

# ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2019, 4(59): 36–44  
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2019.04.036>

УДК 622.232

**В.М. МАКАРОВ**, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-1068-5923

**М.І. КАПЛІН**, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0001-9328-4257

**М.О. ПЕРОВ**, ORCID: 0000-0002-0654-5648

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

## ВРАХУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ РОЗВИТКУ ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Розроблено модель технологічного розвитку вуглевидобування, в якій враховуються екологічні наслідки роботи шахт шляхом пов'язування обсягів видобутку вугілля з обсягами виділення шахтного метану, необхідними виробничими потужностями обладнання для його утилізації, а також обсягами капітальних витрат на таке обладнання. Визначено ефективні технології та оптимальна комплектація очисних комплексів для переоснащення шахт за умови досягнення ними максимальних обсягів виробництва та забезпечення екологічної безпеки. Розраховано прогнозні обсяги викидів метану з шахт, розташованих на контрольованій українською владою територіях, на період до 2040 р.*

*К л ю ч о в і с л о в а:* вугільна промисловість, моделювання, екологія, шахтний метан, дегазація, утилізація.

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 технологічний стан вуглевидобування вкрай незадовільний та потребує докорінного оновлення.

Методичними питаннями оптимізації розвитку вугільної промисловості займалось багато українських та зарубіжних вчених: Кіяшко Ю.І. (оцінка ефективності роботи шахт при різних варіантах використання очисного обладнання) [1], Кулик М.М., Алавердян Л.М. (оптимізація розвитку вугільної промисловості) [2, 3], Павленко І.І. (прогнозування розвитку вугільної галузі при обмежених інвестиціях) [4], Каплін М.І., Білан Т.Р. (моделювання розвитку вугільної промисловості в умовах світового ринку) [5], J. Henderson (модель попиту і пропозиції на ринках вугільної продукції) [6], W. Suwala (модель реструктуризації вугільної галузі) [7] 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 за гірничо-геологічних умов вугільних родовищ, відрізняється різною енергетичною та економічною ефективністю. Від правильного вибору техніки та технологій вуглевидобутку, своєчасної заміни морально і фізично застарілого устаткування залежить ефективність функціонування вуглевидобувних підприємств і галузі в цілому.

Вугільне виробництво серед інших промислових виробництв найбільш негативно і глибоко впливає на навколишнє середовище. Впливу піддаються всі його елементи: повітряний і водний басейни, земна поверхня, надра, флора, фауна.

Розвиток вугільної промисловості України знаходиться нині у прямій залежності від успішного вирішення питань дегазації вугільних пластів та боротьби з газодинамічними явищами.

У зв'язку з цим задача створення математичних моделей і програмних засобів оптимізації технологічного розвитку вугільної галузі з ура-

© В.М. МАКАРОВ, М.І. КАПЛІН, М.О. ПЕРОВ, 2019

хуванням сучасних екологічних обмежень є актуальною.

Метою дослідження є розробка математичних моделей та засобів оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування з урахуванням сучасних екологічних обмежень, що потребує узгодження обсягів виділення шахтного метану та видобутку вугілля, необхідними виробничими потужностями обладнання для його утилізації, а також обсягами капітальних витрат на таке обладнання.

Розроблена модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування [8] з урахуванням вловлювання і утилізації шахтного метану може бути записана у вигляді наступної задачі змішано-цілочисельного лінійного програмування. Необхідно визначити таку множину бінарних інтенсивностей  $\xi_{v_j}$  використання варіанту  $v_j$  технологічного переобладнання шахти  $j$ , що надають максимум прогнозованому внаслідок модернізації загальному обсягу видобутку вугілля

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

за умов

– збільшення прогнозованої виробничої потужності шахти

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} - X_j^{ном} \geq 0 \Big|_{j=1, N_u}, \quad (2)$$

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

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} - \bar{X}_j^{мін} \geq 0 \Big|_{j=1, N_u}, \quad (3)$$

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} - \bar{X}_j^{макс} \leq 0 \Big|_{j=1, N_u}, \quad (4)$$

