньо не пов'язані з процесами експлуатації та отримання кінцевої продукції, що дозволить визначити наявні резерви підвищення ефективності;
- проаналізувати наявні світові підходи, інструменти щодо вирішення проблеми інтенсифікації видобутку корисних копалин, що дозволить обґрунтувати основні напрямки створення нової технології у галузі сталого природокористування;
- запропонувати підходи та інструменти щодо визначення раціональних обсягів рівня виробництва;
- дослідити основні тенденції щодо розробки, впровадження, застосування технологічних схем, технологій, заходів та засобів отримання проектних рішень для удосконалення видобутку корисних копалин, що дозволить запропонувати нові методологічні підходи до процесу проектування;
- запропонувати підхід щодо мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище процесів розробки родовищ на етапах виробництва, який буде включати ранжування ризиків, пов'язаних з відпрацюванням запасів родовищ критичних та мінеральних ресурсів до кінцевої продукції, що стане запорукою раціонального природокористування;
- розробити комплексні рекомендації з визначення оптимальних параметрів технології інтенсифікації видобутку корисних копалин з урахуванням особливостей родовища.

Новітні технології проектування повинні поєднати в собі аналіз економічних та екологічних стратегій відпрацювання родовищ корисних копалин на основі оптимізації мережевих моделей, які є відображенням процесу зміни стану запасів родовища від балансових запасів до кінцевої продукції, що включає відходи виробництва [9]. Технологічні та технічні рішення можуть базуватися на розрахунках методом дослідження операцій із застосуванням

критеріїв прийнятих рішень в умовах невизначеності. Характерною особливістю створеного таким чином проекту буде комплексність, яка містить в собі не тільки методологічну базу до розробки стратегії відпрацювання родовищ, але і включає в себе технологічні схеми та рішення для впровадження оптимальної стратегії [10].

Для вирішення поставлених завдань та автоматизації процесу прийняття рішень, а також значного розширення області застосування вказаних підходів та збільшення розмірності задач, в сучасних умовах дуже актуальна постановка задачі щодо створення програмного забезпечення. Відповідне програмне забезпечення повинно включати мінімальний пакет комп'ютерних програм із сучасним інтерфейсом, який може реалізувати можливості рішення складних багатопараметричних задач щодо вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання, знаходження найкоротших маршрутів в мережевій моделі динамічного програмування альтернативного графа на мінімум, визначення раціонального рівня продукції, а також прийняття рішень в умовах невизначеності.

Очікувані результати дослідження по оптимальному проектуванню параметрів експлуатації родовищ цінних корисних копалини України будуть основою методології рішення складних завдань. За допомогою цього інструментарію можна готувати обґрунтування для вмотивованого ухвалення рішень власником ліцензії з основних питань технічного завдання на проектування розробки родовища, яке розташоване на території України.

Область застосування запропонованої екологоорієнтованої технології оптимального проектування інтенсифікації гірничо-збагачувальних процесів при розробці родовищ корисних копалин не повинна залежити від виду корисної копалини, тому визначення сценарію виробництва кінцевої продукції, для конкретного родовища, слід здійснювати за рахунок моделі зміни стану запасів копалини від балансових до кінцевої продукції, яка після перетворення ациклічних графів в мережу може бути оптимізована за допомогою програмного забезпечення. Така технологія може бути застосована при освоєнні як стратегічних мінеральних ресурсів так і критичних ресурсів.

3. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проблеми розробки родовищ багато в чому пов'язані з технологічними аспектами фізики гірничих процесів, які супроводжують відпрацювання корисних копалин з надр. Класичне енциклопедичне формулювання гірничої технології таке, що вона є сукупністю прийомів і способів зміни природного стану надр Землі [11]. Її розвиток пов'язаний з необхідністю впровадження усе більш досконалих технічних засобів, а технологічна схема гірничовидобувного виробництва реалізується у вигляді ланцюга послідовно здійснюваних процесів і включає ланки основні і допоміжні.

Сучасний рівень експлуатації родовищ пред'являє високі вимоги до інженерного забезпечення підземних гірничих робіт і обґрунтованості рішень, що приймаються. Число проектних параметрів характеризує міру складності цього завдання. Проектні параметри це незалежні змінні, які визначають ви-

рішувану задачу. Гірництво припускає багато процесів, які неможливо описати функцією однієї змінної, тому на практиці найчастіше доводиться мати справу із недовизначеними завданнями, або коли невідомих параметрів n більше ніж рівнянь m ($m < n$). Таке завдання має нескінченну безліч рішень [12].

У випадку коли параметрів три і більше, то цільовою функцією буде $(n+1)$ -мірна гіперповерхня, яка не піддається зображенню звичайними засобами. Для ухвалення рішення такого завдання застосовуються методи оптимізації у багатовимірному просторі [13].

Область, що визначена усіма n проектними параметрами – це є простір проектування. Для гірничих завдань введено поняття області раціонального проектування (межа життєздатності проекту) [14]. Ця область обмежена показниками родовища і можливостями розробника. Об'єкт експлуатації: можливість видобутку сировини за певною технологією і конкретними витратами, вилучена цінність родовища з надр, міра освоєння території, можливість збагачення і збуту продукції. Суб'єкт в ролі власника ліцензії: фінансові можливості (свій банк, пільговий кредит, субсидія держави), матеріальні і трудові ресурси, можливість реалізації продукції (доля в кінцевій продукції).

Простір проектування не такий великий, як може здатися, оскільки він, зазвичай, обмежений рядом умов, пов'язаних з фізичною суттю завдання. Обмеження можуть бути такими сильними, що завдання не матиме жодного задовільного рішення [13].

Для обґрунтування простору проектування раціональної експлуатації родовища необхідно дослідити можливість застосування відомих методів оптимізації і критеріїв ефективності для вибору технологічних параметрів в складних багатопараметричних завданнях. У перелік пріоритетних напрямів методології підготовки завдання на проектування конкретного родовища входять наступні:

- вибір оптимальних комплектацій очисного обладнання;
- знаходження найкоротших маршрутів в мережевій моделі;
- динамічне програмування альтернативного графа на мінімум;
- визначення раціонального рівня продукції;
- прийняття рішень в умовах невизначеності.

Проблема **вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання** значною мірою робить вплив на ефективність відпрацювання родовища. Вибір області раціональної експлуатації гірничо-шахтного устаткування входить в клас завдань, характерною особливістю яких є велика розмірність, що обумовлює необхідність пошуку ефективніших алгоритмів оптимізації. Ідея роботи полягає в рішенні багатовимірної комбінаторної задачі ефективного вибору комплексу типів очисного устаткування на основі класичних алгоритмів оптимізації на мережах і графах [15]. Застосування графів дозволяє в наочній та компактній формі систематизувати дані, провести розподіл комплектацій за показниками продуктивності, визначити раціональний склад видобувного комплексу для умов експлуатації.

Для пошуку раціональних технологічних ланцюжків очисного обладнання необхідно проаналізувати дані про фактичні показники роботи очисних вибоїв. Тому при дослідженні слід враховувати період, коли кількість фактич-

них альтернатив була найбільша, а це був період у 2008–2010 рр. Область експлуатації очисного обладнання в діапазоні потужностей пласта 0,90–2,60 м; довжини вибою 200–350 м; кута падіння до 25°. Для аналізу, систематизації та представлення даних використовувались графи, тобто математичний об'єкт, який представляє собою множину вершин та пар ребер, які поєднані з цими вершинами [16].

Якщо задати певні значення вершинам і дугам, тоді технологічне завдання представляється мережевою моделлю, а це значно спрощує рішення такої задачі, оскільки відомо багато алгоритмів оптимізації. При підборі алгоритмів оптимізації рішення цих завдань слід враховувати, що не існує універсального алгоритму, який дозволяв би вирішувати будь-які завдання. Крім того, вирішуючи складні завдання оптимізації, необхідно користуватися різними методами, оскільки це дає можливість збільшити вірогідність вдалих варіантів [17].

Для вирішення такого завдання, як пошук оптимального ланцюжка при виборі устаткування, був знайдений і застосований до вирішення практичних питань алгоритм [18], який дозволяє знаходити в графі найкоротший шлях між двома виділеними вершинами і при позитивних довжинах дуг. Цей алгоритм рішення задачі, запропонований в 1959 р. Дейкстрою [9], вважається одним з найбільш ефективних.

Формальний опис алгоритму Дейкстри пошуку найкоротшого шляху [19]:

Крок 1. Перед початком алгоритму усі вершини і дуги не забарвлені.

