

DOI: 10.30525/978-9934-588-61-7-8

Макаров В. М.

*кандидат технічних наук,
завідувач відділу оптимізації розвитку паливних баз
Інституту загальної енергетики
Національної академії наук України*

ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ВУГІЛЬНОЇ ГАЛУЗІ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ¹

Анотація

Сучасні екологічні обмеження та вимоги до якості видобутого вугілля ставлять нові завдання під час прогнозування розвитку вугільної галузі. Під час моделювання розвитку вуглевидобування необхідно враховувати ці вимоги. Удосконалено модель технологічного розвитку вуглевидобування. У моделі враховано обсяги виділення шахтного метану, необхідні виробничі потужності обладнання для його утилізації, обсяги капітальних витрат на таке обладнання, а також якість видобутого вугілля. Розроблено три сценарії розвитку вугільної галузі до 2050 р. Виконано розрахунки прогнозних обсягів викидів шахтного метану за розробленими сценаріями. Отримані за результатами розрахунків економічно обґрунтовані обсяги власного видобутку вугілля в умовах світового ринку можуть бути використані в процесі розроблення і подальшого вдосконалення стратегії розвитку вугільної галузі держави.

Вступ

В Україні вугілля – це єдиний енергоресурс, покладів якого достатньо на сотні років, що визначає його провідну роль у забезпеченні енергетичної безпеки держави. Проте сучасний технічний і

¹ Дослідження виконано в межах проєкту, який фінансується за рахунок коштів бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

технологічний стан вуглевидобування вкрай незадовільний і потребує докорінного оновлення.

Підвищення ефективності виробничої діяльності вугільних підприємств та вугільної промисловості у цілому необхідно здійснювати шляхом упровадження нового видобувного устаткування, нарощення потужностей ефективно працюючих шахт, спрямування фінансування на оновлення та розвиток галузі, формування цін на вугільну продукцію залежно від її теплотворності й т. ін. Зростання обсягів видобутку може бути досягнуте за різними напрямками розвитку та реформування шахтного фонду, але суттєвим обмеженням можуть стати екологічні вимоги.

Методичними питаннями оптимізації розвитку вугільної промисловості займалося багато українських та зарубіжних учених: Ю.І. Кіяшко (оцінка ефективності роботи шахт при різних варіантах використання очисного обладнання) [1, с. 24–26], М.М. Кулик, Л.М. Алавердян (оптимізація розвитку вугільної промисловості) [2, с. 4–15; 3, с. 121–123], І.І. Павленко (прогнозування розвитку вугільної галузі за обмежених інвестицій) [4, с. 93–97], М.І. Каплін, Т.Р. Білан (моделювання розвитку вугільної промисловості в умовах світового ринку) [5, с. 17–21], W. Suwala (модель реструктуризації вугільної галузі) [6, с. 41–49] та ін.

У 2017 р. автором розроблено модель технологічного розвитку вугільної галузі [7, с. 16–23; 8, с. 348–355], яка на відміну від загальногалузевих 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, дала змогу 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.

Сучасні екологічні обмеження та вимоги до якості видобутого вугілля зумовили необхідність удосконалення розробленої моделі з урахуванням цих обмежень.

Розділ 1. Математична модель розвитку вугільної галузі

Математична модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування передбачає попереднє формування множини всіх розглядуваних варіантів переобладнання шахт, для яких розраховуються вектори показників оцінки технологічного розвитку [8, с. 348–355]. Ці показники використовуються для визначення параметрів задачі вибору оптимального набору варіантів технологічного переобладнання шахт за критерієм загального обсягу видобутку галузі.

Під варіантом технологічного переобладнання шахт у 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 залежно 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 у цілому описується інтенсивностями виробничої діяльності лав із прогнозованими технологічними параметрами. Ці інтенсивності являють собою бінарні змінні, які показують доцільність використання окремої лави шахти після переобладнання. Вектор таких інтенсивностей будемо називати варіантом переоснащення досліджуваної множини шахт (галузь у цілому, шахти, що знаходяться у державній власності, тощо).

Очікуваним необхідним наслідком переоснащення має бути конкурентоздатність підприємств вугільної галузі на світовому ринку вугільного палива. Загалом конкурентоздатним має бути кожне окреме видобувне підприємство. Проте в наявних умовах збитковості вугільної промисловості України та обмежених інвестиційних коштів у даній моделі розглядається конкурентоздатність групи підприємств у 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 шахти j ; $S_j^{npoг}$ – прогнозна собівартість вугільної продукції шахти 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 якості якого є співставними з відповідними показниками вугілля, що видобувається шахтою j , грн/т; N_{III} – число шахт розглядуваної групи.