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

$$\mu_{v_j} \cdot x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} - y_{v_j} = 0 \Big|_{j=1, N_u, v_j=1, V_j}, \quad (5)$$

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

$$y_{v_j} - y_{v_j}^{ym} - y_{v_j}^g = 0 \Big|_{j=1, N_u, v_j=1, V_j}, \quad (6)$$

– зв'язку загального обсягу шахтного метану  $y_{v_j}$ , що виділяється при функціонуванні шахти  $j$  за варіанту технологічного переобладнання  $v_j$ , і досяжного обсягу його каптації в обраному типі дегазаційної установок

$$\Xi_{v_j}^{ym} \cdot y_{v_j} - y_{v_j}^{ym} = 0 \Big|_{j=1, N_u, v_j=1, V_j}, \quad (7)$$

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

$$y_{v_j}^{ym} - G_{v_j}^{ym} \cdot \zeta_{v_j}^{ym} + \delta_{v_j}^{ym} = 0 \Big|_{j=1, N_u, v_j=1, V_j}, \quad (8)$$

– утворення загального обсягу каптованого метану

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} y_{v_j}^{ym} - Y_j^{ym} = 0 \Big|_{j=1, N_u}, \quad (9)$$

– утворення загального обсягу вільно виділеного метану

$$\sum_{v_j=1}^{V_j} y_{v_j}^g - Y_j^g = 0 \Big|_{j=1, N_u}, \quad (10)$$

– утворення загального обсягу каптованого метану у загально шахтовому дегазаційному обладнанні, зокрема колекторі й сепараторі

$$g_j^{видав} \cdot Y_j^{ym} - Y_j^{ym, видав} = 0 \Big|_{j=1, N_u}, \quad (11)$$

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

$$Y_j^{ym} - \bar{G}_j^{ym} \cdot Z_j^{ym} + \Delta_j^{ym} = 0 \Big|_{j=1, N_u}, \quad (12)$$

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

$$\Delta_K^{max} = \sum_{j=1}^{N_{III}} \left( (1 + R_j^{прог}) \cdot S_j^{* прог, мин} - \bar{C}_{p,j} \right) \cdot \sum_{v_j=1}^{V_j} x_{v_j}^{прог} \cdot \xi_{v_j} \leq 0, \quad (13)$$

– обмеженого обсягу капіталовкладень у переобладнання шахти  $j$

$$\left( \sum_{v_j=1}^{V_j} K_{v_j}^T \cdot \xi_{v_j} + K_{v_j}^{VY} \cdot \zeta_{v_j} \right) + K_j^{CY} \cdot Z_j^{ym} \leq K_{j,\Sigma}^T, \quad (14)$$

– обмеженого обсягу капіталовкладень у переобладнання всіх шахт галузі

$$\sum_{j=1}^{N_u} \left[ \left( \sum_{v_j=1}^{V_j} K_{v_j}^T \cdot \xi_{v_j} + K_{v_j}^{VY} \cdot \zeta_{v_j} \right) + K_j^{CY} \cdot Z_j \right] \leq K_{\Sigma}^T, \quad (15)$$

– не перевищення обсягом каптованого метану лави  $v_j$  шахти  $j$  встановленої потужності дегазаційної установки

$$\delta_{v_j}^{ym} \geq 0 \Big|_{\substack{j=1, N_u \\ v_j=1, V_j}}, \quad (16)$$

– не перевищення обсягом каптованого метану шахти  $j$  встановленої потужності загальношахтового дегазаційного обладнання (колектора й сепаратора)

$$\Delta_j^{ym} = 0 \Big|_{j=1, N_u}. \quad (17)$$

В моделі (1) – (17):

