

**OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT
OF COAL MINING IN UKRAINE**

**ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РОЗВИТКУ
ВУГЛЕВИДОБУВАННЯ В УКРАЇНІ**

Makarov Vitaliy¹

DOI: http://dx.doi.org/10.30525/978-9934-571-28-2_18

Abstract. The theoretical generalization was carried out and a new solution of the actual scientific problem of optimization of the technological development of the coal industry was made, taking into account the requirements of competitiveness in the world markets for coal products.

The purpose of the study is to develop mathematical models and tools for optimizing the technological development of coal mining based on the use of energy and economic indicators of the effectiveness of the introduction of advanced technologies.

A mathematical model for the optimization of the technological development of coal mining has been created, which, in contrast to the well-known industry-wide balance optimization models, is aimed at increasing the production efficiency of the selected subsystems of the industry by the criterion of their overall productivity. The model, constructed as a problem of mixed-integer programming, made it possible to determine the optimal set of options for the technical re-equipment of mines that would ensure the industry's competitiveness in the world coal market.

A new method has been developed for the formation of a multitude of promising options for technological re-equipment of mines, which, with the help of comparing the numerical values of integrated quality criteria, makes a decision to choose options for equipping mines with high-performance mining equipment that best meets the geological and geological conditions with maximum efficiency and reliability of its operation. Unlike the existing approaches to justifying the choice of types of mining equipment, the proposed method uses in the integral quality criteria not only indicators of compliance with the mining and geological conditions of specific mines,

¹ Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

but also predicted ash content of extracted coal, indicators of energy and economic efficiency of its operation.

Calculations of the optimal option for the re-equipment of the coal industry have proved the possibility of finding promising state mines at the level of profitability through the introduction of efficient coal mining technologies. This will allow to increase the volume of coal mining by 2 times, and in conditional fuel – by 2.3 times due to the reduction of ash content of extracted coal and on this basis to achieve the competitiveness of the industry as a whole.

The developed model and software tools for optimizing the technological development of the coal industry are intended to select the optimal options for the modernization of mines in forecasting the development directions of the coal industry.

1. Вступ

Україна належить до енергодефіцитних країн, де імпорт органічного палива перевищує 50% від загальної потреби. Кризові явища в галузях паливно-енергетичного комплексу країни, анексія Криму та окупація частини територій Донецької і Луганської областей, брак валютних коштів для імпорту енергоносіїв в необхідних обсягах призвели до появи дефіциту палива, порушень стабільного енергопостачання і, як наслідок, до значних суспільних збитків. За таких обставин основним напрямком посилення енергетичної безпеки на сучасному етапі економічного розвитку є збільшення обсягів видобутку власних енергоносіїв.

В Україні вугілля – це єдиний енергоресурс, покладів якого достатньо на сотні років, що визначає його провідну роль в забезпеченні енергетичної безпеки держави. Проте сучасний технічний і технологічний стан вуглевидобування вкрай незадовільний і потребує докорінного оновлення.

За таких умов актуальним є проведення досліджень з прогнозування технологічного і технічного розвитку вуглевидобування за умови впровадження у виробництво досягнень науково-технічного прогресу та з оцінки економічної, енергетичної та екологічної ефективності таких заходів.

Методичними питаннями оптимізації розвитку вугільної промисловості займалось багато українських та зарубіжних вчених: Кіяшко Ю.І.

Optimization of technological development of coal mining in Ukraine

(оцінка ефективності роботи шахт при різних варіантах використання очисного обладнання) [1, с. 24-26], Кулик М.М., Алавердян Л.М. (оптимізація розвитку вугільної промисловості) [2, с. 4-15; 3, с. 121-123], Павленко І.І. (прогнозування розвитку вугільної галузі при обмежених інвестиціях) [4, с. 93-97], Каплін М.І., Білан Т.Р. (моделювання розвитку вугільної промисловості в умовах світового ринку) [5, с. 17-21], J. Henderson (модель попиту і пропозиції на ринках вугільної продукції) [6, с. 336-346], W. Suwala (модель реструктуризації вугільної галузі) [7, с. 41-49] та інші.

На нинішньому етапі розвитку науково-технічного прогресу запроваджені у виробництво, знаходяться на стадіях, близьких до впровадження, або розробляються різноманітні технології видобутку вугілля із застосуванням різних видів гірничої техніки та устаткування, кожний з яких має певні обмеження у використанні по гірничо-геологічних умовах вугільних родовищ, відрізняється різною енергетичною та економічною ефективністю. Від правильного вибору техніки і технологій вуглевидобутку, своєчасної заміни морально і фізично застарілого устаткування залежить ефективність функціонування вуглевидобувних підприємств і галузі в цілому.

У зв'язку з цим задача створення математичних моделей і програмних засобів оптимізації технологічного розвитку видобутку вугілля в Україні є актуальною.

Метою дослідження є розроблення математичних моделей та засобів оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування на основі використання енергетичних та економічних показників ефективності застосування прогресивних технологій видобутку вугілля.

Мета роботи зумовила необхідність вирішення наступних задач:

- розроблення математичної моделі оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування в умовах світового ринку;
- розроблення методу формування множини перспективних варіантів технологічного переоснащення шахт за показниками енергетичної та економічної ефективності;
- визначення напрямів та оптимальних обсягів впровадження ефективних технологій вуглевидобування в Україні в умовах світового ринку.

