

УДК 622.232

В.М. МАКАРОВ,
Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РОЗВИТКУ ВУГЛЕВИДОБУВАННЯ В УКРАЇНІ

Розроблено математичну модель оптимізації технологічного розвитку вугільної галузі, яка орієнтована на підвищення виробничої ефективності виділених підсистем галузі за критерієм їх загальної продуктивності. Модель, побудована як задача змішано-цілочисельного програмування, дозволила визначити варіанти технічного переобладнання лав шахтопідприємств, що забезпечують конкурентоздатність галузі на світовому ринку вугілля. Розраховано прогнозні значення продуктивності шахт і відповідні собівартості вугільної продукції після модернізації, а також необхідні обсяги інвестицій.

Ключові слова: вугільна промисловість, математична модель, оптимізація, технічне переоснащення, модернізація, собівартість.

Розв'язання проблем підвищення ефективності функціонування вугільної промисловості України, забезпечення подальшого сталого розвитку галузі потребує докорінного технологічного оновлення виробництва, технічного переозброєння і модернізації вуглевидобувних підприємств.

В останні десятиліття у вугільній промисловості ведучих вуглевидобувних країн світу підсилюються процеси концентрації виробництва, росте продуктивність праці, підвищується якість, потужність і надійність устаткування, в усе більшому ступені вдається забезпечувати безперебійність виробничих процесів, поліпшувати умови праці і техніку безпеки. Продовжується технічне переозброєння вугільних підприємств, удосконалювання існуючої і впровадження нової високопродуктивної техніки та прогресивних технологій.

Прогнозування розвитку вугільної промисловості відноситься до найважливіших напрямків досліджень оптимізації функціонування галузей народного господарства. Прогнозуванням розвитку та розробкою методик і математичних моделей оптимізації розвитку вугільної галузі займалися такі провідні

вчені: Ю.І. Кіяшко (ІГТМ НАН України), А.І. Акмаєв (Донецький Державний технічний університет), Г.Г. Півняк (Дніпропетровський гірничий університет), В.І. Логвиненко (ДонВУГІ), Н.С. Сургай (УкрНДІпроект), В.В. Косарев (ДонДіпровуглемаш), М.М. Кулик, М.І. Каплін, Т.Р. Білан (ІЗЕ НАН України) та ін.

У роботі [1] обґрунтовано доцільність використання методів математичного програмування для вирішення задачі оптимізації розвитку вугільної галузі. Сформовано основні задачі оптимізації розвитку та відповідні їм математичні моделі для використання при різних прогнозних періодах. На основі цих моделей досліджено ефективність капіталовкладень у розвиток вугільної галузі. Вони можуть використовуватися як на короткий термін прогнозування, так і на довгострокову перспективу. Ці моделі формують задачу оптимізації розвитку вугільної промисловості, як мінімум, з використанням трьох критеріїв і відповідних їм моделей математичного програмування.

Перша модель — максимізація сумарної виробничої потужності галузі (що близько до обсягів видобутку вугілля) при заданих сумарних капітальних вкладеннях на часовому інтервалі $[0, T]$:

© В.М. МАКАРОВ, 2017

$$\sum_{i,j,t} \Delta X_{ijt} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де ΔX_{ijt} – приріст (алгебраїчний) потужності з видобування вугілля j -ї марки на i -й шахті в період часу $t \in [0, T]$.

Друга модель – мінімізація собівартості виробництва вугільної продукції та обсягів капіталовкладень при заданій загальній потребі за марками вугілля. Функціонал такої моделі має вигляд:

$$\sum_{i,j,t} c_{ijt} x_{ijt} + \sum_{i,j,t} \alpha_t K_{ijt} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де c_{ijt} – собівартість видобутку однієї тонни вугілля марки j на шахті i в період t ;

x_{ijt} – потужність з видобування вугілля марки j на шахті i в період t ;

K_{ijt} – обсяг капіталовкладень в період t ;

α_t – коефіцієнт, що враховує вартість (дисконтування) капіталу.

Третя модель є узагальненням попередніх. Її функціонал формується як згортка функціоналів (1) та (2) у вигляді:

$$\sum_{i,j,t} (1 - c_{ijt}^*) x_{ijt} - \sum_{i,j,t} \alpha_t K_{ijt}^* \rightarrow \max, \quad (3)$$

тобто модель одночасно забезпечує максимізацію виробничих потужностей (видобутку вугілля) і сумарного прибутку вугільних підприємств на інтервалі часу $[0, T]$.