$x_{v_j}^{proz}$  – прогнозна виробнича потужність лави при здійсненні реконструкції або технічного переоснащення за варіантом  $v_j$ , т/рік;  $\bar{X}_j^{min}$ ,  $\bar{X}_j^{max}$  – мінімальний та максимальний прогнозні обсяги видобутку в множині допустимих варіантів переобладнання, що визначаються з додаткових оптимізаційних задач за методикою, викладеною в [9], відповідно;  $X_j^{nom}$  – поточна виробнича потужність шахти  $j$ , т/рік;  $\xi_{v_j}$  – шукана бінарна змінна вибору варіанта  $v_j$  реконструкції або технічного переоснащення шахти  $j$ ;  $\xi_{v_j} = 1$ , якщо варіант  $v_j$  обрано в оптимальному плані переоснащення і  $\xi_{v_j} = 0$  в протилежному випадку;  $\mu_{v_j}$  – питомий обсяг виділення метану при видобутку вугілля – метановість вугільного пласта лави  $v_j$  шахти  $j$ , м<sup>3</sup>/т;  $y_{v_j}$  – загальний обсяг виділення метану при функціонуванні лави за варіантом переобладнання  $v_j$  у шахті  $j$ , м<sup>3</sup>/рік;  $y_{v_j}^{ym}$  – обсяг каптованого метану при функціонуванні лави із встановленням дегазаційної установки й переобладнаної за варіантом  $v_j$  у шахті  $j$ , м<sup>3</sup>/рік;  $y_{v_j}^e$  – обсяг залишкового вільного метану при функціонуванні лави із встановленням дегазаційної установки й переобладнаної за варіантом  $v_j$  у шахті  $j$ , м<sup>3</sup>/рік;  $\Xi_{v_j}^{ym}$  – коефіцієнт каптації шахтного метану при встановленні дегазаційної

установки у лаві, переобладнаної за варіантом  $v_j$  у шахті  $j$ , безрозмірні одиниці;  $G_{v_j}^{ym}$  – гранична пропускна здатність дегазаційної установки у лаві, переобладнаної за варіантом  $v_j$  у шахті  $j$ , м<sup>3</sup>/рік;  $\zeta_{v_j}^{ym}$  – бінарна змінна стану використання дегазаційної установки у лаві, переобладнаної за варіантом  $v_j$  у шахті  $j$ ,  $\zeta_{v_j}^{ym} = 1$ , якщо установка діє і  $\zeta_{v_j}^{ym} = 0$  в протилежному випадку;  $\delta_{v_j}^{ym}$  – обсяг перевищення граничної пропускної здатності дегазаційної установки у лаві, переобладнаної за варіантом  $v_j$  у шахті  $j$ , фактичного обсягу каптації шахтного метану цим устаткуванням, вирівнювальна змінна моделі, м<sup>3</sup>/рік;  $Y_j^{ym}$  – загальний обсяг каптованого метану при функціонуванні шахти  $j$  із встановленням дегазаційних установок, м<sup>3</sup>/рік;  $Y_j^e$  – обсяг залишкового вільного метану при функціонуванні шахти  $j$  із встановленням дегазаційних установок, м<sup>3</sup>/рік;  $g_j^{voidae}$  – технологічний коефіцієнт зовнішнього видавання шахтного метану загальношахтовим дегазаційним обладнанням (колектором, сепаратором) шахти  $j$ , безрозмірні одиниці;  $Y_j^{ym, voidae}$  – обсяг зовнішнього видавання шахтного метану загальношахтовим дегазаційним обладнанням шахти  $j$ , м<sup>3</sup>/рік;  $\bar{G}_j^{ym}$  – гранична пропускна здатність загальношахтового дегазаційного обладнання шахти  $j$ , м<sup>3</sup>/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 випадку;  $\Delta_j^{ym}$  – обсяг перевищення граничної пропускною здатністю загальношахтового дегазаційного обладнання шахти  $j$ , фактичного обсягу каптації шахтного метану цим устаткуванням, вирівнювальна змінна моделі, м<sup>3</sup>/рік;  $\Delta_K^{max}$  – 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  $v_j$  реконструкції або технічного переоснащення шахти  $j$ , грн.;  $K_{v_j}^{VY}$  – обсяг інвестицій в дегазаційне обладнання у варіанті  $v_j$  реконструкції лави  $v_j$  за технічного переоснащення шахти  $j$ , грн.;  $K_j^{CY}$  – обсяг інвестицій в 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.  $K_{\Sigma}^T$  – загальний обсяг інвестицій в реконструкцію або технічне переоснащення розглядуваної групи шахт за період інвестування  $T$ , грн.;  $v_j$  – індекс варіанта реконструкції (технічного переоснащення) лави шахти  $j$ ;  $R_j^{proz}$  – прогнозна рентабельність шахти  $j$ ;  $S_j^{proz}$  – прогнозна собівартість вугільної продукції шахти  $j$ , із врахуванням операційних витрат на функціонування дегазаційних установок

