

УДК 622.22.553.4:519.85

А.О. Хорольський, В.Г. Грінюв

## ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Інститут фізики гірничих процесів НАН України,  
49600, г. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2-а.

**Мета.** Розробити новий підхід до проектування технологічних схем гірничого виробництва, який базується на дослідженні операцій.

**Методика.** Для обґрунтування раціонального рівня видобутку очисного забою можуть бути використані методи дослідження операцій, які базуються на застосуванні критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності.

**Результати.** Виявлено, що процес вибору очисного обладнання має детермінований характер, який демонструє зміну «станів природи» в залежності від прийнятих рішень. Представлення множин раціональних типів обладнання та порівняння їх за критеріями прийняття рішень дозволяє визначити раціональний рівень видобутку виймальної ділянки і знизити витрати на придбання та обслуговування обладнання, при цьому враховуються обмежувальні фактори, які впливають на величину очікуваного видобутку. Послідовне порівняння альтернатив дозволяє встановити поле прийнятних рішень для різних сценаріїв розвитку виробництва.

**Наукова новизна.** Встановлено закономірності формування технологічних ланцюжків очисного обладнання при заданому рівні видобутку в умовах невизначеності в залежності від умов експлуатації та параметрів обладнання.

**Практична значимість.** Розроблена система прийняття рішень, дозволяє оптимізувати параметри експлуатації, знизити собівартість видобутку, вибрати структуру механізованого комплексу з заданим рівнем продуктивності. Описані в роботі підходи можуть бути використані як на стадії проектування очисного забою, так і в процесі експлуатації.

**Ключові слова:** дослідження операцій, проектування виробництва, видобувний комплекс, вибір критерію, умови невизначеності, прийнятне рішення, оптимізація, раціональний рівень виробництва, формат життєдіяльності, динамічне програмування.

## Вступ

Процес проектування технологічних схем виробництва представляє собою комплекс взаємопов'язаних інженерно-економічних задач, які включають етапи вибору обладнання, обґрунтування раціонального рівня виробництва, а також зниження витрат на придбання та обслуговування засобів механізації. Прийняття оптимального рішення можливе лише за умови обов'язкового успішного розв'язання задач на кожному із попередніх етапів. Високі вимоги до інженерно-експлуатаційного рівня виробництва пояснюються детермінованим характером формування технологічних схем, а також різноманіттям станів «природи». Тобто, в залежності від умов функціонування застосування тієї чи іншої альтернативи дозволяє отримати різний результат («виграш»). Різноманіття станів системи впливає на розвиток сценаріїв виробництва, що в свою чергу потребує пошуку типів обладнання, які можуть забезпечити заданий рівень видобутку при мінімальних витратах на придбання та обслуговування.

Кількісні показники гірничого виробництва залежать, в першу чергу, від якості обладнання, яке застосовується, при цьому номенклатура його досить різноманітна, а вартість на придбання та обслуговування може відрізнитись у 2–5 разів. В Україні існує стійка динаміка до зменшення кількості очисних вибоїв, станом на початок 2018 р. функціонувало 78 очисних вибоїв [1], навіть підтримка галузі із держаного бюджету не може змінити дану тенденцію, питання збільшення видобутку не виноситься на порядок денний. При цьому, зростання вартості обладнання суттєвий обмежуючий фактор, але не єдиний, також слід розглянути питання пов'язані з проектуванням виймальної дільниці, які полягають не тільки в обґрунтуванні раціональних технологічних параметрів експлуатації але і виборі засобів механізації у відповідності до реального рівня видобутку. Гірничо-геологічні умови залягання вугільних пластів в Україні несприятливі, що відбивається на фактичному рівні добового видобутку, який не перевищує 3100 т/доб. [2], при цьому тільки 43% існуючих альтернатив обладнання можуть забезпечити реальний видобуток на рівні 1000 т/доб. [3], тому придбання закордонних більш вартісних аналогів обладнання не доцільно розглядати.

Проте і серед 43% раціональних альтернатив обладнання існують комплектації з різною вартістю на придбання та обслуговування; резервом до збільшення продуктивності, фактичним граничним рівнем видобутку, тому встановлення закономірностей формування технологічних ланцюжків очисного обладнання при заданому рівні видобутку в умовах невизначеності є актуальною науково-технічною задачею.