У функціоналі (3) використані залежності

$$c_{ijt}^* = \frac{c_{ijt}}{[c_{ijt}]_{\max}}, \quad (4)$$

$$K_{ijt}^* = \frac{K_{ijt}}{[K_{ijt}]_{\max}}. \quad (5)$$

У зазначеній постановці ці оптимізаційні задачі зберігають актуальність і сьогодні, але мають бути доповнені умовами функціонування галузі у ринковому середовищі. Зокрема, ефективність капіталовкладень наразі має бути обмежена граничними значеннями, які гарантують можливість реконструйованому вугільному підприємству конкурувати на ринках вугільної продукції згідно з поточною та про-

гнозованою кон'юнктурою цін. Нижче таких граничних значень шахтопідприємство підлягає беззаперечному закриттю, а працівникам мають бути надані всі соціальні гарантії.

Ефективне й прибуткове функціонування підприємств вугільної галузі в умовах ринкової економіки можливе лише за умови достатньо низького рівня собівартості їх продукції. Цей рівень має забезпечити конкурентоспроможність шахтопідприємства на світових/внутрішніх ринках вугільної продукції з достатньою прибутковістю:

$$s_j + \pi_j \leq P_{\text{ринк}}, \quad (6)$$

де s_j – собівартість вугілля шахтопідприємства j ;

π_j – питомий прибуток шахти j на одиницю обсягу видобутку вугілля;

$P_{\text{ринк}}$ – ринкова ціна на вугілля.

У свою чергу, зниження собівартості досягається за рахунок здійснення заходів модернізації підприємств вугільної галузі. Основними критеріями такої модернізації для окремої шахти можна вважати:

- залишкові запаси вугілля на шахті;
- собівартість продукції після модернізації;
- залежність собівартості після модернізації від обсягу інвестицій в модернізацію.

Очевидно, що критерій залишкових запасів має бути врахований на домодельному етапі прогнозування розвитку шахтного фонду вугільної галузі і надалі будуть розглядатись лише шахтопідприємства із задовільним значенням цього показника. Інші критерії використовуються як параметри і результати розрахунків такої моделі розвитку вугільної промисловості країни в умовах конкуренції [2]:

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{ш}}} (s_j (K_j^T) + \pi_j) \cdot x_j + \sum_{k=1}^{N_{\text{им}}} C_k \cdot x_k \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{ш}}} g_j \cdot x_j + \sum_{k=1}^{N_{\text{им}}} g_k \cdot x_k = X_{\text{номп}}, \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{им}}} x_k \leq X_{\text{взн, max}}, \quad (9)$$

$$0 \leq x_j \leq X_{\text{max, j}} (K_j^T), \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{us}} x_j \leq \gamma \cdot \sum_{k=1}^{N_{imn}} x_k, \quad (11)$$

$$x_{l, imn} \leq \lambda \cdot \sum_{k=1}^{N_{imn}} x_k \Big|_{l=1, N_{imn}}, \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{us}} K_j^T = K_{I, \Sigma}^T, \quad (13)$$

$$K_j^T \geq K_{j \min}^T, \quad (14)$$

де g_j, g_k – технологічні коефіцієнти збагачення вугілля;

x_j, x_k – обсяги видобутку та імпортування;

N_{us} – кількість вуглевидобувних підприємств в країні;

N_{imn} – кількість джерел імпортування вугілля;

$X_{номр}$ – загальна величина попиту на вугілля;

$X_{max, i}$ – потенційно досяжні обсяги видобутку на i -му підприємстві енергетичного чи коксівного вугілля, відповідно;

$X_{пзн, max}$ – сумарна пропускна здатність портів та залізниці;

C_k – ціна імпортованої вугільної продукції з джерела імпортування k ;

λ – частка обсягу імпортування з одного джерела, допустима згідно з вимогами енергетичної безпеки;

γ – частка обсягу імпортування, допустима згідно з вимогами енергетичної безпеки;

K_j^T – обсяг інвестицій в шахтопідприємство j в періоді часу T ;

$K_{I, \Sigma}^T$ – загальний обсяг інвестицій в галузь в періоді часу T ;

$K_{j \min}^T$ – мінімально необхідний обсяг інвестицій в підприємство j в періоді часу T .