і загально шахтового обладнання утилізації шахтного метану, грн./т;  $X_j^{prog}$  – 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 із відповідними показниками вугілля, що видобувається шахтою  $j$ , грн./т;  $N_{III}$  – число шахт досліджуваної групи видобувних підприємств;  $V_j$  – число варіантів реконструкції (технічного переоснащення) шахти  $j$ .

Цільовою функцією моделі є сукупний прогнозний видобуток всіх шахт (1), а змінними оптимізації – бінарні змінні інтенсивності використання варіантів модернізації окремих ділянок – лав шахти, а також бінарні змінні інтенсивності використання дегазаційного устаткування, призначеного для вловлювання та утилізації шахтного метану. Рівняння (5)–(7) описують «виробництво» шахтного метану, як супутнього продукту вугільного підприємства, розподіл його обсягу на утилізовану та залишкову складові, й визначення обсягу утилізації, відповідно. Співвідношення (8) характеризує роботу дегазаційної установки лави із заданою граничною виробничою продуктивністю. У рівнянні балансу обсягів необхідних капіталовкладень у шахту (14) бінарній змінній використання установки відповідають витрати на її придбання та встановлення. Рівняння (12) подає умову достатності пропускної спроможності колектора й сепаратора метану для переробки його сумарного обсягу, виробленого дегазаційними установками лав. Вартість обладнання шахти цим устаткуванням також враховується відповідним коефіцієнтом в рівнянні балансу обсягів капітальних витрат (14).

В 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. Врахування цих витрат при прогнозуванні розвитку вугільної галузі може суттєво позначитись на порядку переобладнання шахт в межах програм модернізації, а також на виборі варіантів встановлення видобувних комплексів.

Розв'язком задачі оптимізації технологічного розвитку вугільної промисловості з урахуванням застосування засобів утилізації шахтного метану, реалізований в цій моделі, є множина варіантів переоснащення лав шахт обладнанням нового технічного рівня, що надає максимум сукупному обсягу власного видобутку вугілля за його собівартості, що забезпечує конкурентоздатність галузі на світовому ринку вугільної продукції.

Варіанти оптимальної комплектації очисних комплексів, визначені за методикою [10] 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 (1<sup>Г</sup>–7<sup>Г</sup>), які передбачають використання найбільш прогресивної стовпової системи розробки пластів з довжиною лав 200–350 м. На крутих пластах найбільш ефективним виявляється застосування щитових агрегатів за варіантами 8 і 9 (8<sup>Г</sup>, 9<sup>Г</sup>).

Індекс «Г» у номері варіанту комплектації очисного комплексу означає, що до складу комплексу включене дегазаційне обладнання (згідно СОУ 10.1.00174088.001-2004, необхідно проводити дегазацію, якщо газоносність вугільних пластів перевищує 13 м<sup>3</sup>/т). Дані метановості шахт на контрольованій українською владою території наведено в табл. 2.

Прогнозом обсягів видобутку вугілля на період до 2040 р. [11] на етапі розвитку галузі в період до 2025 р. передбачена активна модернізація шахтного фонду і виведення галузі на рівень рентабельності. Зокрема, відбудеться модерніза-

Таблиця 1. Варіанти оптимальної комплектації очисних комплексів

Варіант	Потужність пласта, м	Довжина лави, м	Очисний комплекс		
			кріплення	комбайн	конвеєр
1, 1 <sup>Г</sup>	0,85–1,4	200	1КД-90	УКД-200-250	СП-250
2, 2 <sup>Г</sup>	0,85–1,3	200	ДМ	УКД-200-250	СП-250
3, 3 <sup>Г</sup>	0,85–1,5	220	ДМ	РКУ-10	СП-251
4, 4 <sup>Г</sup>	1,0–1,6	220	1КДД	РКУ-10	СП-251
5, 5 <sup>Г</sup>	1,1–1,5	220	2КД-90	РКУ-10	СП-251
6, 6 <sup>Г</sup>	1,35–2,0	350	3КД-90	КДК-500	КСД-27
7, 7 <sup>Г</sup>	1,35–2,4	350	2КДД	КДК-500	КСД-27
8, 8 <sup>Г</sup>	0,8–1,3	60	1АНЩ		
9, 9 <sup>Г</sup>	1,1–2,2	60	2АНЩ		