Кожній вершині в ході виконання алгоритму присвоюється значення $d(x)$, яке відповідає найкоротшому маршруту із s в x , та включає тільки забарвлені вершини.

Покласти $d(s) = 0$ і $d(x) = \infty$ для усіх x , відмінних від s . Забарвити вершину s і покласти $y = s$ (y – остання із забарвлених вершин).

Крок 2. Для кожної незабарвленої вершини x перерахувати величину $d(x)$ таким чином:

$$D(x) = \min \{d(x), d(y) + a(a, x)\}. \quad (1)$$

Якщо $d(x) = \infty$ для усіх незабарвлених вершин x , закінчити процедуру алгоритму: в початковому графові відсутні шляхи з вершини s в незабарвлені вершини. Інакше забарвити ту з вершин x , для якої величина $d(x)$ є найменшою. Крім того, забарвити дугу, що веде у вибрану на цьому кроці вершину x (для цієї дуги досягався мінімум відповідно до виразу (1)). Покласти $y = x$.

Крок 3. Якщо $y = t$, закінчити процедуру: найкоротший шлях з вершини s у вершину t знайдений (це єдиний шлях з s в t , складений із забарвлених дуг). Інакше перейти до кроку 2.

Для того, щоб описаний вище алгоритм дозволяв отримувати дерево найкоротших шляхів від вершини до усіх інших вершин, його третій крок має бути скоректований таким чином: якщо усі вершини виявляються забарвленими, закінчити процедуру (для будь-якої вершини x є єдиний шлях з s в x , що складається із забарвлених дуг, і цей шлях є найкоротшим між відповідними вершинами); інакше перейти до кроку 2.

У відповідності до задачі пошуку оптимальної комплектації буде запропоновано структуру механізованого комплексу з найменшим значенням питомої собівартості видобутку. Слід зазначити, що чим більше враховують зв'язків між типами очисного обладнання (функціональні зв'язки між кріпленням та комбайном, комбайном та конвеєром в процесі роботи), тим більший резерв до збільшення продуктивності.

Знаходження найкоротших маршрутів в мережевій моделі необхідно для ухвалення рішень по оптимізації параметрів у багатовимірному просторі. Якщо структуру виробничого процесу можна представити у вигляді мережі, то її можна оптимізувати по одному з параметрів (наприклад, собівартість продукції) [8].

Для вирішення таких завдань існують ефективні алгоритми, зокрема відомий алгоритм пошуку на графі найкоротших шляхів між усіма парами вершин, який належить Флойду. У алгоритмі допускаються для довжин дуг негативні значення, але не допускається наявність контурів негативної довжини.

Формальний опис алгоритму Флойду [20]:

Крок 1. Перенумерувати вершини початкового графа цілими числами від 1 до N . Визначити матрицю D^0 , задавши величину кожного її елементу (i, j) рівній довжині найкоротшої дуги, що сполучає вершини i з j . Якщо в початковому графові вказані вершини не з'єднуються дугами, покласти $d^0_{ij} = \infty$. Крім того, для усіх i покласти $d^0_{ii} = 0$.

Крок 2. Для цілого m , послідовно приймаючого значення $1, 2, \dots, N$, визначити за елементами матриці D^{m-1} величини елементів матриці D^m , використовуючи рекурсивні співвідношення,

$$D^m_{ij} = \min \{ D^{m-1}_{im} + D^{m-1}_{mj}, D^{m-1}_{ij} \}. \quad (2)$$

При визначенні величини кожного елементу матриці D^m фіксувати відповідний найкоротший шлях. Після закінчення цієї процедури величина елементів (i, j) матриці визначає довжину найкоротшого шляху, що веде з вершини i у вершину j .

Динамічне програмування альтернативного графу на мінімум.

Особливість відпрацювання родовищ корисних копалин з надр полягає в необхідності вирішення багатьох питань, які не пов'язані з гірничими роботами. Описати однією цільовою функцією усі проєктні параметри того, що будується і експлуатованого гірничо-збагачувального підприємства з видобутку стратегічних або критичних мінеральних ресурсів практично неможливо. У моделі такого процесу логічними зв'язками повинні бути пов'язані варіанти спорудження і експлуатації об'єктів енергопостачання, транспорту, соціально-побутові, поверхневого і підземного комплексів гірничо-збагачувального підприємства [21]. Питання про можливість відображення усіх головних особливостей такої системи в одній моделі може розглядатися на основі динамічного програмування. Динамічне програмування альтернативного графу на мінімум базується на наступному:

- на принципі оптимуму Р. Беллмана [22], який полягає в тому, що рішення, яке приймається на кожному етапі процесу, має бути найкращим по відношенню до процесу в цілому;

- 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.

Модель такого процесу відпрацювання родовищ може бути побудована у вигляді альтернативного графу, в якому дуги графу (логічні зв'язки) представлені числовими значеннями витрат або формалізацією виробничих процесів керуючими параметрами.

При виборі сценарію освоєння такого родовища інфраструктура району, в якому воно розташоване, видобуток, транспортування і переробка руди розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної складної системи у вигляді моделі зміни стану запасів родовища від стадії розвідки до списання запасів з балансу, а також проводиться економічна оцінка, зважаючи на екологічний аспект освоєння родовищ. Така структура математичної моделі освоєння родовищ корисних копалин повністю співпадає з обов'язковими умовами методики оптимізації альтернативного графу методом динамічного програмування [14].

Завдання слід представити у вигляді пошуку найкоротшого шляху в орієнтованому ациклічному графі. Орієнтований граф складається з непорожньої кінцевої множини вузлів S і підмножини T множини SS .

Елементи множини називаються дугами. Наявність дуги (i, j) вказує на можливість руху вузла i до вузла j . Шляхом (i_1, i_2, \dots, i_n) називається кінцева послідовність вузлів таких, де (i_k, i_{k+1}) є спрямованою дугою $k=1, 2, \dots, n-1$. У спрямованому ациклічному графові можна помітити вузли цілими числами від 1 до N таким чином, що для кожної дуги (i, j) справедлива нерівність $(i < j)$.

Нехай f_i – довжина найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла i , тоді $f_i = 0$. З визначення f_i також виходить, що $f_i + t_{ij}$ – довжина найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла j за умови, що останньою дугою шляху є дуга (i, j) .

Найкоротший шлях від вузла 1 до вузла j повинен містити деяку дугу в якості кінцевої і тому [5]

$$f_i = \min_{i(i,j)} (f_i + t_{ij}) \quad (3)$$

Безліч рішень оптимізаційних завдань описується функціональним рівнянням, аналогічним рівнянню (3). Функціональне рівняння є системою рівнянь, які зв'язують декілька оптимізаційних завдань. У такій системі кожне рівняння відповідає одному вузлу. Рішення безлічі оптимізаційних завдань можна знайти за допомогою, так званого, алгоритму зворотного прогону, який рівнозначний впорядкованій процедурі рішення послідовності функціональних рівнянь.

Формальний опис алгоритму зворотного прогону [23]:

Крок 1. Покласти $v_1=0$ та $v_k=\infty$ для $k=1, 2, \dots, N$. Покласти $j=2$.

Крок 2. Для кожної дуги (i, j) , що входить у вузол j , покласти

$$v_j \leftarrow \min(v_j, v_i + t_{ij}) \quad (4)$$

Крок 3. Зупинитися, якщо $j=N$. Інакше $j \leftarrow (j+1)$ та повернутись до кроку 2.

Крок 2 полягає в заміні v_j на $v_i + t_{ij}$ всякий раз, коли остання величина менша за v_j . Цей крок виконується для кожної дуги, що входить у вузол j , при цьому порівняння робиться за зростанням номерів i . Крок 2 закінчується при $v_i = f_j$.

Таким чином, алгоритм зворотного прогону дозволяє отримати довжину найкоротшого маршруту (шляху), але не сам маршрут. Для знаходження найкоротшого шляху треба запам'ятовувати номери дуг (i, j) , які складають маршрут довжиною v_j .

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

Стратегія визначає дугу (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 дуги, що утворюють найкоротший шлях від вузла 1 до вузла j . Оптимальна стратегія характеризує оптимальний сценарій освоєння родовища.

Більш детально цей підхід описаний у відповідності до прикладів освоєння родовищ золота в роботах [14, 24].

Визначення раціонального рівня продукції можна зробити за допомогою маржинального підходу, який у форматі ринкової економіки дає класичні результати за умови достовірності початкових даних, як для стратегічних мінеральних ресурсів так і критичних [12, 25].