В роботі застосовані наступні методи дослідження: змішано-цілочисельне лінійне програмування – для розробки моделі оптиміза-

ції розвитку технологічних систем вуглевидобування; апроксимація залежностей та регресійний аналіз – для визначення прогнозної собівартості вугільної продукції; багатокритеріальна оптимізація та порівняльний аналіз – для формування множини перспективних варіантів технологічного переобладнання шахт; експертні оцінки – для визначення коефіцієнтів значимості критеріїв якості.

2. Модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування

Більшість моделей розвитку вугільної промисловості України спирається на достатньо деталізовану інформацію стосовно всіх вуглевидобувних підприємств, зокрема, економічні показники їх діяльності. Очевидним для інформаційного наповнення таких моделей є врахування собівартостей видобутку для всіх без виключення шахт, у тому числі й приватизованих, а також тих, що належать фінансово-промисловим групам тощо. Необхідність такого врахування спричинена перш за все обмеженнями загального балансу вугільної продукції на основі прогнозних значень потреби.

З іншого боку, поточний період розвитку й трансформації вуглевидобування в Україні характеризується змінами інституційного устрою галузі, зокрема, приватизацією найбільш рентабельних підприємств, й, відповідно, майже повною відсутністю інформації щодо економічних аспектів їх виробничої діяльності.

У цих умовах загальні моделі балансу вугільної продукції в країні виявляються інформаційно незабезпеченими як у частині економічних показників, так і щодо можливих перспективних досліджень впливу інвестування (капіталовкладень) на технологічні та економічні показники роботи шахт.

Крім того, в країні намітився стійкий дефіцит вугілля, пов'язаний із загальною кризою в економіці, втратою частини виробничих потужностей, високим рівнем витрат держави на потреби оборони.

Тому, виходячи з цих особливостей поточного стану вугільної галузі, при моделюванні технологічного розвитку вуглевидобування обрано клас моделей оптимізації виробничої потужності, які дозволяють виділяти виробничі підсистеми галузі, зокрема ті, що надають необхідну техніко-економічну інформацію. Конкурентоспроможність підприємств в розробленій моделі запропоновано враховувати шляхом співставлення вартостей вугілля власного видобутку при прогнозова-

Optimization of technological development of coal mining in Ukraine

них заходах з розвитку та технічного переоснащення та відповідних видів вугільної продукції на світових ринках.

Виходячи з пріоритетності підвищення рівня енергетичної безпеки країни найважливішою метою реформування й розвитку вугільної промисловості в сучасних умовах є збільшення обсягів власного видобутку вугілля при забезпеченні беззбитковості функціонування галузі, її конкурентоздатності на світових ринках вугільного палива.

Математична модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування, розроблена для вирішення цієї задачі, передбачає попереднє формування множини всіх розглядуваних варіантів переобладнання, для яких розраховуються вектори показників оцінки технологічного розвитку. Ці показники використовуються для визначення параметрів задачі вибору оптимального набору варіантів технологічного переобладнання шахтопідприємств за критерієм загального обсягу видобутку галузі.

Під варіантом технологічного переобладнання шахтопідприємства в моделі розглядається множина векторів стану її технологічних видобувних одиниць – лав, оснащених комплексами видобувного обладнання нового технічного рівня (НТР). Лави можуть бути переоснащені новими видами гірничо-видобувної техніки, або зберегти своє діюче обладнання в залежності від наявності новітніх видів устаткування, що відповідають гірничо-геологічним умовам шахти. В обох таких випадках лава описується вектором стану, елементами якого є прогностичні параметри її функціонування після реконструкції. Відповідно, стан функціонування шахти в цілому описується інтенсивностями виробничої діяльності лав з прогнозованими технологічними параметрами. Ці інтенсивності являють собою бінарні змінні, які показують доцільність використання окремої лави шахтопідприємства після переобладнання. Вектор таких інтенсивностей будемо називати варіантом переоснащення досліджуваної множини шахтопідприємств (галузь в цілому, шахти, що знаходяться у державній власності тощо).

Очікуваним необхідним наслідком переоснащення має бути конкурентоздатність підприємств вугільної галузі на світовому ринку вугільного палива. У загальному випадку конкурентоздатним має бути кожне окреме видобувне підприємство. Проте, в наявних наразі умовах збитковості вугільної промисловості України та обмежених інвестиційних коштів у даній моделі розглядається кон-

курентоздатність групи підприємств в цілому. Збитковість окремих шахт вважається допустимою з метою забезпечення стратегічної вимоги підвищення рівня енергетичної безпеки шляхом зростання власного видобутку вугілля. Така умова конкурентоздатності має вигляд:

$$\Delta_K = \sum_{j=1}^{N_{III}} \left((1 + R_j^{npoг}) \cdot S_j^{npoг} (X_j^{npoг}) - \bar{C}_{p,j} \right) \cdot X_j^{npoг} \leq 0, \quad (1)$$

де Δ_K – конкурентна різниця вартостей вугілля власного видобутку та імпортованого зі співставними споживчими характеристиками, грн; $R_j^{npoг}$ – прогнозна рентабельність шахтопідприємства j ; $S_j^{npoг}$ – прогнозна собівартість вугільної продукції шахтопідприємства j , грн/т; $X_j^{npoг}$ – прогнозна виробнича потужність шахти j , т/рік; $\bar{C}_{p,j}$ – прогнозне значення ціни на імпортоване зі світового ринку вугілля, вид та споживчі характеристики якого є співставними із відповідними показниками вугілля, що видобувається шахтопідприємством j , грн/т; N_{III} – число шахт розглядуваної групи.