Наведена модель розвитку вугільної промисловості України в умовах міжнародної конкуренції спирається на достатньо деталізовану інформацію стосовно всіх вуглевидобувних підприємств, зокрема економічні показники їх діяльності. Очевидним для інформаційного наповнення моделі є врахування собівартостей видобутку для всіх без виключення шахт, у тому числі й приватизованих, а також тих,

що належать фінансово-промисловим групам. 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, та, відповідно, майже повною відсутністю інформації щодо економічних аспектів їх виробничої діяльності.

У цих умовах згадана модель, яка фактично є загальною моделлю балансу вугільної продукції в країні, виявляється інформаційно незабезпеченою, 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.

Виходячи з цих особливостей поточного стану вугільної галузі, при моделюванні її розвитку доцільно виконати перехід від моделей балансового типу, що використовують економічні критерії, до моделей оптимізації виробничої потужності, які дозволяють виділяти виробничі підсистеми галузі, зокрема ті, що надають необхідну техніко-економічну інформацію. Конкурентоспроможність підприємств на вугільних ринках у таких моделях може бути забезпечена шляхом співставлення цін на вугілля власного видобутку при прогнозованих заходах з розвитку та технічного переоснащення з цінами світових ринків відповідних видів вугільної продукції.

Тому метою статті є розроблення математичної моделі технологічного розвитку вуглевидобування для забезпечення конкурентоздатності вугільної галузі на світовому ринку.

Модель оптимізації обсягів поширення ефективних технологій видобутку вугілля на підприємствах, що належать до державної форми власності, може бути записана у вигляді такої моделі максимізації сукупного видобутку:

$$\sum_{j=1}^{N_u} \sum_{v_j=1}^{V_j} X_{v_j}^{npoz} \cdot \xi_{v_j} \rightarrow \max, \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^{N_u} \sum_{v_j=1}^{V_j} \left(X_j^{nom} + \left(X_{v_j}^{npoz} - X_{v_j}^{nom} \right) \cdot \xi_{v_j} \right) - X_{\Sigma}^{npoz} = 0, \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^{N_u} \left(\sum_{v_j=1}^{V_j} \left((s_j(X_j^{nom}) + \pi_j) \cdot X_j^{nom} + \left((s_{v_j}(X_{v_j}^{npoz}) + \pi_{v_j}) \cdot X_{v_j}^{npoz} - (s_j(X_j^{nom}) + \pi_j) \cdot X_{v_j}^{nom} \right) \cdot \xi_{v_j} - \bar{C}_{p,j} \cdot X_{v_j}^{npoz} \right) \right) \leq 0, \quad (17)$$

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} X_{v_j}^{npoz} \cdot \xi_{v_j} \leq X_j^{npoz}, \quad (18)$$

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} K_{v_j}^T \cdot \xi_{v_j} \leq K_j^T, \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^{N_u} \sum_{v_j=1}^{V_j} K_{v_j}^T \cdot \xi_{v_j} \leq K_{\Sigma}^T, \quad (20)$$

де X_j^{nom} – поточна виробнича потужність шахти j , тис. т;

$X_{v_j}^{npoz}$ – прогнозна виробнича потужність шахти j при здійсненні реконструкції або технічного переоснащення за варіантом v_j , тис. т;

X_{Σ}^{npoz} – загальна прогнозна виробнича потужність шахтопідприємств галузі у шуканому варіанті реконструкції або технічного переоснащення, тис. т;

ξ_{v_j} – шукана бінарна змінна вибору варіанта реконструкції або технічного переоснащення шахти j ; $\xi_{v_j} = 1$, якщо варіант v_j вибрано в опти-

мальному плані переоснащення галузі протягом періоду інвестування T і $\xi_{v_j} = 0$ в протилежному випадку;

$s_j(X_j^{nom})$ – поточне значення собівартості вугільної продукції шахти j з виробничою потужністю X_j^{nom} , грн /т;

$s_{v_j}(X_{v_j}^{npoz})$ – прогнозне значення собівартості вугільної продукції шахти j при здійсненні реконструкції або технічного переоснащення за варіантом v_j з кінцевою виробничою потужністю $X_{v_j}^{npoz}$, грн /т;

π_{v_j} – прогнозне (плановане) значення прибутку, з яким шахта j буде функціонувати при здійсненні реконструкції або технічного переоснащення за варіантом v_j , грн;