Собівартість вугільної продукції співставляється шахті у цілому і розраховується за апроксимаційною залежністю від сукупного обсягу видобутку шахти (рис. 1).

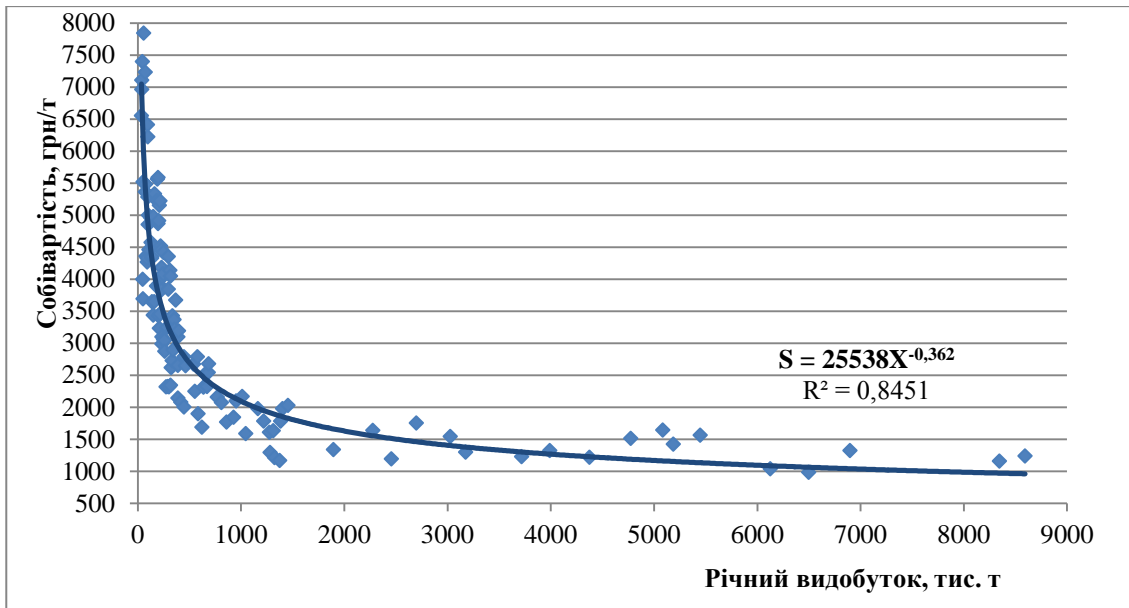


Рис. 1. Залежність собівартості готової вугільної продукції від обсягів видобутку вугілля

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

$$S(X) = 25538 \cdot X^{-0,362}, \quad (2)$$

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

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

$$\Delta_K = \sum_{j=1}^{N_{Ш}} \left((1 + R_j^{поз}) \cdot 25538 \cdot \left(\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j} \cdot \xi_{v_j} \right)^{-0,362} - \bar{C}_{p,j} \right) \cdot \left(\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j} \cdot \xi_{v_j} \right) \leq 0, \quad (3)$$

де x_{v_j} – прогнозна виробнича потужність лави під час здійснення 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 вибрано в оптимальному плані переоснащення галузі і $\xi_{v_j} = 0$ в протилежному разі); 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. Урахування цієї умови під час 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 пропонованій моделі умова конкурентоздатності враховується в наближеному лінеаризованому вигляді з використанням мінімального значення собівартості видобутку у множині допустимих варіантів переоснащення. Для визначення цієї множини в роботі передбачено апріорне вирішення двох оптимізаційних задач:

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

– концентрації виробництва, тобто визначення мінімальної кількості лав шахт, під час роботи яких після переоснащення досягається задане значення видобувної потужності.