Таблиця 2. Метановість шахт на контрольованій українською владою території

Підприємства	Метановість, м <sup>3</sup> /т	Підприємства	Метановість, м <sup>3</sup> /т	Підприємства	Метановість, м <sup>3</sup> /т
ш. ім. М.С. Сургая	47,5	ш. Центральна	21,9	ш. Павлоградська	13,2
ш/у Південнодонбаське № 1	2,0	ш. Північна	43,2	ш. Ювілейна	10,7
ш. Центральна	25,1	ш. Торецька	30,0	ш. Благодатна	14,0
ш. Капітальна	20,0	ПАТ «ш/у Покровське»	25,7	ш. Тернівська	15,0
ш. Краснолиманська	19,6	ТДВ «ш. Білозірська»	35,0	ш. Самарська	13,7
ш. Курахівська	2,0	ВАТ «Краснолиманське»	19,6	ш. Дніпровська	9,8
ш. № 1/3 Новогродівська	12,0	ш. Тошківська	6,1	ш. ім. Героїв космосу	18,7
ш. Котляревська	20,0	ш. Гірська	50,8	ш. Західно-Донбаська	22,1
ш. Україна	5,0	ш. Золоте	54,3	ш. ім. М.І. Сташкова	6,7
ш. Добропільська	12,4	ш. Карбоніт	31,9	ш. Лісова	40,0
ш. Алмазна	34,8	ш. Привольнянська	4,8	ш. Червоноградська	40,0
ш. Піонер	18,0	ш. Новодружеська	35,9	ш. Степова	40,0
ш. Новодонецька	13,5	ш. ім. Д.Ф. Мельникова	18,6	ш. Бужанська	2,0
ш. Білицька	13,0	ш. Степова	23,7		

ція застарілого шахтного обладнання, будуть інвестовані кошти в нові технології, підвищиться продуктивність праці.

Найбільший приріст видобувних потужностей можливий на шахтах, які наразі перебувають у державній власності. Тому, для проведення розрахунків технологічних та економічних показників впровадження ефективних технологій видобутку вугілля в Україні, з використанням методик [12], 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 контрольованій українською владою території.

До цього часу темпи технічного переоснащення лав Українських шахт були вкрай низькі та складали 3–5% (10–12 комплексів) на рік, незважаючи на очевидні позитивні результати впровадження очисних комплексів нового покоління. Сучасні темпи технічного переозброєння повинні перевищити темпи за останній час у 2–2,5 рази, коли в середньому за рік повинно вводиться 20–25 лав з новими очисними комплексами на базі сучасних щитових кріплень, очисних комбайнів і забійних скребкових конвеєрів [13].

Враховуючи, що на контрольованій українською владою території залишилось 40% шахтного фонду, який потребує, крім модернізації, планової заміни видобувного обладнання, при розрахунках прийнято введення не більше 11 нових видобувних комплексів на рік. Крім того прийнято, що на одній шахті можлива модернізація не більше однієї лави на рік.

В усіх лавах, метановість яких перевищує нормативи, обов'язково передбачається встановлення дегазаційного обладнання.

За результатами розрахунків визначено ефективні технології та оптимальну комплектацію очисних комплексів для переоснащення державних шахт за умови досягнення ними максимальних обсягів видобутку і забезпечення екологічної безпеки.

Модернізацію державного шахтного фонду можливо провести до 2025 р. Для цього необхідно залучити 2,6 млрд грн. інвестиційних коштів на придбання видобувного обладнання, у т. ч. 240 млн грн. на дегазаційне обладнання.

Прогнозовані обсяги видобутку вугілля на контрольованій українською владою території на період до 2040 р. представлено в табл. 3.