### 1. Постановка задачі

Встановлення закономірностей формування технологічних ланцюжків очисного обладнання з заданим рівнем продуктивності в умовах невизначеності базується на принципі послідовного зменшення невизначеності [4].

Для цього необхідно послідовно проаналізувати існуючі альтернативи  $X$  до того моменту поки не залишиться єдина оптимальна  $X^*$ . Для цього необхідно:

1. Серед існуючих комплектацій «кріплення–комбайн–конвеєр»  $X$  сформулювати множину допустимих альтернатив  $X^D$ , тобто виключити ті, які в подальшому застосовувати на практиці недоцільно. Наприклад, не слід враховувати видобувні комплекси, які оснащені технологічно несумісними типами обладнання або запропоновані альтернативи неможливо застосовувати в межах заданих гірничо-геологічних умов.
2. Серед множини  $X^D$  визначити множину ефективних альтернатив  $X^E$ , які задовольняють за одним із критеріїв, в нашому випадку, мінімально прийнятному рівню видобутку 1000 т/доб.
3. Застосувавши критерії прийняття рішень в умовах невизначеності визначити оптимальну  $X^*$  альтернативу з поміж ефективних  $X^E$ .

Оптимальна альтернатива повинна забезпечувати заданий рівень видобутку  $Q$ , при мінімальних витратах на придбання  $C \rightarrow \min$ . Дана умова продиктована тим, що умови експлуатації обладнання несприятливі, тому граничні показники навантаження на вибій не перевищують 3100 т/доб., при цьому відомо, що закордонні (більш вартісні) аналоги обладнання доцільно використовувати при забезпеченні навантаження на вибій понад 4000 т/доб. [5], тому, в першу чергу, слід звернути увагу на вітчизняні аналоги. Окрім цього, на рівень видобутку накладаються обмеження за газовим фактором, за кроком пересування механізованого кріплення, робочим режимом очисного комбайну, пропускною здатністю скребкового конвеєру, що призводить до зменшення «заявленої» виробниками продуктивності у понад 2 рази. Також, слід враховувати і пропускну здатність транспортного ланцюжку. Логічно, що при граничному рівні навантаження на вибій 1200 т/доб. на стадії проектування будуть аналізуватись альтернативи з  $Q = 1200 \dots 1500$  т/доб., а ті у яких  $Q > 1500$  т/доб. недоцільно використовувати, в першу чергу, через більші витрати на придбання та обслуговування.

Послідовне зменшення невизначеності та знаходження оптимальної альтернативи  $X^* \subset X^E \subseteq X^D \subseteq X$  ґрунтується на тому, що в кожному із можливих станів природи (сценаріїв розвитку виробництва)  $M$  розглянуті альтернативи  $X^E$  мають різну величину «виграшу»  $X_{ij}$ , де  $i = 1, 2, \dots, N$  – порядковий номер альтернативи, а  $j = 1, 2, \dots, N$  – стан природи. Тому, проведення порівняльного аналізу можливих ефективних альтернатив  $X^E$  із застосуванням критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності дозволяє для кожного можливого сценарію розвитку виробництва  $M$  отримати єдину оптимальну структуру видобувного комплексу  $X^*$ .

## 2. Методики дослідження

У відповідності до задач дослідження необхідно:

1. На основі дослідження існуючих альтернатив очисного обладнання  $X^D$ , яке експлуатується на шахтах Донбасу, сформувані множини ефективних типів очисного обладнання  $X^E$ .

2. У відповідності до сценарію розвитку технологічних схем гірничого виробництва  $M$  проаналізувати  $X^E$  та знайти оптимальну  $X^*$  структуру видобувного комплексу з позиції забезпечення прийняттого рівня видобутку  $Q$  та мінімізації собівартості  $C \rightarrow \min$ .

3. Обрати засоби підтримки прийняття рішень.

Дослідження існуючих альтернатив очисного обладнання слід проводити на основі застосування методів дискретної математики: графів та мережевих моделей. Графова інтерпретація дозволяє в наочному та компактному вигляді представити інформацію про множини ефективних типів очисного обладнання  $X^E$ , раціональні умови експлуатації та фактичний рівень видобутку. В якості критерію ефективності альтернативи розглядаємо мінімальний рівень добового видобутку  $Q = 1000$  т/доб. Окрім цього, послідовна формалізація графів дозволяє представити їх у вигляді мережевої моделі, що дозволить оптимізувати альтернативи за заданим параметром. Методологічному опису даного етапу присвячені роботи [6, 7], а практичній реалізації [8, 9].