Формальний опис алгоритму визначення рівня виробництва продукції з надр [26]. Початкові дані для розрахунків необхідних показників:

- загальна кількість одиниць продукції за певний період часу, Q : 1, 2, ... 10, одиниці;
- сукупні постійні витрати на одиницю продукції, TFC_{0-10} , грошові од.;
- сукупні змінні витрати на одиницю виробленої продукції, TVC_{0-10} : $TVC_0, TVC_1 \dots TVC_{10}$, грош. од.;
- ціна одиниці продукції в цей часовий період P , граничний дохід MR , $P = MR$, грош. од.

Порядок розрахунку даних таблиці обсягу виробництва, який максимізує прибуток підприємства.

- Валові витрати, TC , грош. од.: $TC_{0-10} = TFC_{0-10} + TVC_{0-10}$.
- Середні постійні витрати, AFC , грош. од.: $AFC_{1-10} = TFC_{1-10} / Q_{1-10}$.
- Середні змінні витрати, AVC , грош. од.: $AVC_{1-10} = TVC_{1-10} / Q_{1-10}$.
- Середні валові витрати, ATC , грош. од.: $ATC_{1-10} = AFC_{1-10} + AVC_{1-10}$.
- Граничні витрати кожної подальшої одиниці MC , грош. од.: $MC_{1-10} =$ зміни $TC_{0-10} /$ зміни Q_{0-10} [$MC_1 = (TC_1 - TC_0) / (Q_1 - Q_0)$; $MC_2 = (TC_2 - TC_1) / (Q_2 - Q_1)$; ... $MC_n = (TC_n - TC_{n-1}) / (Q_n - Q_{n-1})$], ($n = 10$, фактично по кривій функції $MC = f Q$ береться перша похідна).
 - Валовий дохід, TR , грош. од.: $TR_{1-10} = P * Q_{1-10}$.
 - Сукупний прибуток (збиток) $Pr (-)$: $Pr_{0-10} = TR_{0-10} - TC_{0-10}$.

За результатами розрахунків заповнюється таблиця «Обсяг виробництва (одиниці продукції), що максимізував прибуток підприємства за принципом рівності граничного доходу граничним витратам (грошові одиниці)» і візуально визначається раціональний об'єм відповідний $MC = MR$ за певний період. Фірмі слід зробити останню цілу одиницю продукції, у якій MR перевищує MC . В більшості випадків дані про кількість одиниць продукції і витрати – округленні значення.

Також за табличними даними робиться побудова і аналіз кривої пропозиції (граничних витрат), яка ілюструє продаж товару за різними цінами впродовж певного періоду.

Ключовими точками є перетин цієї кривої з адресними цінами і відповідна кількість товару. Таким чином, формується графік кривої пропозиції конкретної фірми за певний період.

1. Будується крива $MC = f(Q)$.
2. Будується крива $AVC = f(Q)$.
3. Будується крива $ATC = f(Q)$.
4. Фіксуються точки рівноваги фірми на кривій MC : $a - P_1 < AVC_{\min}$; $b - P_2 = AVC_{\min}$; $c - P_3 = P_2 - P_4$; $d - P_4 = ATC_{\min}$; $e - P_5 > P_4$, $MR(P) = MC$.

Головний висновок, що витікає з аналізу кривої граничних витрат, те що відрізок цієї кривої, який лежить вище кривої змінних витрат, є кривою пропозиції конкурентної фірми в короткостроковому періоді. Цей період витікає з використання правила $MR(P) = MC$.

На основі представлених вище методичних матеріалів можна виконати попередні розрахунки раціонального обсягу виробництва конкретної продукції на стадії проектування експлуатації нового родовища гірничо-видобувним підприємством (початкові дані розраховуються на основі проєктних даних), а також підготувати аналіз діяльності гірничо-видобувного підприємства для вибору раціонального об'єму одиниць конкретної продукції по фактичній статистичній вибірці початкових даних при експлуатації родовища.

Прийняття рішень в умовах невизначеності може базуватися на використанні класичних методів дослідження операцій, пов'язаних із застосуванням критеріїв Лапласа, Вальда, «максимакса», Гурвіца, Севіджа. Кожен із критеріїв дозволяє отримати вірогідність «виграшу» при заданому стані природи [14].

Критерій Лапласа. Виходить з положення, що майбутні положення природи рівноімовірні. Критерій Лапласа [27] базується на принципі недостатності обґрунтованості, тобто оптимальною буде альтернатива з максимальним середнім виграшем. Для чотирьох станів природи $M = 1 \dots 4$ відповідно вірогідність виграшу складе $\gamma = 1/M = 0,25$. Тоді, на першому етапі знайдемо середні виграші $L_1 \dots L_4$ за формулою

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^M X_{ij}}{M}, \quad (5)$$

а на другому етапі знайдемо максимальний виграш серед середніх $X^* = L_{ij} = \max(L_1, L_2, L_3, L_4)$.

Критерій Вальда. Критерій песиміста, який вважає, що, якщо йому відомі стани природи, він повинен поступати найобережнішим чином [28]. Будь-яке переміщення капіталу таїть в собі небезпека, тому оптимальною буде та альтернатива, яка забезпечить найкращий виграш серед можливих при несприятливому розвитку подій $\gamma = 0; \alpha = 1$, тобто «мінімакс» – мінімум серед втрат

$$W_{ij} = \min(X_{ij}), j = 1, 2, \dots, M. \quad (6)$$

Критерій «максимакса», який є оберненим до критерію Вальда, тобто вірогідність виграшу висока $\gamma = 1; \alpha = 0$ [29]. Згідно з цим критерієм оптимальною буде альтернатива, яка здатна забезпечити найбільший виграш.

Критерій Гурвіца. Критерій оптиміста [30] 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. Тобто:

$$\begin{aligned} H_{ij}(\lambda) &= \lambda X_{ij \max} + (1 - \lambda) X_{ij \min}, i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M \\ X^* &= \max(H_{ij}(\lambda)), i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (7)$$

Узагальнений критерій Гурвіца [31] на відміну від звичайного критерію Гурвіца він обчислює середньозважені значення виграшу, тобто кожен стан природи $M = 1, 2, \dots, j$ має вірогідність λ_q , тоді для i -ї альтернативи величина виграшу буде

$$H_i = \sum_{q=1}^M \lambda_q x_{iq}, \quad (8)$$

де $0 \leq \lambda_q \leq 1$ – коефіцієнт для q значення альтернативи i ;

При цьому вірогідність q того чи іншого стану природи не повинна перевищувати 1.

$$\sum_{q=1}^M \lambda_q = 1 \Rightarrow \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_q = 1 \quad (9)$$

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 розви-

тку виробництва. Цей критерій доцільно використовувати при довгостроковому проектуванні підприємств, коли дані попередніх порівнянь мають суперечливий характер.

Критерій Севіджа. Критерій максимального жалю [32], 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. Критерій Севіджа слід використовувати на початковому етапі проектування, або коли дані про потенціал видобувного комплексу та ризики виробництва відсутні.

Нові підходи до проектування технологічних схем гірничого виробництва, які базуються на дослідженні операцій, можуть бути використані як на стадії проектування відпрацювання корисної копалини, так і в процесі експлуатації родовища.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Завдяки продуктивному пошуку необхідних алгоритмів знаходження оптимальних рішень технологічних параметрів гірничих процесів були знайдені відповідні базові основи щодо розробки спеціалізованих комп'ютерних програм для створення інноваційної екологоорієнтованої технології оптимального проектування інтенсифікації гірничо-збагачувальних процесів при розробці родовищ корисних копалин.

Програма вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання («CountsSEM.v1.p2.6_c25») [33]. **Призначення.** Програма призначена для вибору оптимальної структури очисного комплексу на пластах потужністю 0,90–2,60 м.

Галузь застосування. У програмі систематизовані дані про фактичні техніко-економічні показники роботи очисних вибоїв Донецької, Луганської, Дніпропетровської областей за період з 2008 по 2014 рр. Розглянуті вугільні родовища з потужністю пластів 0,90–2,60 м, кутами падіння пласта в діапазоні 0–25 град. і завдовжки лави від 200 до 250 м.

Можливості програми. Застосування програми дозволить:

- проводити порівняльний аналіз і визначати оптимальні варіанти ланцюжків очисного обладнання з навантаженням понад 1000 т/добу по ряду заданих користувачем параметрів;
- формувати звіти і працювати з довідковою системою в процесі роботи;
- систематизувати дані про роботу очисного обладнання для конкретного підприємства, об'єднання, компанії;
- сформулювати банк проектних рішень, що скоротить час проектування технології видобутку вугілля механізованим способом.