За 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 такому 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

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

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

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \eta_{v_j} - X_j^{вст} \geq 0 \quad \left| \begin{array}{l} j=1, N_u \end{array} \right. \quad (5)$$

Отриманим розв'язкам цієї задачі $\eta_{v_j}^*$ відповідають прогнози 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

$$\bar{S}_j^{видоб} = 25538 \cdot (\bar{X}_j^{видоб})^{-0,362} \quad (7)$$

Задача концентрації виробництва записується у вигляді:

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

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \zeta_{v_j} - X_j^{вст} \geq 0 \quad \left| \begin{array}{l} j=1, N_u \end{array} \right. \quad (9)$$

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

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

а також собівартість видобутку

$$\bar{S}_j^{конц. вироб} = 25538 \cdot (\bar{X}_j^{конц. вироб})^{-0,362} \quad (11)$$

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

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

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

допустиме перевищення встановленої потужності шахти після переоснащення.

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

Розв'язки вказаних задач дозволяють визначити мінімальну

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

та максимальну

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

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

$$S_j^{* прог, мин} = 25538 \cdot (\bar{X}_j^{макс})^{-0,362} \quad (15)$$

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 з урахуванням показника експлуатаційної зольності гірничої маси, що видобувається в лаві v_j

$$\sum_{j=1}^{N_{ш}} \sum_{v_j=1}^{V_j} (1 - A_{e, v_j} / 100) \cdot x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} \rightarrow \max \quad (16)$$

за умов:

збільшення прогнозованої виробничої потужності шахти

$$\left. \sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} - X_j^{ном} \geq 0 \right|_{j=1, N_{ш}}, \quad (17)$$

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

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} - \overline{X}_j^{мин} \geq 0 \Big|_{j=1, N_u}, \quad (18)$$

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} - \overline{X}_j^{макс} \leq 0 \Big|_{j=1, N_u}, \quad (19)$$

утворення шахтного метану в обсязі y_{v_j} за прогнозного обсягу видобутку $x_{v_j}^{прог}$, що матиме місце у варіанті v_j технологічного переобладнання шахти j

$$\mu_{v_j} \cdot x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} - y_{v_j} = 0 \Big|_{\substack{j=1, N_u \\ v_j=1, V_j}}, \quad (20)$$

розподілу загального обсягу шахтного метану y_{v_j} на складники, що подають його каптовану та вільно виділену частини за варіанту v_j технологічного переобладнання шахти j

$$y_{v_j} - y_{v_j}^{ym} - y_{v_j}^e = 0 \Big|_{\substack{j=1, N_u \\ v_j=1, V_j}}, \quad (21)$$

зв'язку загального обсягу шахтного метану y_{v_j} , що виділяється під час функціонування шахти j за варіанту технологічного переобладнання v_j , і досяжного обсягу його каптації у вибраному типі дегазаційної установки

$$\Xi_{v_j}^{ym} \cdot y_{v_j} - y_{v_j}^{ym} = 0 \Big|_{\substack{j=1, N_u \\ v_j=1, V_j}}, \quad (22)$$

використання у варіанті технологічного переобладнання лави v_j , дегазаційної установки з граничною встановленою потужністю $G_{v_j}^{ym}$

$$y_{v_j}^{ym} - G_{v_j}^{ym} \cdot \zeta_{v_j}^{ym} + \delta_{v_j}^{ym} = 0 \Big|_{\substack{j=1, N_u \\ v_j=1, V_j}}, \quad (23)$$

утворення загального обсягу каптованого метану

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} y_{v_j}^{ym} - Y_j^{ym} = 0 \Big|_{j=1, N_{uu}}, \quad (24)$$

утворення загального обсягу вільно виділеного метану

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} y_{v_j}^e - Y_j^e = 0 \Big|_{j=1, N_{uu}}, \quad (25)$$

утворення загального обсягу каптованого метану у загальношахтовому дегазаційному обладнанні, зокрема колекторі й сепараторі

$$g_j^{видас} \cdot Y_j^{ym} - Y_j^{ym, видас} = 0 \Big|_{j=1, N_{uu}}, \quad (26)$$

використання у варіанті технологічного переобладнання шахти j загальношахтового дегазаційного обладнання, зокрема колектора й сепаратора з граничною пропускною здатністю \bar{G}_j^{ym}

$$Y_j^{ym} - \bar{G}_j^{ym} \cdot Z_j^{ym} + \Delta_j^{ym} = 0 \Big|_{j=1, N_{uu}}, \quad (27)$$

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

$$\Delta_K^{max} = \sum_{j=1}^{N_{III}} \left((1 + R_j^{npor}) \cdot S_j^{*npor, min} - \bar{C}_{p,j} \right) \cdot \sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{npor} \cdot \xi_{v_j} \leq 0, \quad (28)$$