Собівартість вугільної продукції співставляється шахті в цілому і розраховується за апроксимаційною залежністю від сукупного обсягу видобутку шахти, представленою на рисунку.

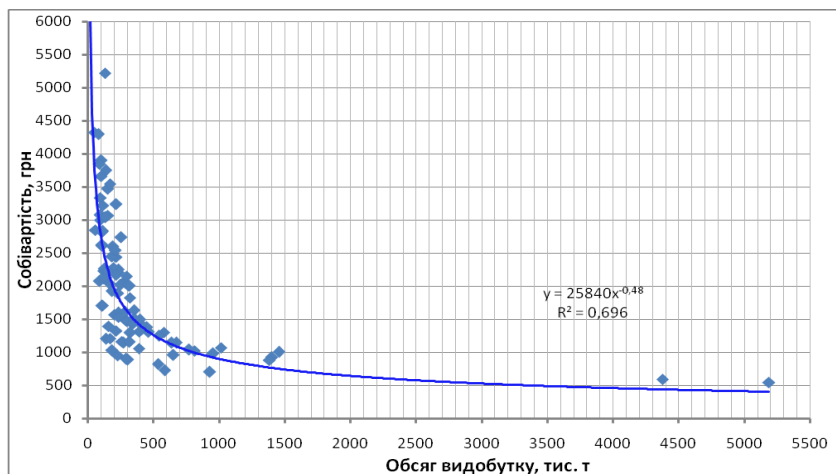


Рис. 1. Залежність собівартості вугільної продукції від обсягів видобутку вугілля

Optimization of technological development of coal mining in Ukraine

Ця залежність отримана за результатами обробки даних техніко-економічних показників методами математичної статистики з використанням кореляційно-регресійного аналізу. Для шахт з різним рівнем механізації, плановими та прогнозними показниками видобутку вугілля, гірничо-геологічними і геомеханічними умовами вказана залежність найбільш достовірно описується степеневою функцією:

$$S(X) = 25840 \cdot X^{-0,48}, \quad (2)$$

де S – собівартість, грн/т; X – видобуток, тис. т/рік.

Враховуючи (2) в (1) для конкурентної різниці цін маємо:

$$\Delta_K = \sum_{j=1}^{N_{III}} \left((1 + R_j^{npoc}) \cdot 25840 \cdot \left(\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j} \cdot \xi_{v_j} \right)^{-0,48} - \bar{C}_{p,j} \right) \cdot \left(\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j} \cdot \xi_{v_j} \right) \leq 0, \quad (3)$$

де x_{v_j} – прогнозна виробнича потужність лави при здійсненні реконструкції або технічного переоснащення за варіантом v_j , т/рік; ξ_{v_j} – шукана бінарна змінна вибору варіанта v_j технічного переоснащення шахти j ; $\xi_{v_j} = 1$, якщо варіант v_j обрано в оптимальному плані переоснащення галузі і $\xi_{v_j} = 0$ в протилежному випадку; v_j – індекс варіанта технічного переоснащення лави шахти j ; V_j – число варіантів технічного переоснащення шахти j .

Як видно з (3) умова конкурентоздатності групи вугільних підприємств є нелінійною функцією бінарної змінної інтенсивності використання варіанта переобладнання лави. Врахування цієї умови при оптимізації вибору варіанта переоснащення призводить до нелінійної задачі цілочисельного програмування. Розв'язання таких задач відомими методами оптимізації може призвести до хибних розв'язків і потребує застосування складних оптимізаційних алгоритмів. Тому в запропонованій моделі умова конкурентоздатності враховується в наближеному лінеаризованому вигляді із використанням мінімального значення собівартості видобутку у множині допустимих варіантів переоснащення. Для визначення цієї множини в роботі передбачено апіорне вирішення двох оптимізаційних задач:

– розрахунку мінімально допустимих виробничих потужностей шахт після модернізації за умови перевищення їх вихідних встановлених потужностей;

– концентрації виробництва, тобто визначення мінімальної кількості лав шахт, при роботі яких після переоснащення досягається задане значення видобувної потужності.

З допомогою розв’язків цих задач та відповідних їм значень виробничої потужності шахти отримується нижча межа собівартості видобутку, що використовується в остаточній моделі вибору варіантів переоснащення за критерієм сумарної видобувної потужності, що максимізується.

Задачу визначення мінімально допустимого видобутку після переоснащення можна записати у наступному вигляді. Необхідно знайти множину бінарних змінних $\{\eta_{v_j}\}$ інтенсивностей використання варіанту переоснащення лави v_j шахти j , що надає мінімуму прогнозній виробничій потужності шахт

$$\sum_{j=1}^{N_w} \sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \eta_{v_j} \rightarrow \min \quad (4)$$

за умови перевищення загальним прогнозованим обсягом видобутку $x_{v_j}^{прог}$ після переобладнання його поточного значення $X_j^{ссм}$

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \eta_{v_j} - X_j^{ссм} \geq 0 \Big|_{j=1, N_w} \quad (5)$$

Отриманим розв’язкам цієї задачі $\eta_{v_j}^*$ відповідають прогнозні видобувна потужність

$$\bar{X}_j^{видоб} = \sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \eta_{v_j}^* \quad (6)$$