Проведення технологічного переоснащення вугільної галузі дозволить підвищити обсяги видобутку вугілля з 42 млн т у 2020 р. до 47 млн т у 2025 р. Далі, через вичерпаність запасів, буде відбуватись поступове скорочення шахтного фонду, що призведе до зменшення обсягів видобутку до 45,6; 42,6; 32,4 млн т у 2030, 2035 і 2040 рр. відповідно.

Прогноз виділення метану з шахт України виконано для двох варіантів – без і з використанням дегазаційного обладнання. Результати прогнозування обсягів викидів метану з шахт, розташованих на контрольованій українською владою територіях, на період до 2040 р. представлено в табл. 4, 5.

Обсяги метану, що виділяються при видобутку вугілля, сягають 790 млн м<sup>3</sup> у 2020 р., знаходяться на рівні 950–1000 млн м<sup>3</sup> у період 2025–2035 рр., і знижуються до 675 млн м<sup>3</sup> у 2040 р.

**Таблиця 3.** Прогнозні обсяги видобутку вугілля на контрольованій українською владою території на період до 2040 р., тис. т

Підприємства	2020 р.	2025 р.	2030 р.	2035 р.	2040 р.
ш. ім. М.С. Сургая	800	1140	1425	1520	1520
ш/у Південнодонбаське № 1	950	950	1045	1050	1050
ш. Центральна	1100	1425	1710	1900	1900
ш. Капітальна	300				
ш. Краснолиманська	1400	1520	1615	1710	
ш. Курахівська	350	475	570	660	660
ш. № 1/3 Новогродівська	950	950	950	950	950
ш. Котляревська	760	760	805	805	805
ш. Україна	300	620	660	660	660
ш. Добропільська	1350	1710	1900	2090	2090
ш. Алмазна	500	950	1140	1420	1420
ш. Піонер	550	810	950	1140	1140
ш. Новодонецька	1150	1425	1615	1900	1900
ш. Білицька	400	760	1140	1420	1420
ш. Центральна	285	285	285	285	285
ш. Північна	280	285	285	285	285
ш. Торецька	190	190	190	190	190
ПАТ «ш/у Покровське»	7200	7200	7200	5700	
ТДВ «ш. Білозірська»	1140	1425	1710	1900	1900
ВАТ «Краснолиманське»	800	810	810	810	
ш. Тошківська	280	425	570	570	570
ш. Гірська	350	425	570	570	570
ш. Золоте	280	475	570	570	570
ш. Карбоніт	280	425	570	570	
ш. Привольнянська	280	475	570	665	665
ш. Новодружеська	350	665	850	855	855
ш. ім. Д.Ф. Мельникова	500	665	760	760	760
ш. Степова	1900	1900	950		
ш. Павлоградська	2375	2375	950		
ш. Ювілейна	1235	1330	1425	1425	1425
ш. Благодатна	1400	1425	1425	1425	1425
ш. Тернівська	1235	1235			
ш. Самарська	1615	1615	1615		
ш. Дніпровська	1425	1425	1425	1425	1425
ш. ім. Героїв космосу	2700	2850	2850	2850	2850
ш. Західно-Донбаська	2280	2280	2090	2090	2090
ш. ім. М.І. Сташкова	1520	1235			
ш. Лісова	285	285	285		
ш. Червоноградська	400	570	665	760	760
ш. Степова	500	950	1235	1425	
ш. Бужанська	240	240	240	240	240
<b>ВСЬОГО:</b>	<b>42185</b>	<b>46960</b>	<b>45620</b>	<b>42595</b>	<b>32380</b>

**Таблиця 4.** Прогнозні обсяги викидів метану з шахт, розташованих на контрольованій українською владою території, на період до 2040 р., млн м<sup>3</sup>