Комплектність програми. Програма складається з: модуля вибору засобів механізації; форми для створення текстових звітів і звітів користувача; довідника по вибору очисного обладнання; інтегрованої системи звітів; вбудованої довідкової системи.

Програма включає вбудований довідник по вибору очисного обладнання (рис. 1). «Довідник...» працює в двох режимах: безпосередньо довідника (є

можливість порівнювати вітчизняні та закордонні аналоги між собою, фільтрувати типи обладнання по країні виробника), а також, в залежності від гірничотехнічних умов рекомендувати найбільш раціональні типи обладнання.



Рисунок 1. Робоче вікно програми вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання («CountsCEM.v1.p2.6_c25»)

Програма для знаходження найкоротших маршрутів в мережевій моделі («GraphON.v1.2017») [34]. **Призначення.** Програма призначена для оптимізації мережевих моделей. Це дозволяє представити структуру виробничого процесу у вигляді мережі і оптимізувати по одному з параметрів (наприклад, собівартість продукції).

Галузь застосування. Область застосування не обмежується вугільними родовищами, а може бути застосована на підприємствах гірничо-видобувного комплексу, а також для вертикально інтегрованих компаній по виробництву вугілля, коксу, металу.

Можливості програми. Застосування програми дозволить:

- проводити порівняльний аналіз і визначати оптимальні варіанти технологічного циклу по ряду заданих користувачем параметрів;
- формувати звіти і працювати з довідковою системою в процесі роботи;
- систематизувати дані про роботу для конкретного підприємства, об'єднання, компанії;
- сформувані банк проектних рішень, що скоротить час проектування технології видобутку вугілля механізованим способом, а також знизити часові та трудові витрати на виконання технологічних операцій.

Комплектність програми. Програма складається з: модуля оптимізації технологічних процесів; форми для створення текстових звітів і звітів користувача; баз даних, в яких зберігаються результати попередніх розрахунків; інтегрованої системи звітів; вбудованої довідкової системи.

Програма включає базу даних, в якій міститься інформація про оптимальні типи обладнання, структури технологічного циклу, що дозволяє значно скоротити час проектування.

На рис. 2 показано робоче вікно програми.

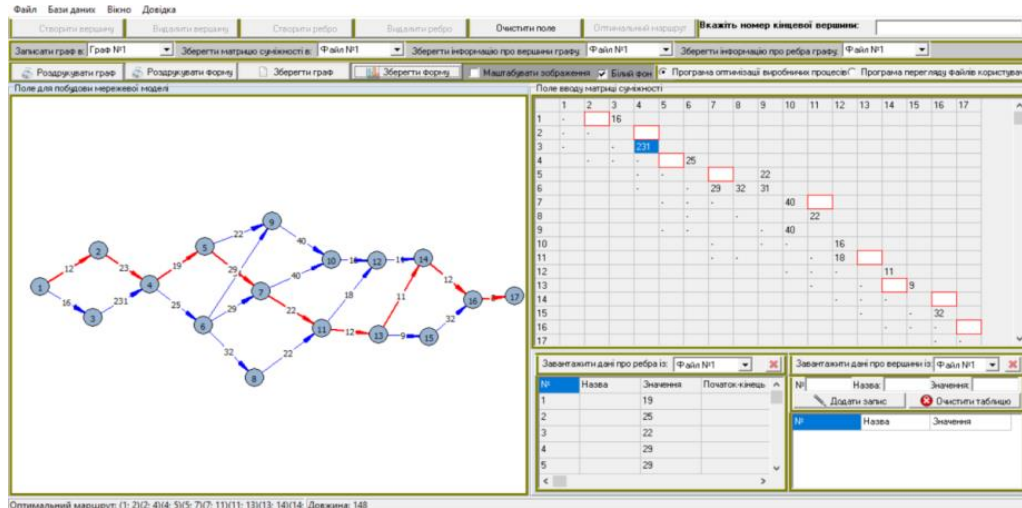


Рисунок 2. Робоче вікно програми знаходження найкоротших маршрутів в мережевій моделі («GraphON.v1.2017»)

Програма динамічного програмування альтернативного графа на мінімум «DinMin.v2_2019» [35]. Призначення. Програма призначена для вибору сценарію освоєння родовищ корисних копалин з мінімальними витратами, мінімально можливими збитками і максимальним прибутком з урахуванням взаємодії екологічних норм будівництва, видобутку, транспорту та переробки, як ланок однієї системи, яка працює на кінцевий результат у вигляді ринкового товару.

Галузь застосування. Програма не обмежується гірничодобувною галуззю, а може бути застосована в стратегічному плануванні.

Можливості програми. Застосування програми дозволить: обґрунтувати область ефективної експлуатації запасів родовищ рідкісних і благородних металів для розробників з різними правами на користування надрами та різними ресурсами, а також проводити геолого-економічну переоцінку запасів родовищ перспективних для іноземних інвестицій

Комплектність програми. Програма містить можливості побудови і рішення математичної моделі, що враховує:

- стан запасів родовища при його експлуатації в різних гірничо-геологічних, територіальних і соціальних умовах з урахуванням великої різноманітності форм рудних тіл і високої цінності корисної копалини;
- реалізацію принципу оптимуму Р. Беллмана, який полягає в тому, що рішення, яке застосовується на кожному етапі процесу, має бути кращим по відношенню до процесу в цілому;
- реалізацію алгоритму зворотного прогону, який рівнозначний впорядкованій процедурі вирішення послідовності функціональних рівнянь;

• відповідність алгоритмів оптимізації мережевих моделей сучасному рівню інформаційних технологій.

Програма дозволяє аналізувати як економічні, так і екологічні сценарії освоєння родовищ.

На рис. 3 показано робоче вікно програми.

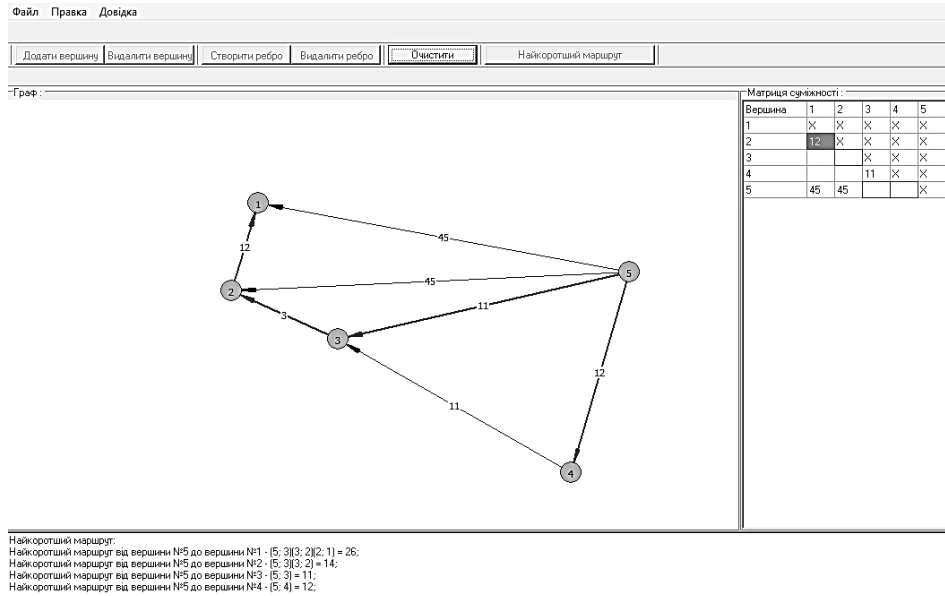


Рисунок 3. Робоче вікно програми динамічного програмування альтернативного графа на мінімум «DinMin.v2_2019»

Програма визначення рівня виробництва продукції з надр («Rational LP.v1.2020») [36]. **Призначення.** Програма призначена для розвитку рішень відносно раціонального обсягу виробництва продукції, який максимізує прибуток або мінімізує збитки за рахунок реалізації правила діапазону рівноважних граничних витрат і доходів.

Галузь застосування. Галузь застосування комп'ютерної програма з сучасним інтерфейсом по вибору обсягу виробництва продукції для раціонального освоєння родовищ не залежить від виду корисної копалини і одиниць кінцевої продукції.

Можливості програми. Програма може бути застосована для розрахунків:

- раціонального обсягу виробництва конкретної продукції на стадії проєктування експлуатації нового родовища гірничодобувним підприємством;
- діяльності гірничодобувного підприємства для вибору раціонального об'єму одиниць конкретної продукції по фактичній статистичній вибірці показників експлуатації родовища;
- програма дозволяє за результатами розрахунків побудувати криву пропозиції цього підприємства в цих ринкових умовах конкретного періоду часу.