та собівартість видобутку

$$\bar{S}_j^{видоб} = 25840 \cdot (\bar{X}_j^{видоб})^{-0,48} \quad (7)$$

Задача концентрації виробництва записується у вигляді:

$$\sum_{j=1}^{N_w} \sum_{v_j=1}^{V_j} \zeta_{v_j} \rightarrow \min \quad (8)$$

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \zeta_{v_j} - X_j^{ссм} \geq 0 \Big|_{j=1, N_w} \quad (9)$$

Тут необхідно знайти вектор бінарних інтенсивностей $\{\zeta_{v_j}\}$ використання варіанта переоснащення лави v_j шахти j , що надає мінімум кількості діючих лав при задоволенні умови перевищення прогнозваної виробничої потужності шахт. Розв’язкам цієї задачі $\zeta_{v_j}^*$ співставляються відповідні прогнозна виробнича потужність шахти

$$\bar{X}_j^{\text{конц. вироб}} = \sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{\text{прог}} \cdot \zeta_{v_j}^*, \quad (10)$$

а також собівартість видобутку

$$\bar{S}_j^{\text{конц. вироб}} = 25840 \cdot \left(\bar{X}_j^{\text{конц. вироб}} \right)^{-0,48} \quad (11)$$

Умова допустимого збільшення встановленої потужності шахти після переоснащення (модернізації) записується наступним чином:

$$X_j^{\text{вст. мод}} = X_j^{\text{вст}} + \Delta X_j^{\text{вст. мод}} = (1 + \delta_j^{\text{макс}}) \cdot X_j^{\text{вст}}, \quad (12)$$

де $\Delta X_j^{\text{вст. мод}}$ – приріст встановленої потужності шахти j після переоснащення всіх лав за вибраними варіантами, т/рік; $\delta_j^{\text{макс}} = 0,3$ – допустиме перевищення встановленої потужності шахти після переоснащення.

Значення коефіцієнта $\delta_j^{\text{макс}}$ у даній роботі взято на рівні 30 % від потужності шахти, що можна вважати цілком допустимим за наявних наразі середньогалузевих рівнів коефіцієнтів використання машинного часу.

Розв'язки вказаних задач дозволяють визначити мінімальну

$$\bar{X}_j^{\text{мін}} = \min \left(\bar{X}_j^{\text{видоб}}, \bar{X}_j^{\text{конц. вироб}}, \bar{X}_j^{\text{вст. мод}} \right) \quad (13)$$

та максимальну

$$\bar{X}_j^{\text{макс}} = \max \left(\bar{X}_j^{\text{видоб}}, \bar{X}_j^{\text{конц. вироб}}, \bar{X}_j^{\text{вст. мод}} \right) \quad (14)$$

виробничі потужності шахти j після переобладнання і мінімальну прогностну собівартість видобутку в множині допустимих варіантів переобладнання

$$S_j^{\text{прог, мін}} = 25840 \cdot \left(\bar{X}_j^{\text{макс}} \right)^{-0,48}. \quad (15)$$

Ці величини використовуються для формування обмежень остаточної моделі оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування. Модель може бути записана у вигляді наступної задачі змішано-цілочисельного лінійного програмування. Необхідно визначити таку множину бінарних інтенсивностей ξ_{v_j} використання варіанта v_j технологічного переобладнання шахти j , що надають максимум прогнозованому внаслідок модернізації загальному обсягу видобутку вугілля

$$\sum_{j=1}^{N_{ш}} \sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{\text{прог}} \cdot \xi_{v_j} \rightarrow \max \quad (16)$$

за умов:

– збільшення прогнозованої виробничої потужності шахти

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{npoз} \cdot \xi_{v_j} - X_j^{nom} \geq 0 \Big|_{j=1, N_w}, \quad (17)$$

– обмеження прогнозованої виробничої потужності шахти її мінімальним та максимальним значенням, що визначаються вихідною множиною варіантів переобладнання

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{npoз} \cdot \xi_{v_j} - \bar{X}_j^{min} \geq 0 \Big|_{j=1, N_w}, \quad (18)$$

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{npoз} \cdot \xi_{v_j} - \bar{X}_j^{max} \leq 0 \Big|_{j=1, N_w}, \quad (19)$$

– конкурентоздатності вугільної промисловості на світовому ринку вугілля, що виражається меншою загальною ціною вугілля власного видобутку відносно ціни імпортованого вугілля відповідних марок та показників якості

$$\Delta_K^{max} = \sum_{j=1}^{N_w} \left((1 + R_j^{npoз}) \cdot S_j^{* npoз, min} - \bar{C}_{p,j} \right) \cdot \sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{npoз} \cdot \xi_{v_j} \leq 0, \quad (20)$$

– обмеженого обсягу капіталовкладень у переобладнання шахти j

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} K_{v_j}^T \cdot \xi_{v_j} \leq K_j^T, \quad (21)$$

– обмеженого обсягу капіталовкладень у переобладнання всіх шахт галузі

$$\sum_{j=1}^{N_w} \sum_{v_j=1}^{V_j} K_{v_j}^T \cdot \xi_{v_j} \leq K_{\Sigma}^T. \quad (22)$$

В моделі (16) – (22): $x_{v_j}^{npoз}$ – прогнозна виробнича потужність лави при здійсненні технічного переоснащення за варіантом v_j , т/рік; X_j^{nom} – поточна виробнича потужність шахти j , т/рік; Δ_K^{max} – максимально досяжна в допустимій множині варіантів переобладнання конкурентна різниця цін вугілля власного видобутку та імпортованого зі співставними споживчими характеристиками, грн; $K_{v_j}^T$ – обсяг інвестицій у варіанті v_j технічного переоснащення шахти j , грн; K_j^T – граничний обсяг інвестицій у технічне переоснащення шахти j , грн; K_{Σ}^T – загальний обсяг інвестицій у технічне переоснащення розглядуваної групи шахтопідприємств за період інвестування T , грн.