\bar{C}_p – прогнозне значення ціни на вугілля на світовому ринку на кінець періоду інвестування T , грн /т;

$K_{v_j}^T$ – обсяг інвестицій у варіанті v_j реконструкції або технічного переоснащення шахти j , грн;

K_j^T – граничний обсяг інвестицій у реконструкцію або технічне переоснащення шахти j , грн;

K_{Σ}^T – загальний обсяг інвестицій в реконструкцію або технічне переоснащення шахтопідприємств державної форми власності за період інвестування T , грн;

v_j – індекс варіанта реконструкції або технічного переоснащення шахти j ;

V_j – число варіантів реконструкції або технічного переоснащення шахти j ;

N_u – число шахт державної форми власності.

Модель реалізовано в табличному процесорі Microsoft Excel у вигляді набору даних по лавах шахт державної форми власності, в якому створено задачу цілочисельного лінійного програмування для оптимізаційної підсистеми Solver. Цільовою функцією є сукупний прогнозний видобуток всіх шахтопідприємств (15), а змінними оптимізації – бінарні змінні вибору варіанта модернізації лав. Сумарний видобуток лав обмежується прогнозованим значенням видобутку шахти (18), а необхідні для модернізації інвестиції – загальним планованим обсягом інвестицій у шахту (19) і галузь в цілому (20).

Обмеження (17) подає умову конкурентоздатності підмножини державних шахт в цілому на світовому ринку вугілля. Вона виражається співвідношенням не перевищення сукупною вартістю вугільної продукції цих шахт вартості вугільного палива, яке може потенційно постачатися за імпортом.

При визначенні вартості продукції вітчизняних шахтопідприємств використано апроксимаційну залежність собівартості готової вугільної продукції від обсягів видобутку вугілля (рис. 1), побудовану за фактичними даними собівартості готової вугільної продукції підприємств вугільної галузі України у 2011–2015 роках.

Розв'язком задачі оптимізації структури вуглевидобувних потужностей державного сектору вугільної промисловості, реалізований в цій моделі, є множина варіантів переоснащення лав шахтопідприємств обладнанням нового технічного рівня, що надає максимум сукупному обсягу власного видобутку вугілля за його собівартості, що забезпечує конкурентність галузі на світовому ринку вугільної продукції.

Оптимальні варіанти переоснащення лав обладнанням нового технічного рівня визначено за методикою [3] з використанням програмно-інформаційного комплексу «Вугілля України» [4].

Розрахунки впровадження ефективних технологій вуглевидобування проведено за двома варіантами – використання кращих вітчизняних та закордонних технологій.

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.

Варіанти оптимальної комплектації очисних комплексів представлено в табл. 1.

При впровадженні високопродуктивних вітчизняних технологій у видобуток вугілля в лавах з пологим заляганням пластів застосовуються варіанти комплектації очисних комплексів 1–7, при імпортних технологіях – варіанти 10–11. На крутих пластах найбільш ефек-