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

Тоді, зрозуміло, що оптимальною буде альтернатива  $X_{ij}^*$ , у якій при заданому стані природи  $M$  виграш буде максимальним  $X_{ij}$ . Кожен із критеріїв дозволяє оцінити різні формати життєдіяльності підприємства. Наприклад, критерій Вальда [10] слід застосовувати при оцінці ситуації з найгіршим сценарієм, вважаємо, що необхідно оцінити величину збитків при не введені обладнання в експлуатацію, тобто обладнання придбали, а роботу не змогли забезпечити. В той же час, критерій «максимум» [11] дозволяє оцінити величину виграшу при найкращому розвитку подій, наприклад гірничо-геологічні умови сприятливі, відсутні обмежуючі продуктивність фактори, існує потреба у видобутку вугілля. В нашому дослідженні розглядаються критерії Вальда, «максимум», Лапласа, Севіджа, Гурвіца, узагальнений критерій Гурвіца.

Вірогідності виграшу  $X_{ij}$  для різних сценаріїв виробництва  $M = 1, 2, \dots, j$  можна представити матрицею «гри»

$$\begin{array}{cccc}
 X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} \\
 X_{12} & X_{22} & \dots & X_{2j} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij}
 \end{array} \tag{1}$$

В умовах коли виробництво, ще не почалось величина «виграшу» тотожна з витратами на виробництво, тобто  $X_{11} = R_{11}; X_{12} = R_{12}; \dots, X_{ij} = R_{ij}$ .

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

$$\zeta = \alpha \frac{\sum P}{m} + \beta \frac{\sum I}{n} + \gamma \frac{\sum S}{p} \tag{2}$$

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

Попарне порівняння альтернатив за парними оцінками  $(\alpha; \gamma)$  дозволяє отримати найбільш прийнятну стратегію на кожному етапі (рис. 1).

Із рисунку 1 можна зробити припущення, що коли вірогідність досягнення успіху порівняно велика  $\gamma \geq 0,3$ , а вірогідність негативних результатів не перевищує  $\alpha \leq 0,7$ , то можна обрати альтернативу з потенціалом до збільшення видобутку  $Q \rightarrow \max$  – умовно це IV група, а у випадку коли висока вірогідність негативних результатів  $\alpha \rightarrow 0$ , то варто обрати альтернативу з показниками продуктивності  $Q \equiv Q_E$  тотожними рівню ефективності  $Q_E$  – умовно це I група. Існують також проміжні групи II та III.