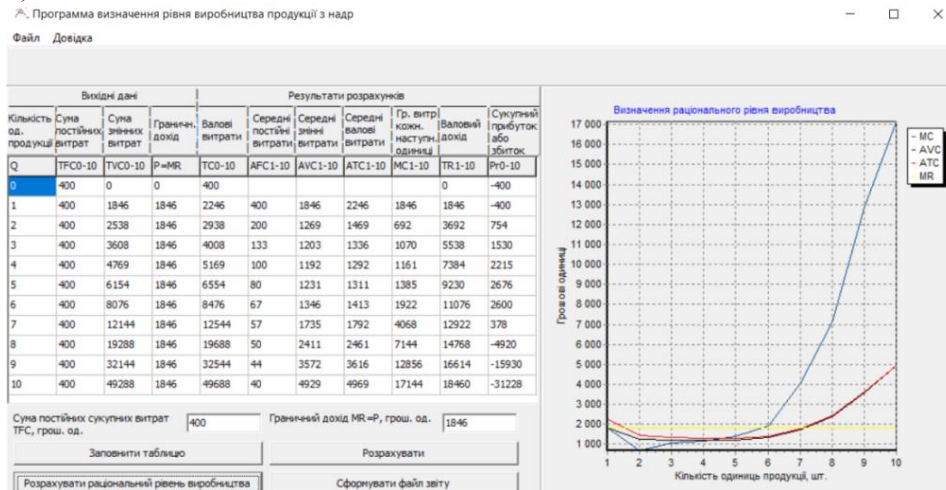
Комплектність програми. Програма складається з: модуля введення початкових даних для розрахунків; розрахунковий модуль показників визначення обсягів виробництва, який максимізував дохід підприємства; формування звіту у вигляді таблиць і графічних файлів; визначення раціонального

рівня витягання корисної копалини з надр; визначення і побудова кривої пропозиції підприємства в цих ринкових умовах конкретного періоду часу.

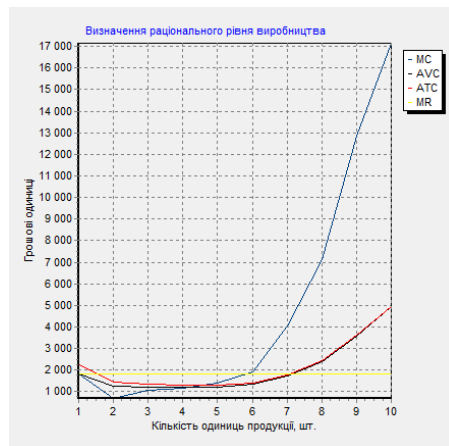
Незалежно від типу корисної копалини підхід передбачає проектування технологічних параметрів експлуатації конкретного родовища, виходячи з обсягу виробництва кінцевої продукції, в прив'язці до діапазону рівноважних граничних витрат і доходів, які підприємство може контролювати безпосередньо, а це дозволяє вирішити питання відносно визначення раціонального рівня виробництва продукції.

На рисунку 4 показано робоче вікно програми.

а)



б)



Рисунки 4. Робоче вікно програми визначення рівня виробництва продукції з надр» («Rational LP.v1.2020»): а) робоче вікно програми; б) результат виконання програми

Програма для прийняття рішень в умовах невизначеності («Kriteriy.v2.2019») [37]. **Призначення.** Програма призначена для обґрунтування раціонального рівня виробництва і мінімізації ризиків.

Галузь застосування. Програма не обмежується гірничо-видобувною галуззю, а може бути застосована при стратегічному плануванні.

Можливості програми. Програма дозволяє враховувати різні сценарії розвитку виробництва. Крім цього, зазначені критерії дозволяють орієнтуватися не тільки на граничні стани, а враховувати недоотримані переваги. При цьому, якщо гірничо-геологічні умови несприятливі, а ресурси на придбання і обслуговування устаткування мінімальні, то слід підходити з позиції «песиміста», тобто оптимальною буде альтернатива з найменшим програшем серед можливих.

Комплектність програми. Програма складається з: модуля прийняття рішень в умовах невизначеності; форми для створення текстових звітів і звітів користувача; форми для експорту результатів; інтегрованої системи звітів; вбудованої довідкової системи.

У разі, якщо гірничо-геологічні умови сприятливі, існує потреба у вугіллі даної марки, відсутні обмежуючі продуктивність чинники, то слід підходити з позиції «оптиміста», тобто орієнтуватися на максимальний вигравш.

Програма дозволяє формувати звіти і одночасно аналізувати понад 100 альтернатив для 100 сценаріїв виробництва. Програма дозволяє завантажувати і експортувати дані в офісні табличні редактори, що значно скорочує час на введення інформації.

На рис. 5 показано робоче вікно програми.

Файл Друк Допомога

Дані до розрахунку:

Кількість альтернатив, R оптиміст песиміст

Кількість сценаріїв, N

Вдали Проміжні Неудали

Критерії прийняття рішень:

Лапласа Вальда (максимін) максимакс

Севіджа Гурвіца Узагальнений Гурвіца

Вихідна матриця:

#Альтернативи	1	2	3
Альтернатива 1	-6	12	28
Альтернатива 2	-12	14	35
Альтернатива 3	-26	0	80

Результати розрахунків:

#Альтернативи	Лаплас	Вальд	максимакс	Севідж	Гурвіц	Гурвіц (У)
Альтернатива 1	11.3	-6	28	-52	11	36.54
Альтернатива 2	12.4	-12	35	-45	11.5	47.04
Альтернатива 3	18	-26	80	-20	27	100.3

Розрахунок виграшу за критерієм Севіджа:

Smax	1	2	3
Альтернатива 1	0	-2	-52
Альтернатива 2	-6	0	-45
Альтернатива 3	-20	-14	0

Текстовий файл звіту

для альтернативи1: 4.2
 для альтернативи2: 2.1
 для альтернативи3: 5.8
 Величина максимального виграшу Smax при вірогідн
 для альтернативи1: 11
 для альтернативи2: 11.5
 для альтернативи3: 27
 Величина максимального виграшу Smax при вірогідн
 для альтернативи1: 17.8
 для альтернативи2: 20.9
 для альтернативи3: 48.2
 Величина максимального виграшу Smax при вірогідн
 для альтернативи1: 24.6
 для альтернативи2: 30.3
 для альтернативи3: 69.4
 Виводимо в таблицю значення максимального вигра

Узагальнений критерій Гурвіца

Порядок розрахунків:

- Впорядковуємо матрицю за зростанням: $S_{1n} < S_{2n} < \dots < S_{3n}$
- Знаходимо виграш для кожного стану (за кожним n)
- Знаходимо сумарний виграш $S = S_{1n} + S_{2n} + \dots + S_{3n}$
- Знаходимо вірогідність кожного стану $V_1 = S_{1n}/S$; $V_2 = S_{2n}/S$; $V_3 = S_{3n}/S$

Сумарна величина виграшу Snp для стану1: -44
 Сумарна величина виграшу Snp для стану2: 26
 Сумарна величина виграшу Snp для стану3: 143
 Сума усіх виграшів S: 125
 Коефіцієнт V(o)1 (оптимістичний): -0.35
 Коефіцієнт V(o)2 (оптимістичний): 0.21
 Коефіцієнт V(o)3 (оптимістичний): 1.14
 Коефіцієнт V(p)1 (песимістичний): 1.14
 Коефіцієнт V(p)2 (песимістичний): 0.21
 Коефіцієнт V(p)3 (песимістичний): -0.35
 Виграш (оптимістичний) для альтернативи1: 36.54
 Виграш (оптимістичний) для альтернативи2: 47.04
 Виграш (оптимістичний) для альтернативи3: 100.3

Рисунок 5. Робоче вікно програми для прийняття рішень в умовах невизначеності («Kriteriy.v2.2019»)

5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Приведені в цій роботі результати досліджень щодо залучення сучасних інформаційних технологій у вигляді розроблених та зареєстрованих комп'ю-

терних програм, пройшли тестування за рішенням багатопараметричних завдань при виборі параметрів відпрацювання на конкретних родовищах корисних копалин.

Розрахунки модернізації технологічного ланцюжку на діючих шахтах Донбасу за допомогою сучасних методів дискретної математики (програми «CountsSEM.v1.p2.6_c25», «GraphON.v1.2017») показують, що вибір області раціональної експлуатації гірничо-шахтного обладнання має значний економічний ефект (приклад вирішення завдання в умовах ДП ВК «Шахта «Краснолиманська») [16].