Підприємства	2020 р.	2025 р.	2030 р.	2035 р.	2040 р.
ш. ім. М.С. Сургая	38,0	54,2	67,7	72,2	72,2
ш/у Південнодонбаське № 1	1,7	1,9	2,1	2,1	2,1
ш. Центральна	27,6	35,8	42,9	47,7	47,7
ш. Капітальна	3,0				
ш. Краснолиманська	27,4	29,8	31,7	33,5	
ш. Курахівська	0,6	0,9	1,1	1,3	1,3
ш. № 1/3 Новоградівська	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
ш. Котляревська	13,6	15,2	16,1	16,1	16,1
ш. Україна	0,6	3,1	3,3	3,3	3,3
ш. Добропільська	16,7	21,2	23,6	25,9	25,9
ш. Алмазна	17,4	33,1	39,7	49,4	49,4
ш. Піонер	9,9	14,6	17,1	20,5	20,5
ш. Новодонецька	15,5	19,2	21,8	25,7	25,7
ш. Білицька	5,2	9,2	14,8	18,5	18,5
ш. Центральна	4,4	6,2	6,2	6,2	6,2
ш. Північна	5,4	12,3	12,3	12,3	12,3
ш. Торецька	3,0	5,7	5,7	5,7	5,7
ПАТ «ш/у «Покровське»	185,0	185,0	185,0	146,5	
ТДВ «ш. Білозірська»	39,9	49,9	59,9	66,5	66,5
ВАТ «Краснолиманське»	15,7	15,9	15,9	15,9	
ш. Тошківська	1,7	2,6	3,5	3,5	3,5
ш. Гірська	5,1	21,6	29,0	29,0	29,0
ш. Золоте	5,4	25,8	31,0	31,0	31,0
ш. Карбоніт	8,9	13,6	18,2	18,2	
ш. Привольнянська	1,3	2,3	2,7	3,2	3,2
ш. Новодружеська	12,6	23,9	30,5	30,7	30,7
ш. ім. Д.Ф. Мельникова	9,3	12,4	14,1	14,1	14,1
ш. Степова	45,0	45,0	22,5		
ш. Павлоградська	31,4	31,4	12,5		
ш. Ювілейна	13,2	14,2	15,2	15,2	15,2
ш. Благодатна	19,6	20,0	20,0	20,0	20,0
ш. Тернівська	18,5	18,5			
ш. Самарська	22,1	22,1	22,1		
ш. Дніпровська	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
ш. ім. Героїв космосу	50,5	53,3	53,3	53,3	53,3
ш. Західно-Донбаська	50,4	50,4	46,2	46,2	46,2
ш. ім. М.І. Сташкова	10,2	8,3			
ш. Лісова	8,0	11,4	11,4		
ш. Червоноградська	12,0	22,8	26,6	30,4	30,4
ш. Степова	8,0	38,0	49,4	57,0	
ш. Бужанська	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>ВСЬОГО:</b>	<b>789,5</b>	<b>976,7</b>	<b>1001,0</b>	<b>947,0</b>	<b>675,9</b>

**Таблиця 5.** Прогнозні обсяги викидів метану з шахт, розташованих на контрольованій українською владою території, на період до 2040 р. після впровадження дегазації, млн м<sup>3</sup>