обмеженого обсягу капіталовкладень у переобладнання шахти j

$$\left(\sum_{v_j=1}^{V_j} K_{v_j}^T \cdot \xi_{v_j} + K_{v_j}^{yy} \cdot \zeta_{v_j} \right) + K_j^{cy} \cdot Z_j^{ym} \leq K_{j,\Sigma}^T, \quad (29)$$

обмеженого обсягу капіталовкладень у переобладнання всіх шахт галузі

$$\sum_{j=1}^{N_{uu}} \left[\left(\sum_{v_j=1}^{V_j} K_{v_j}^T \cdot \xi_{v_j} + K_{v_j}^{yy} \cdot \zeta_{v_j} \right) + K_j^{cy} \cdot Z_j \right] \leq K_{\Sigma}^T. \quad (30)$$

неперевищення обсягом каптованого метану лави v_j шахти j встановленої потужності дегазаційної установки

$$\delta_{v_j}^{ym} \geq 0 \Big|_{\substack{j=1, N_{us} \\ v_j=1, v_j}}, \quad (31)$$

неперевищення обсягом каптованого метану шахти j встановленої потужності загальношахтового дегазаційного обладнання (колектора й сепаратора)

$$\Delta_j^{ym} = 0 \Big|_{j=1, N_{us}}. \quad (32)$$

У моделі (16)–(32): $x_{v_j}^{prog}$ – прогнозна виробнича потужність лави під час здійснення технічного переоснащення за варіантом v_j , т/рік; A_{e, v_j} – зольність вугілля лави v_j , %; X_j^{nom} – поточна виробнича потужність шахти j , т/рік; ξ_{v_j} – шукана бінарна змінна вибору варіанта v_j реконструкції або технічного переоснащення шахти j ; $\xi_{v_j} = 1$, якщо варіант v_j вибрано в оптимальному плані переоснащення і $\xi_{v_j} = 0$ у протилежному разі; μ_{v_j} – питомий обсяг виділення метану під час видобутку вугілля – метановість вугільного пласта лави v_j шахти j , м³/т; y_{v_j} – загальний обсяг виділення метану під час функціонування лави за варіантом переобладнання v_j у шахті j , м³/рік; $y_{v_j}^{ym}$ – обсяг каптованого метану під час функціонування лави з установленням дегазаційної установки й переобладнаної за варіантом v_j у шахті j , м³/рік; $y_{v_j}^g$ – обсяг залишкового вільного метану під час функціонування лави з установленням дегазаційної установки й переобладнаної за варіантом v_j у шахті j , м³/рік; $\Xi_{v_j}^{ym}$ – коефіцієнт каптації шахтного метану під час встановлення дегазаційної установки у лаві, переобладнаній за варіантом v_j у шахті j , безрозмірні одиниці; $G_{v_j}^{ym}$ – гранична пропускна здатність дегазаційної установки у лаві, переобладнаній за варіантом v_j у шахті j , м³/рік; $\zeta_{v_j}^{ym}$ – бінарна змінна стану використання дегазаційної

установки у лаві, переобладнаній за варіантом v_j у шахті j , $\zeta_{v_j}^{ym} = 1$, якщо установка діє і $\zeta_{v_j}^{ym} = 0$ в протилежному разі; $\delta_{v_j}^{ym}$ – обсяг перевищення граничної пропускної здатності дегазаційної установки у лаві, переобладнаній за варіантом v_j у шахті j , фактичного обсягу каптації шахтного метану цим устаткуванням, вирівнювальна змінна моделі, мЗ/рік; Y_j^{ym} – загальний обсяг каптованого метану під час функціонування шахти j з установленням дегазаційних установок, мЗ/рік; Y_j^e – обсяг залишкового вільного метану під час функціонування шахти j з установленням дегазаційних установок, мЗ/рік; $g_j^{видав}$ – технологічний коефіцієнт зовнішнього видавання шахтного метану загальношахтовим дегазаційним обладнанням (колектором, сепаратором) шахти j , безрозмірні одиниці; $Y_j^{ym, \text{видав}}$ – обсяг зовнішнього видавання шахтного метану загальношахтовим дегазаційним обладнанням шахти j , мЗ/рік; \bar{G}_j^{ym} – гранична пропускна здатність загальношахтового дегазаційного обладнання шахти j , мЗ/рік; Z_j^{ym} – бінарна змінна стану використання загальношахтового дегазаційного обладнання шахти j , $Z_j^{ym} = 1$, якщо згадане устаткування діє і $Z_j^{ym} = 0$ в протилежному разі; Δ_j^{ym} – обсяг перевищення граничною пропускною здатністю загальношахтового дегазаційного обладнання шахти j , фактичного обсягу каптації шахтного метану цим устаткуванням, вирівнювальна змінна моделі, мЗ/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; $K_{v_j}^{YU}$ – обсяг інвестицій у дегазаційне обладнання у варіанті v_j реконструкції лави v_j за технічного переоснащення шахти j , грн; K_j^{CY} – обсяг інвестицій у загальношахтове дегазаційне обладнання за реконструкції або технічного переоснащення шахти j , грн; $K_{j, \Sigma}^T$ – граничний обсяг інвестицій у реконструкцію або технічне переоснащення шахти j , грн; K_{Σ}^T – загальний обсяг інвестицій у реконструкцію або технічне переоснащення розглядуваної групи шахт за період інвестування T , грн.