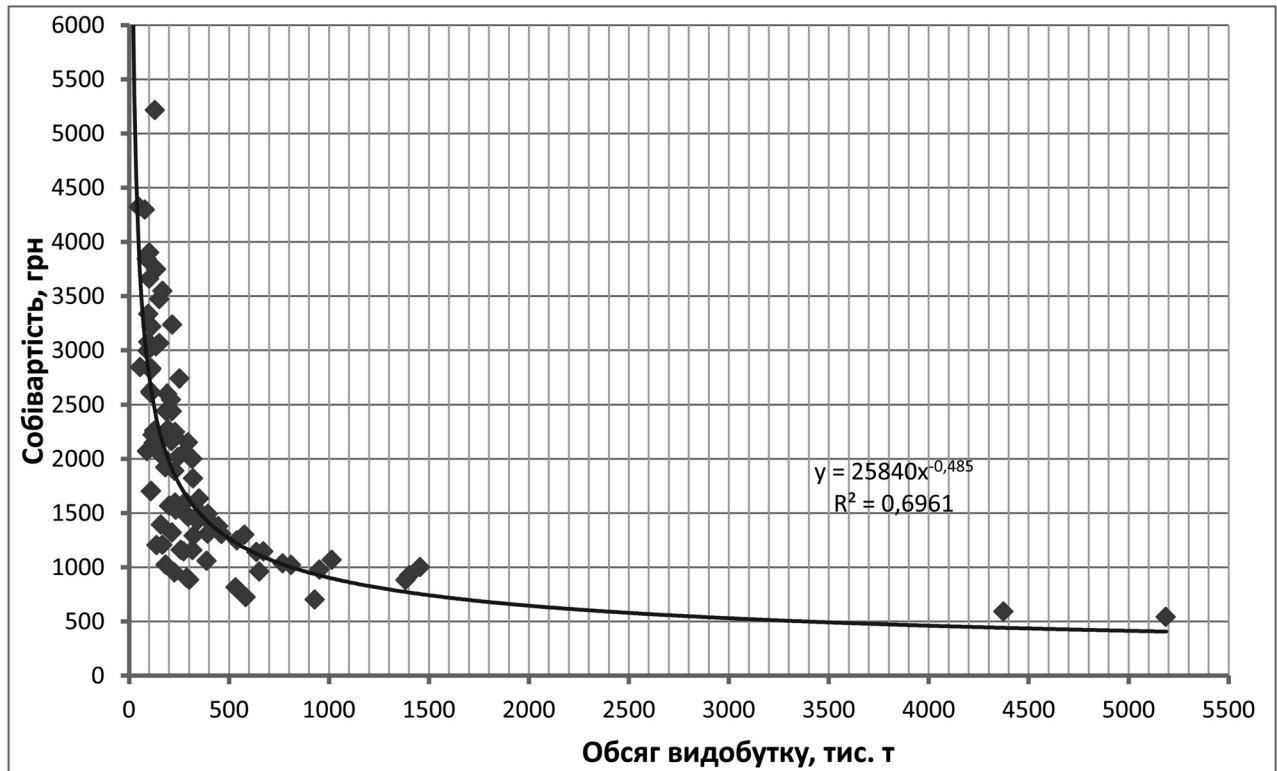


Рис. 1. Апроксимаційна залежність собівартості готової вугільної продукції від обсягів видобутку вугілля

Таблиця 1 – Варіанти комплектації очисних комплексів

Варіант	Потужність пласта, м	Довжина лави, м	Очисний комплекс		
			кріплення	комбайн	конвеєр
1	0,85–1,4	200	1КД-90	УКД-200-250	СП-250
2	0,85–1,3	200	ДМ	УКД-200-250	СП-250
3	0,85–1,5	220	ДМ	РКУ-10	СП-251
4	1,0–1,6	220	1КДД	РКУ-10	СП-251
5	1,1–1,5	220	2КД-90	РКУ-10	СП-251
6	1,35–2,0	350	3КД-90	КДК-500	КСД-27
7	1,35–2,4	350	2КДД	КДК-500	КСД-27
8	0,8–1,3	60	1АНЦ		
9	1,1–2,2	60	2АНЦ		
10	0,8–1,6	350	MVPO-2800	MB-280E	CЗК-228
11	1,3–2,6	350	MVPO-2800	MB-350E	CЗК-228

тивним виявляється застосування щитових агрегатів за варіантами 8 і 9.

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 довжиною 60 м.

За визначеними оптимальними варіантами впровадження ефективних технологій вуглеви-

добування виконано аналіз показників технологічного рівня шахт (21 шахта), які знаходяться в державній власності на контрольованій українською владою території і мають перспективи розвитку (табл. 2).

Аналіз критеріїв впровадження ефективних технологій у видобуток вугілля показує, що:

– загальна кількість лав скорочується на 44% по варіанту I (вітчизняні технології) та на

Таблиця 2 – Показники технологічного рівня державних шахт України за визначеними оптимальними варіантами впровадження ефективних технологій видобутку вугілля

Показник	Варіант		
	Базовий	I (вітчизняні технології)	II (імпортні технології)
Кількість лав: всього діючих	64	36	29
	39,1	29	21,5
Середньодобова продуктивність шахти, т	944 (72–3726)	1997 (521–4685)	1997 (521–4685)
Рівень концентрації гірничих робіт, лав/1000 т	6,0 (0,4–16,3)	1,1 (0,2–2,6)	0,9 (0,4–2,6)
Рівень інтенсифікації гірничих робіт, м ² /год	9,8 (1,3–36,1)	38,3 (11,4–96,1)	44,3 (11,4–58,4)
Зольність видобутого вугілля, %	35 (12–52)	25 (5–49)	25 (5–49)
Питомі витрати електроенергії на видобування, кВт·год/т	13,9 (3,6–49,3)	5,3 (1,5–10,3)	5,5 (2,8–8,5)
Розрахункова собівартість 1 т готової вугільної продукції, грн	2166 (809–5369)	1252 (725–2082)	н. д.
Вартість модернізації шахт, млн дол. США		270,95	865,4