Цільовою функцією моделі є сукупний прогнозний видобуток всіх шах-топідприємств (16), а змінними оптимізації – бінарні змінні інтенсивності використання варіантів модернізації окремих ділянок – лав шахти. Сумарний видобуток лав обмежується прогнозованим значенням видобутку шахти (19), а необхідні для модернізації інвестиції – загальним планованим обсягом інвестицій у шахту (20). Обмеження (18) подає умову конкурентоздатності розглядуваної підмножини в цілому на світовому ринку вугілля. Вона виражається співвідношенням неперевищення сукупною вартістю вугільної продукції цих шахт вартості вугільного палива, яке може потенційно постачатися за імпортом.

Описана вище модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування поєднує можливості довгострокового та короткострокового прогнозування розвитку виділеної групи вуглевидобувних підприємств. З метою визначення найбільш оптимальних короткострокових варіантів переобладнання спочатку знаходиться розв'язок задачі довгострокового прогнозування з використанням в обмеженнях (21–22) обсягів інвестицій довгострокової програми модернізації. Надалі отриманий розв'язок розглядається як допустима область оптимізаційних задач послідовних короткострокових періодів з відповідними інвестиційними обмеженнями.

3. Метод формування варіантів переоснащення шахт

При формуванні множини перспективних варіантів технологічного переоснащення шахт використовується запропонований автором підхід до вирішення задачі вибору обладнання, який дозволяє за допомогою порівняння числових значень інтегральних критеріїв якості обґрунтовано прийняти рішення про вибір найбільш перспективного варіанту оснащення лави високопродуктивною видобувною і транспортною технікою, яка максимально відповідає гірничо-геологічним умовам конкретної лави при максимальній ефективності і надійності її експлуатації.

При порівнянні декількох варіантів комплектації видобувних комплексів, а також окремих їх складових в числі критеріїв q_i були прийняті:

1. Кріплення:

- відповідність потужності пласта q_1 , м;
- відповідність характеристикам покрівлі і ґрунту q_2 ;

– питома вартість секції кріплення $q_3 = W_{KP}$ визначається за формулою:

$$W_{KP} = \frac{C_{KP}}{M_{KP}}, \text{ грн/т}, \quad (23)$$

де C_{KP} – ціна секції кріплення, грн; M_{KP} – вага секції кріплення, т.

II. Комбайн:

– можливість спільної роботи з кріпленням q_4 ;

– відповідність потужності пласта q_5 , м;

– технічна продуктивність впровадженого обладнання $q_6 = Q_T$, яка обчислюється за формулою [8, с. 68]:

$$Q_T = 60 \cdot b \cdot m_p \cdot V_{II} \cdot K_M \cdot \gamma, \text{ т/год}, \quad (24)$$

де b – ширина захоплення робочого органу, м; m_p – потужність пласта, м; V_{II} – середня швидкість руху комбайна, м/хв; K_M – коефіцієнт машинного часу γ ; об'ємна вага вугілля, т/м³;

– зольність видобутого вугілля $q_7 = A_e^d$, %, яка обчислюється за формулою [9, с. 6]:

$$A_{ei}^d = \frac{A_{nl.i}^d \cdot M_{nl.i} \cdot d_{nl.i}^d + A_{нокр.i}^d \cdot M_{нокр.i} \cdot d_{нокр.i}^d + A_{сп.i}^d \cdot M_{сп.i} \cdot d_{сп.i}^d}{M_{nl.i} \cdot d_{nl.i}^d + M_{нокр.i} \cdot d_{нокр.i}^d + M_{сп.i} \cdot d_{сп.i}^d}, \text{ \%}, \quad (25)$$

де $A_{nl.i}^d$, $A_{нокр.i}^d$, $A_{сп.i}^d$ – зольність пласта, порід покрівлі, ґрунту i -ї лави, %; $M_{nl.i}$, $M_{нокр.i}$, $M_{сп.i}$ – потужність пласта, потужність засмічення від покрівлі, потужність засмічення від ґрунту i -ї лави, м; $d_{nl.i}^d$, $d_{нокр.i}^d$, $d_{сп.i}^d$ – дійсна густина вугільного пласта, порід покрівлі, порід ґрунту i -ї лави, т/м³;

– ефективність видобутку 1 т ресурсного вугілля $q_8 = E_B$, визначається за формулою:

$$E_B = \frac{C_B}{R_B}, \text{ грн/т}, \quad (26)$$

де C_B – ціна видобувної машини (комбайна, струга), грн; R_B – середній ресурс видобувної машини до капітального ремонту, т;

– енергоозброєність видобувної машини $q_9 = P_B$ визначається за формулою:

$$P_B = \frac{N_B}{M_B}, \text{ кВт/т}, \quad (27)$$

де N_B – потужність приводу видобувної машини, кВт; M_B – вага видобувної машини, т.