Цільовою функцією моделі є сукупний прогнозний обсяг видобутку беззольної вугільної маси всіх шахт (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 (28). Обмеження (18) подає умову конкурентоздатності розглядуваної підмножини у цілому на світовому ринку вугілля. Вона виражається співвідношенням неперевищення сукупною вартістю вугільної продукції цих шахт вартості вугільного палива, яке може потенційно постачатися за імпортом. Критерій (16) містить коефіцієнт

зольності A_{e,v_j} вугілля лави v_j , що надає перевагу першочергового переобладнання лавам (варіантам) із вищими показниками якості вугільної продукції.

Рівняння (20)–(22) описують «виробництво» шахтного метану як супутнього продукту вугільного підприємства, розподіл його обсягу на утилізований та залишковий складники й визначення обсягу утилізації відповідно. Співвідношення (23) характеризує роботу дегазаційної установки лави із заданою граничною виробничою продуктивністю. У рівнянні балансу обсягів необхідних капіталовкладень у шахту (29) бінарній змінній використання установки відповідають витрати на її придбання та встановлення. Рівняння (27) подає умову достатності пропускнуої спроможності колектора й сепаратора метану для переробки його сумарного обсягу, виробленого дегазаційними установками лав. Вартість обладнання шахти цим устаткуванням також ураховується відповідним коефіцієнтом у рівнянні балансу обсягів капітальних витрат (29).

У такий спосіб запропонована модель технологічного розвитку вуглевидобування пов'язує обсяги видобутку вугілля з обсягами виділення шахтного метану, необхідними виробничими потужностями обладнання для його утилізації, а також обсягами капітальних витрат на таке обладнання. Урахування цих витрат під час прогнозування розвитку вугільної галузі може суттєво позначитися на порядку переобладнання шахт у межах програм модернізації, а також на виборі варіантів установаження видобувних комплексів.

Описана вище модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування поєднує можливості довгострокового та короткострокового прогнозування розвитку виділеної групи вуглевидобувних підприємств. Із метою визначення найбільш оптимальних короткострокових варіантів переобладнання спочатку знаходиться розв'язок задачі довгострокового прогнозування з використанням в обмеженнях (29) і (30) обсягів інвестицій довгострокової програми модернізації. Надалі отриманий розв'язок розглядається як допустима сфера оптимізаційних задач

послідовних короткострокових періодів із відповідними інвестиційними обмеженнями.

Під час формування множини перспективних варіантів технологічного переоснащення шахт використовується метод [9, с. 44–51], який дає змогу за допомогою порівняння 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 за максимальної ефективності й надійності її експлуатації.

Розділ 2. Прогноз видобутку вугілля

Ураховуючи потенціал видобутку вугілля державними шахтами, запропоновано такі сценарії розвитку державного сектору вугільної галузі на контрольованих українською владою територіях (табл. 1).

Перший сценарій (оптимістичний) ураховує роботу шахт, забезпечених запасами вугілля (21 державна шахта), відновлення і розвиток буровугільного комплексу (розріз «Костянтинівський»), а також будівництво семи нових шахт на підконтрольній українській владі території

За цим сценарієм максимального видобутку вугілля (з урахуванням видобутку приватних шахт) 61,2 млн т (у т. ч. 40,9 млн т енергетичного вугілля газової групи) буде досягнуто у 2035 р. (табл. 2). До 2050 р. видобуток поступово зменшуватиметься до 49,6 млн т (у т. ч. 38,8 млн т енергетичного вугілля газової групи).