Таблиця 3 – Розподіл фінансування і досяжні обсяги видобутку вугілля за варіантами впровадження ефективних технологій вуглевидобування

Рік	Варіант I (вітчизняні технології)		Варіант II (імпортні технології)	
	Фінансування, млн дол. США (млрд грн)	Обсяг видобутку, млн т	Фінансування, млн дол. США (млрд грн)	Обсяг видобутку, млн т
1	179,9 (4,3)	6,9	649,6 (15,6)	6,9
2	57,2 (1,4)	12,0	215,8 (5,2)	11,1
3	33,8 (0,8)	14,4		15,3
4		15,3		

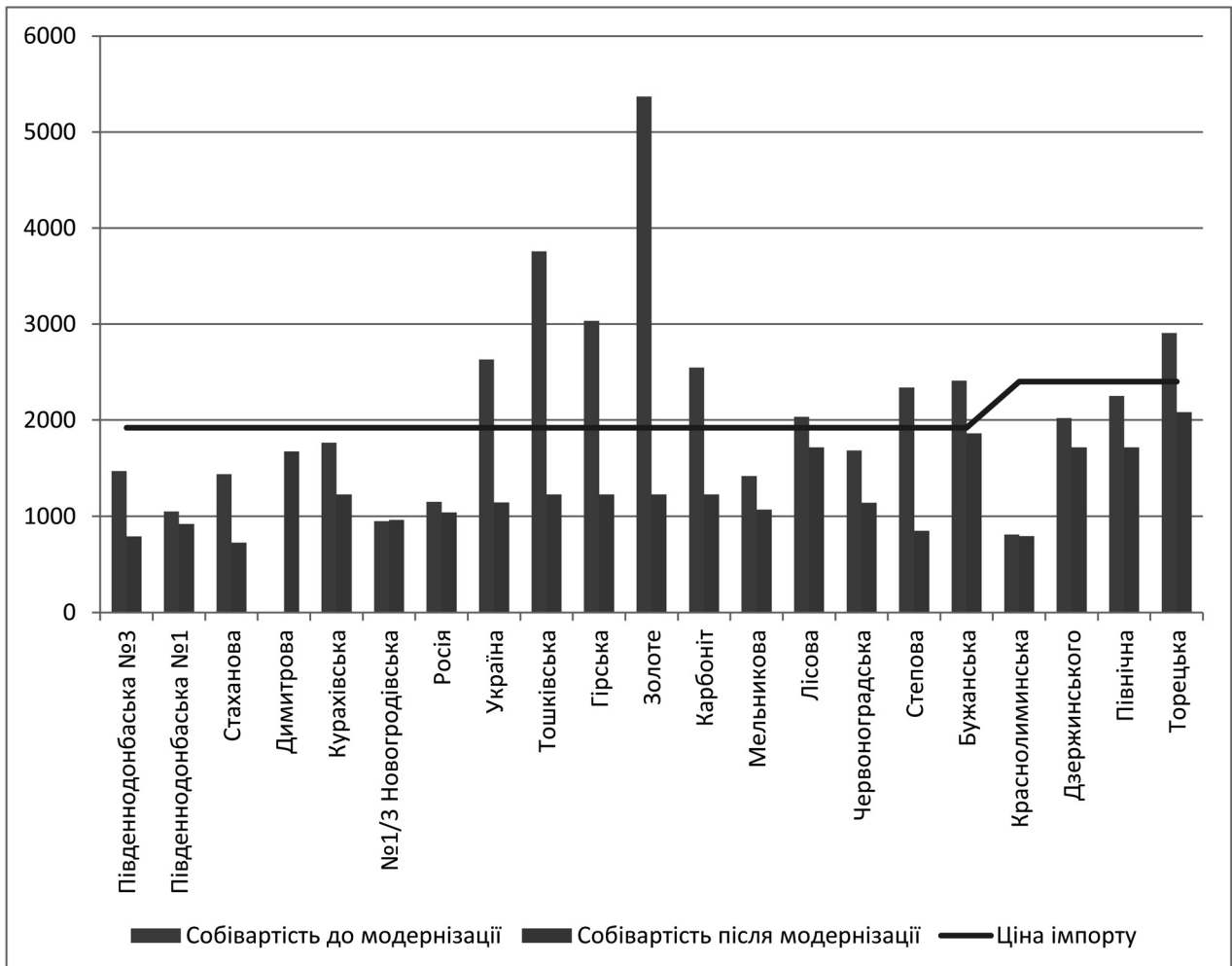


Рис. 2. Порівняння собівартості готової вугільної продукції з цінами на імпортне вугілля, грн