III. Конвеєр:

– можливість спільної роботи з кріпленням і комбайном q_{10} ;

Optimization of technological development of coal mining in Ukraine

– відповідність конвеєра з комбайном по продуктивності ($V_{\text{конв.}} > V_{\text{г}}$) q_{11} , т/год;

– ефективність транспортування по лаві 1 т ресурсного вугілля $q_{12} = E_T$, визначається за формулою:

$$E_T = \frac{C_K}{R_K}, \text{ грн/т}, \quad (28)$$

де C_K – ціна скребкового конвеєра, грн; R_K – середній ресурс конвеєра до капітального ремонту, т.

Критерії $q_1, q_2, q_4, q_5, q_{10}, q_{11}$ відносяться до групи одиничних якісних критеріїв, оцінка яких формується на основі антонімів абсолютного характеру типу «ТАК» і «НІ» ($q_1 \equiv q_{KA1}, q_2 \equiv q_{KA2}, q_4 \equiv q_{KA4}, q_5 \equiv q_{KA5}, q_{10} \equiv q_{KA10}, q_{11} \equiv q_{KA11}$). На основі цих критеріїв формуються варіанти комплектації очисних комплексів (кріплення – комбайн – конвеєр) для конкретних гірничо-геологічних умов виїмкової ділянки шахти.

До групи одиничних кількісних критеріїв (q_K) відносяться такі критерії якості, для яких по кожному варіанту порівняння можуть бути визначені їх абсолютні чисельні значення. В нашому випадку до цих критеріїв відносяться критерії $q_3 \equiv q_{K3}, q_6 \equiv q_{K6}, q_7 \equiv q_{K7}, q_8 \equiv q_{K8}, q_9 \equiv q_{K9}$ і $q_{12} \equiv q_{K12}$. За допомогою цих критеріїв проводиться порівняння і визначення найкращого варіанту комплектації очисного комплексу для проведення технічного переоснащення шахти.

Після формування пакету одиничних критеріїв і одержання їх конкретних оцінок виконується порівняння конкуруючих варіантів і у ряді випадків відразу вдається прийняти рішення про відсіювання неперспективних варіантів і обрання найбільш раціонального варіанту.

Якщо оцінки обраних одиничних критеріїв якості проявляють антагоністичність, то виконується ранжування по рівню значимості за допомогою інтегрального критерію якості.

Безрозмірний інтегральний критерій якості визначається по залежності:

$$K_n = \sum_{i=1}^m (\bar{q}_i^{(n)} \cdot a_i), \quad (29)$$

де n – номер порівнюваного варіанту; m – кількість одиничних критеріїв якості; \bar{q}_i – числове значення i -го одиничного критерію приведенного до співставного вигляду; a_i – безрозмірний коефіцієнт значимості i -го одиничного критерію якості, який відображує ступінь важливості цього критерію з позицій його впливу на техніко-економічний рівень техніки.

Приведення абсолютних числових значень кількісних критеріїв q_{Ki} до співставного вигляду здійснюється згідно з однією з залежностей:

$$\bar{q}_i = \frac{x_{Ki}}{x_{KBi}}, \quad (30)$$

$$\bar{q}_i = \frac{x_{KBi}}{x_{Ki}}, \quad (31)$$

де q_{KBi} – абсолютне числове значення i -го кількісного критерію для варіанту, обраного в якості базового.

Залежність (30) використовується, якщо бажаним є підвищення значень q_{Ki} (q_{K6} , q_{K9}), а (31) – пониження (q_{K3} , q_{K7} , q_{K8} , q_{K12}) значень критеріїв групи.

При визначенні інтегрального критерію якості K_n в якості базового обирається варіант оснащення очисного комплексу, який на даний час експлуатується на шахті і потребує модернізації.

В результаті порівняння числових значень інтегральних критеріїв якості приймається рішення про вибір найбільш перспективного варіанту, який має найбільше значення K_n .

4. Алгоритм моделювання

Застосування розробленої моделі для вирішення задачі технологічного переобладнання групи вуглевидобувних підприємств передбачає виконання наступних етапів моделювання:

1. Розробка вихідної множини потенційно можливих варіантів устаткування лав шахтопідприємства видобувними комплексами нового технічного рівня із врахуванням гірничо-геологічних умов окремої шахти, її проектної виробничої потужності. Розрахунки технологічних, експлуатаційних та економічних показників функціонування підприємства за варіантами. Створення бази даних таких показників.

2. Визначення обсягових меж видобутку вугілля за технологічно-прийнятних варіантів переобладнання шляхом попереднього розв'язання задач мінімального видобутку та максимальної концентрації виробництва.

3. Вирішення задачі вибору оптимального варіанту переобладнання за критерієм сукупного обсягу видобутку вугілля групою вуглевидобувних підприємств та за обмежень виробничої потужності, отриманих на етапі 2.

4. Уточнена оцінка конкурентоздатності за обраного варіанту переобладнання або вирішення питання щодо можливості її досягнення в межах допустимих змін виробничої потужності та первинно запропонованої вихідної множини варіантів устаткування лав.

5. Розподіл заходів переобладнання за часовими етапами в межах планованого довготермінового періоду модернізації групи підприємств.

Алгоритм формування варіантів технологічно-узгодженого застосування ефективних технологій у вугільній промисловості побудований на використанні функціональних особливостей програмно-інформаційного комплексу «Вугілля України» і його бази даних, створених в Інституті загальної енергетики НАН України.