За другим сценарієм (базовим) через брак коштів на відновлення і розвиток буровугільного комплексу та будівництво нових шахт (окрім шахти «Нововолинська № 10», кошти на введення в дію якої, скоріше за все, будуть виділені), розвиватимуться тільки шахти, забезпечені запасами вугілля, крім шахт «Центральна», «Горецька», «Бужанська», прогнозний видобуток яких не перевищує 300 тис т на рік (всього 19 шахт).

За цим сценарієм максимального видобутку вугілля (з урахуванням видобутку приватних шахт) 46,3 млн т (у т. ч. 36,7 млн т енергетичного вугілля газової групи) буде досягнуто у 2030 р. (табл. 3). До 2050 р. видобуток зменшиться до 34,2 млн т (у т. ч. 31,7 млн т енергетичного вугілля газової групи).

До третього (песимістичного) сценарію увійшли шахти (11 шахт), які наприкінці 2019 р. були визначені Міністерством енергетики та захисту довкілля як такі, що мають перспективу подальшого розвитку та беззбиткового рівня виробничо-господарської діяльності за результатами розгляду програм розвитку виробничо-господарської діяльності державних вугледобувних підприємств у 2019 р., проектів програм на 2020 р. та подальшого перспективного розвитку.

За цим сценарієм максимального видобутку вугілля (з урахуванням видобутку приватних шахт) 41,4 млн т (у т. ч. 31,5 млн т енергетичного вугілля газової групи) буде досягнуто у 2030 р. (табл. 4). До 2050 р. видобуток поступово зменшиться до 28,8 млн т (у т. ч. 26,3 млн т енергетичного вугілля газової групи).

Таблиця 1

Сценарії розвитку державного сектору вугільної галузі

Підприємство	Участь у сценарії
ш. ім. М.С. Сургая	1, 2, 3
ш/у Південнодонбаське № 1	1, 2, 3
ш. Капітальна	1, 2, 3
ш. Краснолиманська	1, 2, 3
ш. Курахівська	1, 2
ш. № 1/3 Новгородівська	1, 2, 3
ш. Котляревська	1, 2, 3
ш. Україна	1, 2
ш. Центральна	1
ш. Торецька	1
ш. Тошківська	1, 2
ш. Гірська	1, 2, 3
ш. Золоте	1, 2
ш. Карбоніт	1, 2
ш. Привольнянська	1, 2
ш. Новодружеська	1, 2
ш. ім. Д.Ф. Мельникова	1, 2, 3
ш. Лісова	1, 2, 3
ш. Червоноградська	1, 2, 3
ш. Степова	1, 2, 3
ш. Бужанська	1
Буровугільний комплекс	
р-з Костянтинівський	1
Шахти новобудови	
ш. № 10 Нововолинська	1, 2
ш. Червоноградська № 3	1
ш. Краснолиманська-Глибока	1
ш. Любельська	1
ш. Добропільська-Капітальна	1
ш. Західно-Донбаська № 6/42	1
ш. Тяглівська №1	1

Таблиця 2

Прогноз видобутку вугілля на контрольованих українською владою територіях за оптимістичним сценарієм, тис т

Марка вугілля	2019 р. факт	2025 р.	2030 р.	2035 р.	2040 р.	2045 р.	2050 р.
Енергетичне вугілля							
Б		1425	1900	2280	2280	1900	
Г	10639	16955	19425	26260	26260	26260	24360
ДГ	15259	18670	18935	14675	14675	14435	14435
Всього енергетичне	25897	35625	38360	40935	40935	40695	38795
Коксівне вугілля							
Ж	326	2805	4325	5845	5845	5845	5845
К	5001	7200	10050	12140	10640	4940	4940
Всього коксівне	5327	10005	14375	17985	16485	10785	10785
Разом	31224	47055	54635	61200	59700	53380	49580

Таблиця 3

Прогноз видобутку вугілля на контрольованих українською владою територіях за базовим сценарієм, тис т