55% по варіанту II (імпортні технології). Кількість діючих лав скорочується на 26% і 45% відповідно. При цьому середньодобова продуктивність шахти зростає на 1053 т, зольність видобутого вугілля зменшується на 10%, питомі витрати електроенергії на видобування скорочуються у 2,5 раза;

– при використанні вітчизняних технологій нового технічного рівня рівні концентрації і інтенсифікації гірничих робіт підвищуються в 5,5 та 3,9 раза відповідно, для варіанта з використанням кращих закордонних технологій в 6,7 та 4,5 раза відповідно;

– вартість модернізації шахт з використанням вітчизняних технологій становить 271 млн дол. США, або 6,5 млрд грн за курсом 24 грн/дол. США в 2015 р. Вартість модернізації шахт з використанням закордонних технологій становить 865 млн дол. США, або 20,8 млрд грн.

При обмеженні для однієї шахти на введення в експлуатацію однієї нової лави на рік, на модернізацію знадобиться за варіантом I чотири роки, за варіантом II – три роки. Розподіл фінансування і досяжні обсяги видобутку вугілля представлені в табл. 3. При обмеженні на фінансування, наприклад, до 1 млрд грн на рік, термін модернізації шахт може розтягнутись на 7–8 років.

На рис. 2 наведено порівняння собівартості готової вугільної продукції до і після модернізації шахт з цінами на імпортне вугілля. Для порівняння розглядалися ціни на імпорт вугілля енергетичного призначення на рівні 80 дол. США/т (1920 грн/т в цінах 2015 р.), коксівного – 100 дол. США/т (2400 грн/т).

ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичну модель оптимізації технологічного розвитку вугільної галузі, яка, на відміну від моделей балансового типу, що використовують економічні критерії, орієнтована на підвищення виробничої ефективності виділених підсистем галузі за критерієм їх загальної продуктивності. Модель, побудована як задача змішано-цілочисельного програмування, дозволила визначити варіанти технічного переобладнання лав шахтопідприємств, що забезпечують конкурентоздатність галузі на світовому ринку вугілля.

2. За результатами цифрового моделювання впровадження ефективних технологій вуглевидобування визначено ефективні технології та оптимальну комплектацію видобувного обладнання для переоснащення шахт за умови досягнення максимальних прогнозних обсягів видобутку в 2030 році. Запропоновано 11 варіантів комплектації очисних комплексів вітчизняним та імпортним видобувним та транспортним обладнанням.

3. Розраховано прогнозні значення продуктивності шахт і відповідні собівартості вугільної продукції після модернізації, а також необхідні обсяги інвестицій. Після модернізації всі з розглянутих державних шахт виходять на рівень рентабельності.

1. Кулик М.М. Роль вугілля у формуванні паливно-енергетичних балансів та оптимізації розвитку вугільної промисловості України. *Проблеми загальної енергетики*. 2002. №6. С.7–16.

2. Звіт про НР «Наукові основи аналізу і прогнозування процесів адаптації та фільтрації ефективних технологій перетворення енергії в умовах конкуренції та утворення міждержавних енергоб'єднань», Том 3 «Ефективні технології у вугільній промисловості України в умовах міждержавної конкуренції», ДР 0111U010579 — ОК 0217U002173/Наук. кер. М.М. Кулик. К.: Ін-т загальної енергетики НАН України, 2016. 137 с.

3. Макаров В.М. Методичні підходи до вибору видобувного обладнання при проведенні модернізації шахти. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 4(43). С.44–51.

4. Макортецький М.М., Макаров В.М., Перов М.О., Новицький І.Ю. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68524. *Державна служба інтелектуальної власності України*. Науковий твір «Програмно-інформаційний комплекс «Вугілля України. Заявка від 08.09.2016 № 69059. Дата реєстрації 08.11.2016.

Надійшла до редколегії 15.02.2017