Також в даному напрямку рекомендовано державним вугільним підприємствам провести модернізацію галузі [38].

На прикладі аналізу показників реального невеликого золоторудного родовища було продемонстровано тестування комп'ютерної програми «Rational LP.v1.2020» щодо визначення раціонального обсягу видобутку золота, який дозволяв максимізувати прибуток фірми у короткостроковому періоді [4]. Також приклад аналогічного тестування відносно вугільної продукції, яка виробляється стабільно працюючими державними та приватними вугільними підприємствами показав, що маржинальний підхід порівняння доходів і витрат працює і у форматі ринкової економіки дає класичні результати [26]. Таким чином, вказаний інструмент щодо визначення обсягів виробництва є ефективним.

Зараз в цивілізованих країнах все частіше в якості головного критерію для ухвалення рішень при освоєнні ресурсів надр на перше місце виходить екологічний аспект. Потенціал розвитку досліджень в напрямку оптимізації мережевих моделей методом динамічного програмування (програма «DinMin.v2_2019») достатній для здійснення економічної оцінки екологічного аспекту освоєння родовищ корисних копалин. Процедура такої оцінки полягає у фінансовому порівнянні двох сценаріїв освоєння – оптимального з економічної точки зору із екологічно переважним [39].

В якості ілюстрації альтернативних оптимальних варіантів економічного і екологічного сценаріїв освоєння запасів родовища корисної копалини показані приклади аналізу показників освоєння реального невеликого золоторудного родовища, що приведені в роботі [40]. Було запропоновано новий спосіб розробки екологічних сценаріїв розвитку територій, які відповідають раціональним стратегіям освоєння родовищ корисних копалин з урахуванням виготовлення кінцевої продукції. Для цього було розроблено модель зміни стану запасів родовища від стадії розвідки до списання запасів з балансу, а також проведено економічну оцінку з урахуванням екологічного аспекту освоєння родовищ. На відміну від економічних сценаріїв освоєння родовища, врахування екологічних вимог передбачають рейтингову оцінку техногенної небезпеки для навколишнього середовища кожного етапу, що дозволяє оцінити не тільки вигоду але і ризики виробництва.

Для розробки нового підходу до проектування технологічних схем видобутку вугілля було проведено обґрунтування раціонального рівня роботи очисного вибою, в якому були використані методи дослідження операцій, які базуються на застосуванні критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності (Програма «Kriteriy.v2.2019»). При цьому було встановлено закономірності

формування технологічних ланцюжків очисного обладнання при заданому рівні видобутку в залежності від умов експлуатації та параметрів обладнання [41].

Розглянутий в роботі підхід є досить універсальним та дозволяє врахувати різні сценарії розвитку виробництва. При цьому, якщо гірничо-геологічні умови несприятливі, а ресурси на придбання та обслуговування обладнання мінімальні, то слід підходити з позиції «песиміста», тобто оптимальною буде альтернатива з найменшим програшем серед можливих. В разі, якщо гірничо-геологічні умови сприятливі, існує потреба у вугіллі даної марки, відсутні фактори, що обмежують продуктивність, то слід підходити з позиції «оптиміста», тобто орієнтуватись на максимальний вигреш. Окрім цього, вказані критерії дозволяють орієнтуватись не тільки на граничні стани, але і врахувати недоотримані переваги (критерій Севіджа).

Результати досліджень по раціоналізації відпрацювання родовищ корисних копалин показують, що екологоорієнтована технологія оптимального проектування інтенсифікації гірничо-збагачувальних процесів при розробці родовищ корисних копалин повинна бути інноваційною продукцією, яка базується на наукомістких процедурах ухвалення рішень. Тільки так на сучасному рівні науково-технічного розвитку можна буде оцінити ефективність застосування різних технологій видобутку корисних копалин з позиції економічних та екологічних переваг, а також визначити раціональний обсяг виробництва.

Нові підходи та результати досліджень по оптимальному проектуванню параметрів експлуатації родовищ цінних корисних копалини України є перспективним напрямком для створення методології рішення складних завдань у гірництві. За допомогою цього інструментарію можна готувати обґрунтування для вмотивованого ухвалення рішень власником ліцензії з основних питань технічного завдання на проектування розробки родовищ критичних або стратегічних мінеральних ресурсів, які розташовані на території України.

6. ВИСНОВКИ

Раціоналізація відпрацювання родовищ корисних копалин може бути реалізована шляхом створення технології оптимального проектування інтенсифікації гірничо-збагачувальних процесів із залученням сучасних інформаційних технологій, що забезпечить екологічне та раціональне використання надр, а також безпеку ведення гірничих робіт. Нова методологія підготовки завдання на проектування конкретного родовища відрізняється трьома функціональними найважливішими характеристиками, які відображають важливість технології/розробки для економіки і суспільства:

- інноваційна продукція реалізації ефективного відпрацювання родовищ корисних копалин базується на наукомістких процедурах ухвалення рішень;
- до складних багатопараметричних гірничих процесів додається наявність багатьох етапів, які не мають прямого відношення до гірничих робіт;

- оцінка ефективності технологічних схем у вигляді ланцюга послідовно здійснюваних процесів виробництва від балансових запасів родовища до кінцевої продукції з надр проводиться з позиції економічних та екологічних переваг.

Порядок реалізації інноваційної технології оптимального проектування природокористування буде включати результати дослідження у вигляді:

- методології та алгоритмів визначення раціонального обсягу продукції гірничо-збагачувального підприємства із максимальним прибутком або мінімальними збитками в короткостроковому періоді;

- методології визначення оптимального сценарію виробництва кінцевої продукції для конкретного родовища на базі процедури динамічного програмування багатопараметричного процесу відпрацювання надр, що є інноваційним способом активного керування станом гірничого масиву.

- методології обґрунтування області ефективної експлуатації альтернативними ліцензіатами з різними правами на користування надрами і різними можливостями по фінансовим, трудовим і матеріальним ресурсам;

- методології здійснення економічної оцінки екологічного аспекту освоєння родовищ корисних копалин за рахунок порівняння двох сценаріїв освоєння – оптимального з економічної точки зору та екологічно переважним;

- методології підготовки завдання на проектування конкретного родовища у вигляді «Технічного завдання на розробку проекту раціонального освоєння родовища корисних копалин»

- програмного забезпечення із спеціалізованих програм – об'єктів інтелектуальної власності (ОІВ), використання яких передбачається під час проведення досліджень, щодо вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання; знаходження найкоротших маршрутів в мережевій моделі; динамічного програмування альтернативного графа на мінімум; визначення раціонального рівня продукції; прийняття рішень в умовах невизначеності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Грінюв, В.Г. & Хорольський, А.О. (2018). Можливості ефективного освоєння рудних родовищ із запасами рідкісних і благородних металів. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*, (20), 113–122.

2. Грінюв, В.Г. & Хорольський, А.О. (2018) Можливості і результати досліджень з підвищення ефективності експлуатації запасів золоторудних українських родовищ. Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука і виробництво: *Матеріали Міжнародного геологічного форуму, 18–23 червня*, м. Одеса.

3. Hrinov, V. (1992). Gold-ore deposits underground mining design taking into amount cryo-lithozone. In *Mining in the Arctic proceedings of the 2nd International symposium*. AA Balkema/ Rotterdam/ Brook-field, 315 p.

4. Гринев, В., Петров, А. & Зубков, В. (1994). Определение области проектирования эффективной разработки рудных месторождений Якутии. *Горное дело в Арктике*, С.-Петербург.

5. Гринев В. & Хорольский А. (2017) Система поддержки принятия решений при разработке месторождений полезных ископаемых. *Горно-геологический журнал*, (51), 18–24.

6. Гринев, В. (1992). *Решение проблем разработки рудных месторождений Севера*. Новосибирск: ВО “Наука”, 205 с.