5. Результати розрахунків

Для проведення розрахунків технологічних та економічних показників впровадження ефективних технологій видобутку вугілля в Україні визначено перелік державних шахт, які потребують модернізації з використанням ефективних технологій видобутку вугілля. До цього переліку ввійшли державні шахти, що на даний час знаходяться на підконтрольній українській владі території (21 шахта).

Зазначимо, що сумарний видобуток вугілля на цих шахтах в 2013 році становив 7,7 млн тонн при середньодобовому видобутку 944 тонн. Середня потужність пластів на цих шахтах становить 1,46 м.

В 38 лавах застосовується прогресивна технологія видобутку – довгими стовпами, в 20 – суцільна система розробки, в 6 – комбінована. Механізовані комплекси нового технічного рівня використовуються у 56% лав, комбайни НТР у 47% лав.

За результатами розрахунків визначено ефективні технології та оптимальну комплектацію очисних комплексів для переоснащення державних шахт за умови досягнення ними максимальних прогнозних обсягів видобутку в 2030 році. Всі варіанти передбачають використання найбільш прогресивної стовпової системи розробки пластів з довжиною лав на пологих пластах 200–350 м. На крутих пластах використовуються щитові агрегати.

За визначеними оптимальними варіантами впровадження ефективних технологій видобутку вугілля виконано аналіз показників технологічного рівня шахт України, які знаходяться в державній власності на контрольованій українською владою території.

**Показники технологічного рівня державних шахт
(на контрольованій українською владою території)**

Показник	2013 р. (базовий)	2020 р.	2025 р.	2030 р.
Кількість лав: всього	64	30	34	35
діючих	39,1	20,6	25,2	28,3
Обсяг видобутку, млн т	7,7	10,8	13,1	15,0
млн т у.п.	5,2	8,5	10,4	11,9
Середньодобова продуктивність шахти, т	944 (72–3726)	1406 (521–3836)	1704 (521–4164)	2055 (521–4685)
Рівень концентрації гірничих робіт, лав/1000 т	6,0 (0,4–16,3)	1,3 (0,3–2,6)	1,2 (0,2–2,6)	1,2 (0,2–2,6)
Рівень інтенсифікації гірничих робіт, м ² /год	9,8 (1,3–36,1)	38,4 (9,6–96,3)	37,1 (9,6–96,3)	39,2 (12,7–96,3)
Зольність видобутого вугілля, %	35 (12–52)	25 (5–49)	25 (5–49)	25 (5–49)
Питомі витрати електроенергії на видобування 1 т вугілля, кВт·год/т	13,9 (3,6–49,3)	5,2 (1,5–10,3)	5,1 (1,5–10,3)	5,3 (1,5–10,4)
Питомі витрати електроенергії на видобування 1 т вугілля в умовному паливі, кВт·год/т у.п.	20,5 (5,6–67,2)	6,6 (1,7–19,9)	6,5 (1,7–19,9)	6,7 (1,7–17,1)
Розрахункова собівартість 1 т готової вугільної продукції, грн	2166 (809–5369)	1454 (798–2082)	1236 (767–2082)	1231 (725–2082)
Розрахункова ціна 1 т готової вугільної продукції, грн, в т.ч.:	2383 (890–5906)	1600 (878–2290)	1360 (844–2290)	1354 (798–2290)
енергетичної	2409 (1047–5906)	1567 (986–2047)	1353 (871–2047)	1262 (798–2047)
коксівної	2278 (890–3196)	1739 (878–2290)	1726 (844–2290)	1720 (820–2290)
Вартість модернізації шахт, млн \$		35,34	20,92	5,11
млрд грн		0,85	0,5	0,12

Аналіз показників оцінки ефективних технологій видобутку вугілля показує що:

– загальна кількість лав скорочується на 45 %, кількість діючих лав – на 28 %. При цьому середньодобова продуктивність шахти зро-

Optimization of technological development of coal mining in Ukraine

стає у 2,2 раза до 2055 т, зольність видобутого вугілля зменшується до 25 % (на 10 %);

– підвищується обсяг видобутку вугілля у 2 раза, а в умовному паливі за рахунок зменшення зольності видобутого вугілля в 2,3 раза. Обсяг видобутку вугілля в 2030 р. досягне 15 млн т;

– при використанні ефективних технологій вуглевидобування рівні концентрації і інтенсифікації гірничих робіт покращуються у 5 та 4 раза відповідно;

– питомі витрати електроенергії на видобування скорочуються у 2,6 раза в натуральному вимірі, та в 3,1 раза в умовному паливі;

– розрахункова собівартість однієї тонни готової вугільної продукції зменшується в 1,8 раза;

– розрахункова ціна однієї тонни готової вугільної продукції при рентабельності 10% зменшується в 1,8 раза і досягає 1165 грн для енергетичного вугілля та 1720 грн для коксівного;

– вартість модернізації шахт становить 94 млн дол. США, або 2,3 млрд грн за курсом 24 грн за один дол. США в 2015 р.;

– після модернізації майже всі з розглянутих державних шахт до 2025 року виходять на рівень рентабельності більше 10%.

6. Висновки

1. Розроблено математичну модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування, яка, на відміну від загальногалузових балансових оптимізаційних моделей, що використовують економічні показники, орієнтована на підвищення виробничої ефективності виділених підсистем галузі за критерієм їх загальної продуктивності. Модель, побудована як задача змішано-цілочисельного програмування, дозволила визначити оптимальну за критерієм максимізації обсягу власного видобутку множину варіантів технічного переобладнання шахт, що забезпечують конкурентоздатність галузі на світовому ринку та підвищення рівня енергетичної безпеки країни.