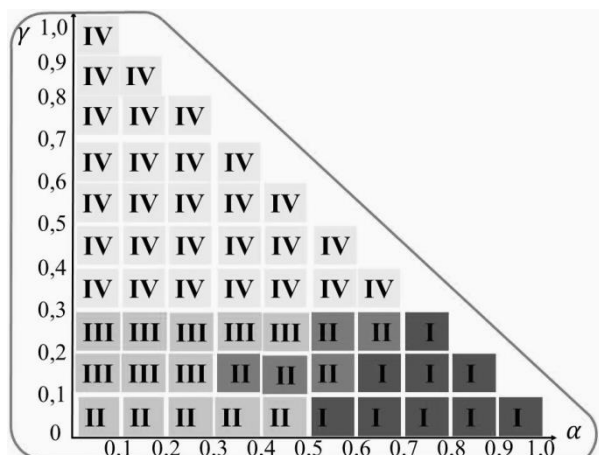


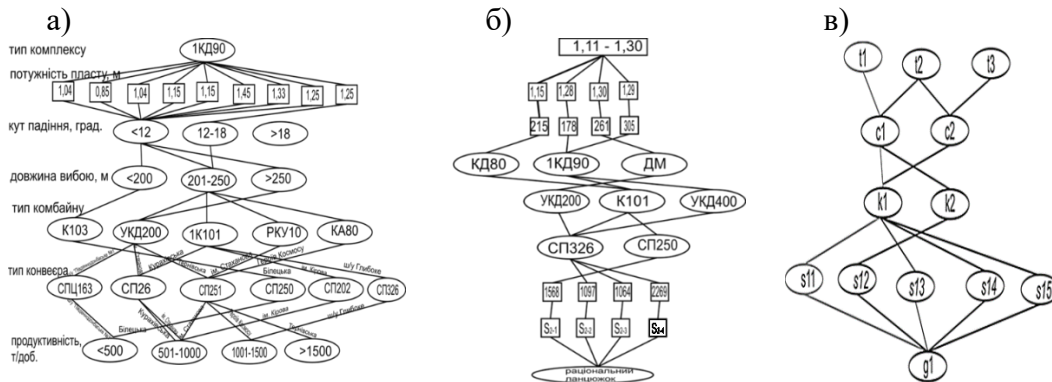
Рис. 1. Розподіл найбільш вдалих рішень

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

### 3. Результати дослідження

Перед тим як приступити до аналізу технологічних схем гірничого виробництва необхідно отримати дані про множини ефективних альтернатив очисного обладнання, тобто для кожного набору гірничо-геологічних умов експлуатації та технологічних параметрів виймальної дільниці знайти структури видобувних комплексів, які можуть забезпечити мінімально прийнятний рівень навантаження на вибій  $Q > 1000$  т/доб.

Інститутом фізики гірничих процесів НАН України з 2008 року ведеться моніторинг фактичних техніко-економічних показників діяльності вугледобувних підприємств України. Це дозволило узагальнити дані про роботу очисних вибоїв [12], розробити методологічну основу вибору із використанням графів та мережевих моделей [13], дослідити реальний потенціал наявного гірничошахтного обладнання та визначити керуючі фактори, які формують продуктивність [3, 8, 14], а також розробити програмну реалізацію [15]. Для діапазону потужностей пласта 0,90–2,0 м, з кроком 0,20 м існує набір ефективних альтернатив представлений універсальними графами (рис. 2).



**Рис. 2.** Пошук оптимальної альтернативи очисного обладнання: а) – множина існуючих типів очисного обладнання  $X^D$ ; б) – множина ефективних альтернатив  $X^E$ , яка може бути заснована при відомому стані природи  $M = 1, 2, \dots, j$ ; в) – формалізація графової моделі та пошук оптимальної  $X^*$

Для оцінки виграшу кожної із альтернатив скористаємось критеріями прийняття рішень в умовах невизначеності. Кожен із критеріїв дозволяє отримати вірогідність «виграшу» при заданому стані природи.

1) Критерій Вальда [10], згідно з ним оптимальною буде та альтернатива, яка забезпечить найкращий виграш серед можливих при несприятливому розвитку подій  $\gamma = 0; \alpha = 1$ , тобто «мінімакс» – мінімум серед втрат

$$W_{ij} = \min(X_{ij}), j = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

Наприклад існує 4 альтернативи очисного обладнання  $X_1 \dots X_4$  та чотири стани природи  $M = 1 \dots 4$ , які відповідають різним сценаріям розвитку виробництва. Тоді для пошуку оптимальної альтернативи слід знайти мінімальні «виграші» кожної альтернативи та порівняти їх між собою:

перший етап:

$$\begin{aligned} W_1 &= \min(X_{1j}), j = 1 \dots 4 \Rightarrow W_1 = \min(X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}) \\ W_2 &= \min(X_{2j}), j = 1 \dots 4 \Rightarrow W_2 = \min(X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}) \\ W_3 &= \min(X_{3j}), j = 1 \dots 4 \Rightarrow W_3 = \min(X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}) \\ W_4 &= \min(X_{4j}), j = 1 \dots 4 \Rightarrow W_4 = \min(X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}) \end{aligned} \quad (4)$$

другий етап:

$$X^* = W_{ij} = \min(W_1, W_2, W_3, W_4). \quad (5)$$

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

2) Критерій «максимакса» [11], він є оберненим до критерію Вальда, тобто вірогідність виграшу висока  $\gamma = 1; \alpha = 0$ . Згідно з цим критерієм оптимальною буде альтернатива, яка здатна забезпечити найбільший виграш. Аналогічно критерію Вальда етапів буде два: на першому шукаємо для кожної альтернативи максимальний виграш  $M_1 = \max(X_{1j}), j = 1, 2, \dots, 4 \Rightarrow M_1 = \max(X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14})$ , аналогічно і для  $M_2, M_3, M_4$ , а на другому етапі шукаємо максимальну альтернативу серед  $M_1, M_2, M_3, M_4$ , тобто

$$X^* = M_{ij} = \max(M_1, M_2, M_3, M_4). \quad (6)$$

Критерій «максимакса» можна використовувати, якщо гірничого-геологічні умови сприятливі, відсутні обмеження за газовим фактором, робочим режимом очисного комбайну, пропускну здатність транспортного ланцюжку до-

статня. Даний критерій слід застосовувати для шахт, які займаються видобутком дефіцитних марок вугілля, так як попит максимальний.