7. Гринев, В. (2008). Оценка перспектив повышения эффективности получения конечной продукции из угля. *Физико-технические проблемы горного производства*, (11), 126–135.
8. Гринев, В. (2016). *Графи та мережі для вибору гірничо-шахтного обладнання*. Дніпро: Пороги.
9. Хорольский А. & Гринев В. (2018). Выбор сценария освоения месторождений полезных ископаемых. *Геология и охрана недр*, (68), 68–75.
10. Хорольский, А. & Гринев, В. (2020) Оцінка і вибір параметрів при розробці родовищ корисних копалин. *Физико-технические проблемы горного производства*, (22), 118–140. <https://doi.org/10.37101/ftpgp22.01.009>
11. Горная энциклопедия. (1999). М.: Сов. энциклопедия.
12. Гринев, В., Череповский, П. & Деуленко, А. (2015). *Инновационные перспективы эксплуатации угольных пластов крутого падения*. Днепр: Пороги. 180 с.
13. Шуп, Т. (1982). Решение инженерных задач на ЭВМ: практическое руководство. М.: Мир, 238 с.
14. Гринев, В., Изаксон, В. & Зубков, В. (1999). *Решение горных задач на ЭВМ при освоении рудных месторождений*. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 215 с.
15. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2018). Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment. In *E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering*. (Vol. 60. p. 00017). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>
16. Гринев, В. & Хорольский, А. (2017). Обоснование параметров выбора комплектаций очистного оборудования с учетом области рациональной эксплуатации. *Вестник Донецкого горного института*, 1(40), 139–144. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2017-1-139-144>.
17. Зыков, А. (1987). *Основы теории графов*. Наука, 384 с.
18. Майника, Э. (1981). *Алгоритмы оптимизации на сетях и графах*. М.: Мир. 323 с.
19. Dijkstra, E. (1959). *A Note on Two Problems in Connexion with Graphs*, *Numer Math.*, (1), 269–271.
20. Floyd, R. (1962). *Algorithm 97, Shortest Path*, *Comm. ACM*, (5), 345.
21. Гринев, В. & Хорольский, А. (2019). Моделирование сценария освоения месторождений ценных руд на условиях динамического программирования. *II Бекжановские чтения: материалы международной конференции*, Алматы, Республика Казахстан, 114–119.
22. Shvarc, V. (1968). Dinamicheskoe programmirovaniye na primere optimizacii tekhnologii vyplavki mednoj rudy, *Erzmetall*, (10).
23. Moudarav, Dzh. & Ehlmagrabi, S. (1984). *Issledovanie operacij*, М.: Мир.
24. Грінюв, В. & Хорольський, А. (2019). Оптимальне проектування параметрів гірничозбагачувальних підприємств для раціонального освоєння цінних родовищ України. *Физико-технические проблемы горного производства*, (21), 124–145.
25. Амоша, А., Логвиненко, В. & Гринев, В. (2007). *Комплексное освоение угольных месторождений Донецкой области*, 216 с.
26. Хорольський, А. & Грінюв, В. (2020). Визначення раціонального обсягу вилучення корисних копалин із надр: маржинальний підхід. *Економіка промисловості*, 3(91), 82–95. <https://doi.org/10.15407/econindustry2020.03.082>
27. Хорольский, А.А., Гринев, В.Г., & Сынков, В.Г. (2015). Рациональный выбор состава механизированных комплексов в условиях эксплуатации забоев Донбасса.

In *Матеріали міжнародної конференції «Форум горняков–2015 (Vol. 30, pp. 58–68).*

28. Wald, A. (1945). Statistical decision functions which minimize the maximum risk. *The Annals of Mathematics*, 46(2), 265–280.

29. Albright, S. (1993). A Statistical Analysis of Hitting Streaks in Baseball. *Journal of the American Statistical Association* 88, (424), 1175–1196.

30. Hurwicz, L.; & Arrow, K. (1953). Hurwicz's optimality criterion for decision making under ignorance. *Technical Report 1953*, (6). Stanford University.

31. Hurwicz, L. (1995). What is the Coase Theorem? *Japan and the World Economy*, 7(1), 49–74.

32. Savage, L. (1951). The theory of statistical decision. *Journal of the American Statistical Association*, (46), 55–67.

33. Грінюв, В. & Хорольський, А. (2018). Комп'ютерна програма «Програма вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання на основі універсальних графів» («CountsSEM.v1.p2.6_c25»). *Авторське право та суміжні права*, (47).

34. Грінюв, В. & Хорольський, А. (2018). Комп'ютерна програма «Програма знаходження найкоротших відстаней між усіма вершинами мережевої моделі» («GraphON.v1.2017»). *Авторське право та суміжні права*, (47).

35. Грінюв, В. & Хорольський, А. (2020). Комп'ютерна програма «Програма динамічного програмування альтернативного графу на мінімум» («Din_Min.v2_2019»). *Авторське право та суміжні права*, (58).

36. Грінюв, В.Г. & Хорольський, А.О. (2020). Комп'ютерна програма «Програма визначення рівня виробництва продукції з надр» («Rational LP.v1.2020»). *Авторське право та суміжні права*, (61).

37. Хорольський, А. & Грінюв, В. (2020). Комп'ютерна програма «Програма вибору критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності» («Kriteriy.v2_2019»). *Авторське право та суміжні права*, (58).

38. Гринев, В. & Хорольський, А. (2018). Оптимізація параметрів експлуатації очисного обладнання. *Уголь України*. (9), 37–42.

39. Грінюв, В., Хорольський, А. & Каліушенко, О. (2019). Розроблення екологічних сценаріїв ефективного освоєння цінних родовищ корисних копалин. *Мінеральні ресурси України*, (2), 46–50. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>

40. Khorolskyi, A., Hrinov V. & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463–471.

41. Хорольський, А. & Грінюв, В., (2018). Проектування технологічних схем гірничого виробництва в умовах невизначеності. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*, (20), 132–146.

REFERENCES

1. Hrinov, V.H. & Khorolskyi, A.O. (2018). Mozhyvosti efektyvnoho osvoiennia rudnykh rodovyshch iz zapasamy ridkisnykh i blahorodnykh metaliv. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*, (20), 113–122.

2. Hrinov, V.H. & Khorolskyi, A.O. (2018) Mozhyvosti i rezultaty doslidzhen z pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii zapasiv zolotorudnykh ukrainskykh rodovyshch. Aktualni problemy ta perspektyvy rozvytku heolohii: nauka i vyrobnytstvo: In *Mizhnarodnii heolohichniy forum*.

3. Hrinov, V. (1992). Gold-ore deposits underground mining design taking into amount cryo-lithozone. In *Mining in the Arctic proceedings of the 2nd International symposium*. AA Balkema/ Rotterdam/ Brook-field, 315 p.

4. Grinev, V., Petrov, A. & Zubkov, V. (1994). *Opređenje oblasti projektirovaniya effektivnoj razrabotki rudnyh mestorozhdenij Yakutii*. Gornoe delo v Arktike, S.-Peterburg.
5. Grinev V. & Khorolskyi, A. (2017) Sistema podderzhki prinyatiya reshenij pri razrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. *Gorno-geologicheskij zhurnal*, (51), 18–24.
6. Grinev, V. (1992). *Reshenie problem razrabotki rudnyh mestorozhdenij Severa*. Novosibirsk, Nauka, 205.
7. Grinev, V. (2008). Ocenka perspektiv povysheniya effektivnosti polucheniya konechnoj produkcii iz uglya. *Fiziko-tekhnicheckie problemy gornogo proizvodstva*, (11), 126–135.
8. Hrynev, V. (2016). *Hrafy ta merezhi dlia vyboru hirnycho-shakhtnoho obladdannia*. Dnipro: Porohy.
9. Khorolskyi, A. & Grinev V. (2018). Vybor scenariya osvoeniya mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. *Geologiya i ohrana nedr*, (68), 68–75.
10. Khorolskyi, A. & Hrynov, V. (2020) Otsinka i vybir parametriv pry rozrobtsti rodovysch korisnykh kopalyn. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (22), 118–140. <https://doi.org/10.37101/ftpgp22.01.009>
11. *Hornaia entsyklopedyia*. (1999). M.: Sov. entsyklopedyia.
12. Hrynev, V., Cherepovskyi, P. & Deulenko, A. (2015). *Ynnovatsyonnye perspektivy ekspluatatsyy uholnykh plastov krutoho padeniya*. Dnepr: Porohy, 180 p.
13. Shup, T. (1982). *Reshenye ynzhenerykh zadach na EVM: praktycheskoe rukovodstvo*. Myr, 238 p.
14. Hrynev, V., Yzakson, V. & Zubkov, V. (1999). *Reshenye hornykh zadach na EVM pry osvoenyy rudnykh mestorozhdeniy*. Novosybyrsk: Nauka, Sybyrskaiia yzdatelskaia fyрма RAN, 215 p.
15. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2018). Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment. In *E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering*. (Vol. 60. p. 00017). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>.
16. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2017). Obosnovanye parametrov vybora komplektatsii ochysnoho oborudovaniya s uchetom oblasti ratsyonalnoi ekspluatatsyy. *Vesty Donetsko-hornoho instytuta*, 1(40), 139–144. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2017-1-139-144>.
17. Zykov, A. (1987). *Osnovy teorii grafov*. Nauka, 384 s.
18. Majnika, E. (1981). *Algoritmy optimizatsii na setyah i grafah*. M.: Mir. 323 s.
19. Dijksatra, E. (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numer Math.*, (1), 269–271.
20. Floyd, R. (1962). *Algorithm 97, Shortest Path*, *Comm. ACM*, (5), 345.
21. Grinev, V. & Horol'skij, A. (2019). Modelirovanie scenariya osvoeniya mestorozhdenij cennyh rud na usloviyah dinamicheskogo programmirovaniya. In *II Bekzhanovskie chteniya*, 114–119.
22. Shvarc, V. (1968). Dinamicheskoe programmirovaniye na primere optimizatsii tekhnologii vyplavki mednoj rudy, *Erzmetall*, (10).
23. Mouderv, Dzh., & Ehlmagrabi, S. (1984). *Issledovanie operacij*, Mir.
24. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2019). Optymalne projektuvannia parametriv hirnychozbahachovalnykh pidpriemstv dlia ratsionalnoho osvoieniia tsinnykh rodovysch Ukrainy. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (21), 124–145.
25. Amosha, A., Logvinenko, V. & Grinev, V. (2007). *Kompleksnoe osvoenie ugol'nyh mestorozhdenij Doneckoj oblasti*, 216 p.