Марка вугілля	2019 р. факт	2025 р.	2030 р.	2035 р.	2040 р.	2045 р.	2050 р.
Енергетичне вугілля							
Г	10639	16955	19425	21130	21130	21130	19230
ДГ	15189	18430	17270	12440	12440	12440	12440
Всього енергетичне	25827	35385	36695	33570	33570	33570	31670
Коксівне вугілля							
Ж	101	2330	2425	2520	2520	2520	2520
К	5001	7200	7200	7200	5700	0	0
Всього коксівне	5102	9530	9625	9720	8220	2520	2520
Разом	30929	44915	46320	43290	41790	36090	34190

Таблиця 4

Прогноз видобутку вугілля на контрольованих українською владою територіях за песимістичним сценарієм, тис т

Марка вугілля	2019 р. факт	2025 р.	2030 р.	2035 р.	2040 р.	2045 р.	2050 р.
Енергетичне вугілля							
Г	10585	16055	18285	19990	19990	19990	18090
ДГ	15055	14915	13195	8175	8175	8175	8175
Всього енергетичне	25639	30970	31480	28165	28165	28165	26265
Коксівне вугілля							
Ж	101	2330	2425	2520	2520	2520	2520
К	5001	7200	7200	7200	5700	0	0
Всього коксівне	5102	9530	9625	9720	8220	2520	2520
Разом	30741	40500	41105	37885	36385	30685	28785

Розділ 3. Прогноз обсягів викидів шахтного метану

Прогноз обсягів викидів метану з шахт України передбачений для двох варіантів – без та із застосуванням дегазаційного обладнання. Результати прогнозування викидів метану з шахт, розташованих на підконтрольних Україні територіях, на період до 2050 р. представлені в табл. 5, 6.

За базовим сценарієм розвитку вугільної галузі обсяги метану, що виділяється під час видобутку вугілля, сягають 925 млн м³ у 2025 р., знаходяться на рівні 940–990 млн м³ у період 2030–2040 рр. та поступово знижуються до 749 млн м³ у 2050 р.

Вилучення шахтного метану з подальшою утилізацією є позитивним моментом на шляху вирішення екологічних проблем, а саме зниження викидів парникових газів та глобального потепління. Упровадження дегазаційного обладнання під час модернізації шахт за базовим сценарієм дасть змогу досягти скорочення викидів метану до 417 млн м³ у 2025 р. і до 309 млн м³ у 2050 р.

Таблиця 5

Прогнозні викиди шахтного метану, млн м3

Підприємство	До модернізації / після модернізації					
	2025 р.	2030 р.	2035 р.	2040 р.	2045 р.	2050 р.
ш. ім. М.С. Сургая	54 / 22	68 / 27	72 / 29	72 / 29	72 / 29	72 / 29
ш/у Південнодонбаське	2	2	2	2	2	2
ш. Капітальна	36 / 14	43 / 17	48 / 19	48 / 19	48 / 19	48 / 19
ш. Краснолиманська	30 / 12	32 / 13	34 / 13	34 / 13	34 / 13	34 / 13
ш. Курахівська	1	1	1	1	1	1
ш. N 1/3 Новогородівська	11 / 5	11 / 5	11 / 5	11 / 5	11 / 5	11 / 5
ш. Котляревська	15 / 6	16 / 6	16 / 6	16 / 6	16 / 6	16 / 6
ш. Україна	3	3	3	3	3	3
ш. Добропільська	21 / 8	24 / 9	26 / 10	26 / 10	26 / 10	26 / 10
ш. Алмазна	33 / 13	40 / 16	49 / 20	49 / 20	49 / 20	49 / 20
ш. Піонер	15 / 7	17 / 7	21 / 8	21 / 8	21 / 8	21 / 8
ш. Новодонецька	19 / 10	22 / 9	26 / 10	26 / 10	26 / 10	26 / 10
ш. Центральна	6 / 3	6 / 2	6 / 2	6 / 2	6 / 2	6 / 2
ш. Торецька	6 / 2	6 / 2	6 / 2	6 / 2	6 / 2	6 / 2
ПАТ «ш/у «Покровське»	185 / 93	185 / 74	185 / 74	147 / 59		
ТДВ «ш. Білозірська»	50 / 20	60 / 24	67 / 27	67 / 27	67 / 27	67 / 27
ВАТ «Краснолиманське»	16 / 6	16 / 6	16 / 6	16 / 6	16 / 6	16 / 6
ш. Тошківська	3	4	4	4	4	4
ш. Гірська	22 / 9	29 / 12	29 / 12	29 / 12	29 / 12	29 / 12
ш. Золоте	26 / 10	31 / 12	31 / 12	31 / 12	31 / 12	31 / 12
ш. Карбоніт	14 / 5	18 / 7	18 / 7	18 / 7	18 / 7	18 / 7
ш. Привольнянська	2	3	3	3	3	3
ш. Новодружеська	24 / 10	31 / 12	31 / 12	31 / 12	31 / 12	31 / 12
ш. ім. Д.Ф. Мельникова	12 / 5	14 / 6	14 / 6	14 / 6	14 / 6	14 / 6
ш. Степова	45 / 18	45 / 18	45 / 18	45 / 18	45 / 18	
ш. Павлоградська	31 / 16	13 / 5				
ш. Ювілейна	14 / 6	15 / 6	15 / 6	15 / 6	15 / 6	15 / 6
ш. Тернівська	19 / 9	19 / 9				
ш. Самарська	22 / 11	22 / 9				
ш. Дніпровська	14 / 7	14 / 6	14 / 6	14 / 6	14 / 6	14 / 6
ш. ім. Героїв космосу	53 / 27	53 / 21	53 / 21	53 / 21	53 / 21	53 / 21
ш. Західно-Донбаська	50 / 20	46 / 18	46 / 18	46 / 18	46 / 18	46 / 18
ш. ім. М.І. Сташкова	10 / 8	8 / 7				
ш. Лісова	11 / 5	11 / 5	11 / 5	11 / 5	11 / 5	11 / 5
ш. Червоноградська	23 / 9	27 / 11	30 / 12	30 / 12	30 / 12	30 / 12
ш. Степова	38 / 15	49 / 20	57 / 23	57 / 23	57 / 23	57 / 23
ш. Бужанська	1	1	1	1		