3) Критерій Лапласа [16] базується на принципі недостатності обґрунтування, тобто оптимальною буде альтернатива з максимальним середнім виграшем. Для чотирьох станів природи  $M=1..4$  відповідно вірогідність виграшу складе  $\gamma=1/M=0,25$ . Тоді, на першому етапі знайдемо середні виграші  $L_1...L_4$  за формулою

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^M X_{ij}}{M}, \quad (7)$$

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

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

4) Критерій Севіджа [17], ґрунтується на тому, що оптимальною буде та альтернатива у якій величина «недоотриманого виграшу» буде мінімальною, тобто чим менша буде різниця між недоотриманим виграшем  $R_{ij}$  та реальним  $X_{ij}$  тим краще. Проте на відміну від розглянутих у пп. 1–3 критеріїв даний критерій будується не на матриці «ігор», а на матриці «ризиків», тому замість двох три етапи. На першому етапі слід знайти максимальну величину «виграшу»  $Y_{ij}$ , тобто  $Y_1 = \max(X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14})$ , аналогічно і  $Y_2, Y_3, Y_4$ . На другому етапі для кожного зі станів природи  $M=1..4$  визначимо максимальну величину недоотриманого виграшу  $R_{ij}$ , тобто  $R_{11} = Y_1 - X_{11}$ ,  $R_{12} = Y_2 - X_{12}$ ,  $R_{13} = Y_3 - X_{13}$ ,  $R_{14} = Y_4 - X_{14}$ . За аналогією для другого технологічного ланцюжку визначимо  $R_{21}, R_{22}, R_{23}, R_{24}$ . Після цього, на третьому етапі, для кожного із ланцюжків знайдемо максимум недоотриманого прибутку, та порівняємо альтернативи

$$S_{ij} = \max(R_{ij}), j = 1, 2, \dots, M$$

$$X^* = \min(S_{ij}), i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

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



5) Критерій Гурвіца [18] 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:

$$\begin{aligned} H_{ij}(\lambda) &= \lambda X_{ij\max} + (1 - \lambda) X_{ij\min}, i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M \\ X^* &= \max(H_{ij}(\lambda)), i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (9)$$

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

б) Узагальнений критерій Гурвіца [19] дуже схожий на попередній критерій, однак на відміну від звичайного критерію Гурвіца він обчислює середньозважені значення виграшу, тобто кожен стан природи  $M = 1, 2, \dots, j$  має вірогідність  $\lambda_q$ , тоді для  $i$  – і альтернативи величина виграшу буде

$$H_i' = \sum_{q=1}^M \lambda_q x_{iq}, \quad (10)$$

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

$$\sum_{q=1}^M \lambda_q = 1 \Rightarrow \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_q = 1 \quad (11)$$

Порядок знаходження оптимальної альтернативи включає декілька етапів. На першому етапі матрицю станів  $X$  впорядкуємо за зростанням, тобто

$$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij} \rightarrow y_{i1} \leq y_{i2} \leq \dots \leq y_{ij}, j = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

На другому етапі просумуємо усі виграші за кожним із станів матриці

$$y_q = \sum_{i=1}^N y_{iq} \quad (13)$$

На третьому етапі розрахуємо суму всіх виграшів матриці

$$y_q = \sum_{i=1}^N \sum_{q=1}^M y_{iq} = \sum_{q=1}^M y_q \quad (14)$$

На четвертому етапі слід визначити відношення проектувальника до цільової функції, в разі, якщо стоїть задача пошуку альтернативи з найбільшим вирашем, тобто «оптимістичний підхід», то коефіцієнт  $\lambda_q$  для любого стану  $q$  буде

$$\lambda_q = \frac{y_q}{y} \Rightarrow \frac{y_q}{\sum_{q=1}^M y_q} \quad (15)$$

Тобто сценарію розвитку виробництва, при якому буде досягнуто максимальний вираш присвоюється більший коефіцієнт. Інакше, якщо стоїть задача мінімізації втрат («песимістичний підхід») сценарію розвитку виробництва, при якому будуть найгірші результати, слід задати більший коефіцієнт, тобто

$$\lambda_q = \frac{y_{N-q+1}}{y} \Rightarrow \frac{y_{N-q+1}}{\sum_{q=1}^M y_q} \quad (16)$$

Тоді, оптимальною буде альтернатива з максимальним значенням узагальненого критерію Гурвіца

$$X^* = H_{ij} = \max(H_i'), i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

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

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

#### 4. Обговорення результатів

Слід зазначити, що добове навантаження на вибій це величина, яка формується співвідношенням вірогідностей вдалих  $\gamma$  та невдалих  $\alpha$  сценаріїв, тому для кожного їх співвідношення існує окремий технологічний ланцюжок, який здатний забезпечити необхідний видобуток.