26. Khorolskyi, A. & Hrinov, V. (2020). Vyznachennia ratsionalnoho obsiahu vyluchennia korysnykh kopalyn iz nadr: marzhynalni pidkhyd. *Ekonomika promyslovosti*, 3(91), 82–95. <https://doi.org/10.15407/econindustry2020.03.082>
27. Khorolskyi, A., Hrinov, V. & Synkov, V. (2015). Racional'nyj vybor sostava mekhanizirovanykh kompleksov v usloviyah ehkspluatacii zaboev Donbassa. In *Forum girnikiv 2015*, (1), 58–67.
28. Wald, A. (1945). Statistical decision functions which minimize the maximum risk. *The Annals of Mathematics*, 46(2), 265–280.
29. Albright, S. (1993). A Statistical Analysis of Hitting Streaks in Baseball. *Journal of the American Statistical Association* 88, (424), 1175–1196.
30. Hurwicz, L. & Arrow, K. (1953). Hurwicz's optimality criterion for decision making under ignorance. *Technical Report 1953*, (6). Stanford University.
31. Hurwicz, L. (1995). What is the Coase Theorem? *Japan and the World Economy*, 7(1), 49–74.
32. Savage, L. (1951). The theory of statistical decision. *Journal of the American Statistical Association*, (46), 55–67.
33. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2018). Kompiuterna prohrama «Prohrama vyboru optymalnykh komplektatsii ochysnoho obladnannia na osnovi universalnykh hrafiv» («CountsCEM.v1.p2.6_c25»). *Avtorske pravo ta sumizhni prava*, (47).
34. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2018). Kompiuterna prohrama «Prohrama znakhodzhenia naikorotshykh vidstanei mizh usima vershynamy merezhevoi modeli» («GraphON.v1.2017»). *Avtorske pravo ta sumizhni prava*, (47).
35. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2020). Kompiuterna prohrama «Prohrama dynamichnoho prohramuvannia alternatyvnoho hrafu na minimum» («Din_Min.v2_2019»). *Avtorske pravo ta sumizhni prava*, (58).
36. Hrinov, V.H. & Khorolskyi, A.O. (2020). Kompiuterna prohrama «Prohrama vyznachennia rivnia vyrobnytstva produktsii z nadr» («Rational LP.v1.2020»). *Avtorske pravo ta sumizhni prava*, (61).
37. Khorolskyi, A. & Hrinov, V. (2020). Kompiuterna prohrama «Prohrama vyboru kryteriiv pryiniattia rishen v umovakh nevyznachenosti» («Kritery.v2_2019»). *Avtorske pravo ta sumizhni prava*, (58).
38. Grinev, V. & Khorolskyi, A. (2018). Optimizaciya parametrov ehkspluatacii ochisnogo oborudovaniya. *Ugol' Ukrainy*. (9), 37–42
39. Hrinov, V., Khorolskyi, A. & Kaliushhenko, O. (2019). Rozroblennja ekologichnykh scenariiv efektyvnogo osvjoennja cinnyh rodovyshh korysnykh kopalyn. *Mineral'ni resursy Ukrainy*, (2), 46–50. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>
40. Khorolskyi, A., Hrinov, V. & Kaliushenko O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environ mental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463–471.
41. Khorolskyi, A. & Hrinov, V., (2018). Proektuvannia tekhnolohichnykh skhem hirnychoho vyrobnytstva v umovakh nevyznachenosti. *Fyzyko-tekhnicheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (20), 132–146.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Обґрунтування простору проектування – області, яка на базі відомих критеріїв ефективності та методів оптимізації визначена усіма проектними параметрами і може забезпечити раціоналізацію відпрацювання родовища з надр.

Методика. Раціоналізація відпрацювання родовищ корисних копалин може бути реалізована за рахунок можливості застосування відомих методів оптимізації і критеріїв ефективності для вибору технологічних параметрів в складних багатопараметричних завданнях.

Результати. Програмне забезпечення зі спеціалізованих програм щодо вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання, для знаходження найкоротших маршрутів в мережевій моделі, динамічного програмування альтернативного графа на мінімум, визначення раціонального рівня продукції, для прийняття рішень в умовах невизначеності.

Наукова новизна. Результати досліджень по методології інноваційного проектування параметрів відпрацювання стратегічних та критичних мінеральних ресурсів є новим підходом обґрунтування області ефективної експлуатації родовищ в межах забезпечення екологопереважного та раціонального використання надр. Для вибору технологічних параметрів в складних багатопараметричних завданнях освоєння запасів копалин від балансових до кінцевої продукції запропоновано застосування відомих методів оптимізації і критеріїв ефективності із залученням сучасних інформаційних технологій.

Практична значимість. Запропонований підхід наукомістких процедур ухвалення рішень дозволяє обґрунтовувати область ефективної експлуатації альтернативними розробниками з різними правами на користування надрами і різними можливостями за фінансами, трудовими і матеріальними ресурсами, проводити геолого-економічну переоцінку запасів родовищ перспективних для іноземних інвестицій, а також шляхом багатократних варіантних розрахунків обґрунтовувати зміну кондицій.

Ключові слова: раціональне природокористування, відпрацювання родовищ, екологія, технологія проектування, комп'ютерна програма, моделювання сценаріїв, динамічне програмування, інновація

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Обоснование пространства проектирования – область, которая на базе известных критериев эффективности и методов оптимизации, задана всеми проектными параметрами и может обеспечить рационализацию отработки месторождения из недр.

Методика. Рационализация отработки месторождений полезных ископаемых может быть реализована за счет возможности применения известных методов оптимизации и критериев эффективности для выбора технологических параметров в сложных многопараметрических задачах.

Результаты. Программное обеспечение из специализированных программ относительно выбора оптимальных комплектаций горно-шахтного оборудо-

вания, для нахождения кратчайших маршрутов в сетевой модели, динамического программирования альтернативного графа на минимум, определение рационального уровня продукции, для принятия решений в условиях неопределенности.

Научная новизна. Результаты исследований по методологии современного проектирования параметров отработки стратегических и критических минеральных ресурсов являются новым подходом обоснования области эффективной эксплуатации месторождений в пределах обеспечения экологичного и рационального использования недр. Для выбора технологических параметров в сложных многопараметрических задачах освоения запасов ископаемого от балансовых до конечной продукции предложено применение известных методов оптимизации и критерии эффективности с привлечением современных информационных технологий.

Практическая значимость. Предложенный подход наукоемких процедур принятия решений позволяет обосновывать область эффективной эксплуатации альтернативными разработчиками с разными правами на пользование недрами и разными возможностями по финансам, трудовым и материальным ресурсам, проводить геолого-экономическую переоценку запасов месторождений перспективных для иностранных инвестиций, а также путем многократных вариантных расчетов обосновывать изменение кондиций.

Ключевые слова: рациональное природопользование, отработка месторождений, экология, технология проектирования, компьютерная программа, моделирование сценариев, динамическое программирование, инновация

ABOUT AUTHORS

Hrinov Vladimir, Doctor of Technical Science, Professor, Head of laboratory, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: grinevv@i.ua.

Khorolskyi Andrii, Candidate of Technical Science, Senior Researcher, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: khorolskiyaa@ukr.net.