2. Розроблено новий метод формування множини перспективних варіантів технологічного переоснащення шахт, який дозволяє за допомогою порівняння числових значень інтегральних критеріїв якості обґрунтовано прийняти рішення про вибір доцільних варіантів оснащення лав шахт високопродуктивною видобувною і транспортною технікою, яка максимально відповідає гірничо-геологічним умовам

конкретних лав при максимальній ефективності і надійності її експлуатації. На відміну від існуючих підходів до обґрунтування вибору типів видобувного обладнання, запропонований метод використовує в інтегральному критерії якості не тільки показники відповідності гірничо-геологічним умовам конкретних лав, а й прогнозу зольність видобутого вугілля, показники енергетичної та економічної ефективності його експлуатації.

3. Розрахунки оптимального варіанту переоснащення вугільної галузі довели можливість виведення перспективних державних шахт на рівень рентабельності за рахунок впровадження ефективних технологій вуглевидобування. Це дозволить підвищити обсяги видобутку вугілля у 2 рази, а в умовному паливі – в 2,3 рази за рахунок зменшення зольності видобутого вугілля і на цій основі досягти конкурентоспроможності галузі в цілому.

Список літератури:

1. Кияшко Ю.И. Оценка эффективности работы шахт при различных вариантах применения очистного оборудования. *Уголь Украины*. 2001. № 5. С. 24–26.
2. Кулик М.М. Роль вугілля у формуванні паливно-енергетичних балансів та оптимізація розвитку вугільної промисловості України. *Проблеми загальної енергетики*. 2002. № 6. С. 7–16.
3. Алавердян Л.М. Економіко-математична модель оптимального розвитку вугільної промисловості України. *Вісник МНТУ, серія «Економіка»*. 2010. № 1. С. 121–123.
4. Павленко І.І. Механізм розвитку вугільної галузі при обмежених інвестиціях. *Економіка промисловості*. 2007. № 1. С. 93–97.
5. Білан Т.Р., Каплін М.І. Моделювання постачання енергетичного вугілля за марками в економіку країни в умовах світового ринку та скорочення обсягів власного видобутку. *Проблеми загальної енергетики*. 2016. Вип. 2(45). С. 16–25.
6. Henderson J.M. A short-run model for the coal industry. *The Review of Economics and Statistics*. 1955. vol. 37, no. 4, pp. 336–346.
7. Suwala W. Models of Coal Industry in Poland. *Gospodarka surowcami mineralnymi*. 2010. Tom 26. pp. 41–52.
8. Пирский А.А. Эффективность подземной добычи угля. К.: Вища школа, 1982. 184 с.
9. СОУ 10.1.00185755.001-2004. Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Методика розрахунку показників якості. К.: Мінпаливенерго України. 2004. 39 с.

References:

1. Kiyashko Yu. I. (2001) Otsenka effektivnosti raboty shakht pri razlichnykh variantakh primeneniya ochistnogo oborudovaniya [Estimation of the efficiency of the mines in various applications of treatment equipment]. *Ugol' Ukrainy*, no. 5, pp. 24–26.
2. Kulyk M. M. (2002) Rol vuhillia u formuvanni palyvno-enerhetychnykh balansiv ta optymizatsiia rozvytku vuhilnoi promyslovosti Ukrainy [The role of coal in the formation of fuel and energy balances and optimization of the development of the coal industry in Ukraine]. *Problemy zahalnoi enerhetyky*, no. 6, pp. 7–16.
3. Alaverdian L. M. (2010) Ekonomiko-matematychna model optimalnoho rozvytku vuhilnoi promyslovosti Ukrainy [Economic-mathematical model of optimal development of the coal industry of Ukraine]. *Visnyk MNTU, seriia «Ekonomika»*, no. 1, pp. 121–123.
4. Pavlenko I. I. (2007.) Mekhanizm rozvytku vuhilnoi haluzi pry obmezhennykh investytsiiah [Mechanism of development of the coal industry with limited investments]. *Ekonomika promyslovosti*, no. 1, pp. 93–97.
5. Bilan T. R., Kaplin M. I. (2016) Modeliuvannia postachannia enerhetychnoho vuhillia za markamy v ekonomiku krainy v umovakh svitovoho rynku ta skorchennia obsiahiv vlasnoho vydobutku [Modeling the supply of energy coal by brands to the economy of the country in the world market and reducing the volume of own production]. *Problemy zahalnoi enerhetyky*, vol. 2(45), pp. 16–25.
6. Henderson J. M. (1955) A short-run model for the coal industry. *The Review of Economics and Statistics*, vol. 37, no. 4, pp. 336–346.
7. Suwala W. (2010) Models of Coal Industry in Poland. *Gospodarka surowcami mineralnymi*, Tom 26, pp. 41–52.
8. Pirskiy A. A. (1982) *Effektivnost' podzemnoy dobychi uglia* [Efficiency of underground coal mining]. Kiev: Vishcha shkola. (in Russian)
9. SOU 10.1.00185755.001-2004. (2004) *Vuhillia bure, kamiane ta antratsyt. Metodyka rozrakhunku pokaznykiv yakosti* [Coal is brown, rocky and an-thracite. Methodology for calculating quality indicators]. Kiev: Minpalyvenerho Ukrainy. (in Ukrainian)