Кожен із критеріїв включає декілька етапів (від двох до чотирьох), які можна програмно реалізувати.

Таблиця 1.

**Характеристики програмної реалізації**

Критерій	Рівняння	Кількість кроків	Наявність додаткових побудов	Спосіб завдання
Вальда	$W_{ij} = \min(X_{ij})$	2	ні	матричний
максимакса	$X^* = M_{ij} = \max(M_{ij})$	2	ні	
Лапласа	$X^* = L_{ij} = \max(L_{ij})$	2	ні	
Севіджа	$X^* = \min(S_{ij})$	3	так	
Гурвіца	$X^* = \max(H_{ij}(\lambda))$	2	ні	
Гурвіца (узагальнений)	$X^* = H_{ij} = \max(H_i)$	4	так	

Як видно із таблиці 1 результати попередніх досліджень з вибору сценаріїв розвитку виробництва [20] та узагальнення техніко-економічних показників роботи на шахтах Донбасу [2, 3, 7, 8] можуть бути використані на початковому етапі проектування, а подальша програмна реалізація дозволить знайти оптимальну структуру не тільки з позиції мінімізації собівартості та інших параметрів, а й визначити для кожного сценарію розвитку виробництва найбільш прийнятну комплектацію видобувного комплексу. Окрім цього, запропонований підхід буде доповнення до вже відомих способів планування гірничих робіт [21–30].

В роботі [31] наведено програмну реалізацію з вибору критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності при освоєнні рудних родовищ, однак, сучасний розвиток інформаційних технологій дозволяє вивести розв’язок задач на новий рівень: по-перше, значно спростити процес вводу інформації та інтерпретації результатів, а по-друге, запровадити описаний підхід у інші галузі виробництва.

**Висновки**

Розглянутий в роботі підхід є досить універсальним та дозволяє враховувати 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 обмежуючі продуктивність фактори, 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).

Варто відзначити, що попит на той чи інший вид корисних копалин непостійний, тому підприємства переживають різні стадії життєдіяльності від активного зростання видобутку до стабільного падіння, більш того, не виключається можливість погіршення гірничо-геологічних умов, а також перерахунок запасів, дорозвідка, і як наслідок, будівництво нових горизонтів, тому необхідно мати уявлення про потенціал родовища, його чутливості до інновацій – представлення можливих варіантів життєдіяльності родовища у вигляді сценаріїв дозволяє оптимізувати параметри експлуатації, а кожен із приведених критеріїв є основним на певному етапі розвитку.