**Прогнозні викиди шахтного метану
за сценаріями розвитку вугільної галузі, млн м³**

Сценарій	До модернізації / після модернізації					
	2025 р.	2030 р.	2035 р.	2040 р.	2045 р.	2050 р.
Оптимістичний	937 / 422	1003 / 414	991 / 405	953 / 389	806 / 331	761 / 313
Базовий	925 / 417	991 / 409	979 / 400	941 / 384	794 / 327	749 / 309
Песимістичний	852 / 382	900 / 366	887 /356	849 / 340	703 / 283	658 /265

Висновки

Удосконалено модель технологічного розвитку вуглевидобування, яка тепер ураховує обсяги виділення шахтного метану, необхідні виробничі потужності обладнання для його утилізації, обсяги капітальних витрат на таке обладнання, а також якість видобутого вугілля. Це дало змогу визначити необхідне фінансове забезпечення програм модернізації вугільної галузі з урахуванням підвищених вимог до екологічності її функціонування.

Програмна реалізація моделі дала змогу визначити ефективні технології та оптимальну комплектацію очисних комплексів для переоснащення державних шахт за умови досягнення ними максимальних обсягів виробництва та забезпечення екологічної безпеки.

Розроблено сценарії розвитку вугільної галузі, згідно з якими максимального видобутку вугілля 61 млн т буде досягнуто у 2035 р. за оптимістичним сценарієм. За базовим і песимістичним сценаріями максимального видобутку 46 млн т і 41 млн т відповідно буде досягнуто у 2030 р. До 2050 р. через вичерпаність запасів видобуток скоротиться до 50 млн т, 34 млн т і 29 млн т за оптимістичним, базовим та песимістичним сценаріями відповідно.

За рахунок впровадження ефективних технологій видобутку вугілля з використанням дегазаційного обладнання можливо досягти скорочення обсягів викидів шахтного метану на 59% до 2050 р.

Список використаних джерел:

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. Suwala W. Models of Coal Industry in Poland. Gospodarka surowcami mineralnymi. 2010. Tom 26. P. 41–52.
7. Макаров В.М. Математична модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування в Україні. Проблеми загальної енергетики. 2017. Вип. 1(48). С. 16–23.
8. Makarov V. Optimization of technological development of coal mining in Ukraine. Economic sistem development trends: the experience of countriencie of Eastern Europe and prospects of Ukraine: monograph / edited by autors. Riga. Latvia : Baltija Publishing, 2018. P. 345–363.
9. Макаров В.М. Методичні підходи до вибору видобувного обладнання при проведенні модернізації шахти. Проблеми загальної енергетики. 2015. Вип. 4(43). С. 44–51.