1. Poyasnyuval'na zapiska do proektu Zakonu Ukraïni Pro vnesennya zmin do Zakonu Ukraïni «Pro Derzhavnij byudzheth Ukraïni na 2018 rik» shchodo nalezhnogo finansovogo zabezpechennya derzhavnogo sektoru vugil'noï galuzi (2018). Retrieved from [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=64004](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=64004).
2. Khorolskyi, A.A., Grinev, V.G. & Synkov, V.G. (2016). Obosnovanie vozmozhnosti primeneniya klassicheskoy teorii grafov dlya vybora kompleksov gornogo oborudovaniya. In Suchasni innovacijni tekhnologii pidgotovki inzhenernih kadriv dlya girnichoï promislovosti i transportu 2016, (pp. 57–64). Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychy universytet.
3. Khorolskyi, A.A. (2018). Ocinka ta pidvishchennya nadijnosti tekhnologii rozrobki vugil'nih ro-dovishch na osnovi optimizacii parametriv vidobuvnih kompleksiv. Ph.D. IFGP the NASU.
4. Bogoyavlenskij, S.B. (2014). Teoreticheskie i prakticheskie aspekty prinyatiya reshenij v usloviyah neopredelennosti i riska. SPb.: Izd-vo SPbGEHU.
5. Pisarenko M.V. (2011). Optimizaciya osnovnyh parametrov shaht tipa «shahta-lava». Gornyj inform.-analit. byull. (nauchno-tekhnicheskij zhurnal), (1), 48–51.
6. Grinyov, V. (2016). Grafy i seti dlya vybora gorno-shahtnogo oborudovaniya. Dnipro: Porogu.
7. Synkov V.G., Grinev, V.G. & Khorolskyi, A.A. (2016). Ocenka urovnya vzaimosvyazi ochistnogo oborudovaniya v sostave mekhanizirovannogo kompleksa. Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: «Informatika, kibernetika, obchislyval'na tekhnika», (22), 124–132.
8. Khorolskyi, A.A., Grinev, V.G., & Synkov, V.G. (2016). Vy`bir kompleksiv girny`cho-shakhtnogo obladnannya na osnovi teorii grafiv. Visnyk Nacional'noho texničnogo universytetu Ukraïny "Kyjivs'kyj politexničnyj instytut". Serija "Hirnyctvo", 31, 57-64. <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2016.31.69892>.
9. Synkov, V.G., Grinev, V.G., & Khorolskyi, A.A. (2016). Primenenie bazovyh algoritmov optimizacii dlya vybora ochistnogo oborudovaniya. Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Informatika, kibernetika ta obchislyval'na tekhnika, (2), 117-124.
10. Wald, A. (1945). Statistical decision functions which minimize the maximum risk. The Annals of Mathematics, 46(2), 265-280.
11. Albright, S.C. (1993). A Statistical Analysis of Hitting Streaks in Baseball. Journal of the American Statistical Association 88, (424), 1175–1196.

12. Nikolaev, P.P. (2014). Vdoskonalennya tekhnologii mekhanizovanogo vidobutku vugillya na osnovi ocinki rivnya vzaemozv'yazku tipiv ochisnogo obladnannya. Ph.D. IFGP the NASU.
13. Grinev, V.G. & Nikolaev, P.P. (2013). Algoritmy optimizacii setevykh modelej dlya vybora racional'nyh tekhnologicheskikh cepochek ochistnogo oborudovaniya. In *Tekhnogennye katastrofy: modeli, prognoz, preduprezhdenie*, (90-95 pp.), Dnepropetrovsk. NGU.
14. Khorolskiy, A.A., Grinev, V.G., & Synkov, V.G. (2015). Racional'nyj vybor sostava mekhanizirovannykh kompleksov v usloviyah ehkspluatacii zaboev Donbassa. *Forum gornikov* 2015, (1), 58-67.
15. Grinev, V.G., & Khorolskiy, A.O. (2018). Kompiuterna prohrama «Prohrama vyboru optymalnykh komplektatsii ochysnoho obladnannya na osnovi universalnykh hrafiv» («CountsCEM.v1.p2.6\_c25»). Patent No. 74856, Ukraine.
16. Schniederjans, M.J., Hamaker, J.L. & Schniederjans, A.M. (2010). *Information technology investment: Decision-making methodology*. World Scientific Pub Co Inc.
17. Savage, L.J. (1951). The theory of statistical decision. *Journal of the American Statistical Association*, (46), 55-67.
18. Hurwicz, L; & Arrow, K.J.(1953). Hurwicz's optimality criterion for decision making under ignorance. Technical Report 1953, (6). Stanford University.
19. Hurwicz, L. (1995). What is the Coase Theorem? *Japan and the World Economy*, 7(1), 49–74.
20. Khorolskiy A.A. & Grinev V.G. (2018). Vyor scenariya osvoeniya mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. *Geologiya i ohrana nedr*, (68),68–75.
21. Vladyko, O., Kononenko, M., & Khomenko, O. (2012). Imitating modeling stability of mine workings. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 147-150. <https://doi.org/10.1201/b13157-26>.
22. 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>.
23. Shi, Q. & Erhan, K. (2016). New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimization problems. *Expert Systems with Applications*, 43(1), 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.08.044>.
24. Mamajkin, O.R. (2014). *Obg'runtuvannja parametriv tehnologichnyh shem antracytovykh shaht dlja i'h adaptacii' do innovacij*. Ph.D. NMU.
25. Brazil, M., & Thomas, D. (2007). Network optimization for the design of underground mines. *Networks*, 49(1), 40-50. <https://doi.org/10.1002/net.20140>.
26. Fioroni, M., Santos, Letícia, C., Franzese, L., Seixas, J., Penna, B., & Alkmim, G. (2014). Logistic evaluation of an underground mine using simulation. *Revista Escola de Minas*, 67(4), 447-454. <https://dx.doi.org/10.1590/0370-44672014670181>.
27. Brazil, M., Thomas, D.A., & Weng, J.F. (2005). Cost Optimization for Underground Mining Networks. *Optimization and Engineering*, 6(2), 241-256. <https://doi.org/10.1007/s11081-005-6797-x>.
28. Guang, X., Jinxin, H., Baisheng, N., Chalmers, D. & Zhuoming, Y. (2017). Calibration of Mine Ventilation Network Models Using the Non-Linear

- Optimization Algorithm. Energy, 31(11), 11-19. <https://doi.org/10.3390/en11010031>.
29. Amankwah, H. (2011). Mathematical Optimization Models and Methods for Open-Pit Mining. Ph.D. Linköping University.
30. Shi, Q., & Erhan, K. (2016). New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimization problems. Expert Systems with Applications, 43(1), 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.08.044>.
31. Grinev V.G., Zubkov V.P. Izakson V.Yu. Shkulev S.P. (1999). Reshenie gornyh zadach na ENVM pri osvoenii rudnyh mestorozhdenij: Novosibirsk, Nauka.

*А.А. Хорольский, В.Г. Гринев*

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ**

**Цель.** Разработать новый подход к проектированию технологических схем горного производства основанный на исследовании операций.

**Методика.** Для обоснования рационального уровня производительности в очистном забое могут быть использованы методы исследования операций, основанные на применении критериев принятия решений в условиях неопределенности.

**Результаты.** Установлено, что процесс выбора очистного оборудования носит детерминированный характер, который демонстрирует смену «состояний природы» в зависимости от принятых решений. Представление множеств рациональных типов оборудования и сравнение их с критериями принятия решений позволяет определить рациональный уровень суточной нагрузки на очистной забой и снизить затраты на приобретение и обслуживание оборудования, при этом учитываются ограничивающие факторы, влияющие на величину ожидаемой производительности. Последовательное сравнение альтернатив позволяет установить поле приемлемых решений для различных сценариев развития производства.

**Научная новизна.** Установлены закономерности формирования технологических цепочек очистного оборудования при заданном уровне производительности в условиях неопределенности в зависимости от условий эксплуатации и параметров оборудования.

**Практическая значимость.** Разработанная система принятия решений, позволяет оптимизировать параметры эксплуатации, снизить себестоимость добычи, выбрать структуру механизированного комплекса с заданным уровнем производительности. Описанные в работе подходы могут быть использованы как на стадии проектирования очистного забоя, так и в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** исследование операций, проектирование производства, механизированный комплекс, выбор критерия, условия неопределенности, приемлемое решение, оптимизация, рациональный уровень производства, формат жизнедеятельности, динамическое программирование.

*A.A. Khorolskyi, V.G. Hrinov*

## LAYOUT OF PLAN PROCESS CHART OF MINING UNDER THE CONDITIONS UNCERTAINTIES

**Purpose.** To propose a new approach to the design of layout of plan process chart of mining based on the study of operations.

**Methods.** It has been established that decision-making criteria under conditions of uncertainty can be used to substantiation a rational level of production.

**Findings.** It has been established that the process of selecting mining equipment has a deterministic character, demonstrating the change of “states of nature” depending on the decisions made. Representing sets of rational types of equipment and comparing them with decision-making criteria allows us to determine a rational level of production of the longwall face and reduce the cost of purchasing and mining equipment, while taking into account the restrictive factors affecting the value of the wait production. Sequential comparison of alternatives allows you to set the field of acceptable solutions for different production derivation scenario.

**Originality.** Regularities of forming technological schemes of coalfield operation with a given level of performance, taking into account the relationship between technological parameters of mining face, operational parameters of the mining equipment, technical and economic performance are defined.

**Practical implications.** We developed the system for decision-making support, which allows optimizing operational parameters, reducing the production prime cost, and selecting the structure of the mechanized complex of mining equipment with a specified level of performance.

**Keywords:** operations research, manufacturing engineering, longwall set of equipment, criterion selection, conditions of uncertainty, acceptable solution, optimization, rational level of production, life sustenance or vital life sustenance, dynamic programing.