Підприємства	2020 р.	2025 р.	2030 р.	2035 р.	2040 р.
ш. ім. М.С. Сургая	15,2	21,7	27,1	28,9	28,9
ш/у Південнодонбаське № 1	1,7	1,9	2,1	2,1	2,1
ш. Центральна	11,0	14,3	17,2	19,1	19,1
ш. Капітальна	3,0				
ш. Краснолиманська	11,0	11,9	12,7	13,4	
ш. Курахівська	0,6	0,9	1,1	1,3	1,3
ш. № 1/3 Новгородівська	11,4	4,6	4,6	4,6	4,6
ш. Котляревська	9,1	6,0	6,4	6,4	6,4
ш. Україна	0,6	3,1	3,3	3,3	3,3
ш. Добропільська	8,0	8,5	9,4	10,4	10,4
ш. Алмазна	12,2	13,2	15,9	19,8	19,8
ш. Піонер	5,9	7,3	6,8	8,2	8,2
ш. Новодонецька	9,3	9,6	8,7	10,3	10,3
ш. Білицька	3,1	4,6	5,9	7,4	7,4
ш. Центральна	4,4	2,5	2,5	2,5	2,5
ш. Північна	5,4	4,9	4,9	4,9	4,9
ш. Торецька	3,0	2,3	2,3	2,3	2,3
ПАТ «ш/у «Покровське»	111,0	92,5	74,0	58,6	
ТДВ «ш. Білозірська»	31,9	20,0	24,0	26,6	26,6
ВАТ «Краснолиманське»	11,0	6,4	6,4	6,4	
ш. Тошківська	1,7	2,6	3,5	3,5	3,5
ш. Гірська	5,1	8,7	11,6	11,6	11,6
ш. Золоте	5,4	10,4	12,4	12,4	12,4
ш. Карбоніт	3,6	5,4	7,3	7,3	
ш. Привольнянська	1,3	2,3	2,7	3,2	3,2
ш. Новодружеська	10,1	9,6	12,3	12,3	12,3
ш. ім. Д.Ф. Мельникова	9,3	5,0	5,6	5,6	5,6
ш. Степова	31,5	18,0	9,0		
ш. Павлоградська	18,8	15,7	5,0		
ш. Ювілейна	7,7	5,7	6,1	6,1	6,1
ш. Благодатна	11,8	10,0	8,0	8,0	8,0
ш. Тернівська	11,1	9,3			
ш. Самарська	13,3	11,1	8,8		
ш. Дніпровська	8,4	7,0	5,6	5,6	5,6
ш. ім. Героїв космосу	30,3	26,7	21,3	21,3	21,3
ш. Західно-Донбаська	40,3	20,2	18,5	18,5	18,5
ш. ім. М.І. Сташкова	8,1	6,5			
ш. Лісова	8,0	4,6	4,6		
ш. Червоноградська	12,0	9,1	10,6	12,2	12,2
ш. Степова	8,0	15,2	19,8	22,8	
ш. Бужанська	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>ВСЬОГО:</b>	<b>514,9</b>	<b>423,8</b>	<b>408,4</b>	<b>387,1</b>	<b>278,7</b>



При впровадженні дегазаційного обладнання при модернізації шахт можливо досягти скорочення викидів метану до 515 млн м<sup>3</sup> у 2020 р., 440 млн м<sup>3</sup> у 2025 р., 410 млн м<sup>3</sup> у 2030 р., 390 млн м<sup>3</sup> у 2035 р. і до 280 млн м<sup>3</sup> у 2040 р.

### ВИСНОВКИ

Удосконалена модель технологічного розвитку вуглевидобування врахує екологічні наслідки роботи шахт шляхом пов'язування обсягів видобутку вугілля з обсягами виділення шахтного метану, необхідними виробничими потужностями обладнання для його утилізації, а також обсягами капітальних витрат на таке обладнання. Врахування цих витрат в умовах підвищених вимог до екологічності функціонування вугільної галузі є необхідним елементом прогнозування її розвитку, зокрема фінансового забезпечення програм модернізації.

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

Із впровадженням дегазаційного обладнання викиди метану скоротяться на 275 млн м<sup>3</sup> у 2020 р., 550 млн м<sup>3</sup> у 2025 р., 590 млн м<sup>3</sup> у 2030 р., 560 млн м<sup>3</sup> у 2035 р. та 400 млн м<sup>3</sup> у 2040 р.

Стаття підготовлена в межах проекту, який фінансується за рахунок коштів бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

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. Вып. 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. Моделирование развития угольной промышленности Украины в условиях ограниченных инвестиций. *Економіка промисловості*. 2007. № 1. С. 105—111.
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. Вып. 2(45). С. 16—25. <https://doi.org/10.15407/pge2016.02.016>
6. Henderson J.M. A short-run model for the coal industry. *The Review of Economics and Statistics*. 1955. Vol. 37, No. 4. P. 336—346.
7. Suwala W. Models of Coal Industry in Poland. *Gospodarka surowcami mineralnymi*. 2010. Vol. 26. P. 41—52.
8. Макаров В.М. Математична модель оптимізації технологічного розвитку вуглевидобування в Україні. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. Вып. 1(48). С. 16—23. <https://doi.org/10.15407/pge2017.01.016>.
9. Makarov, V. (2018). Optimization of technological development of coal mining in Ukraine. Economic system development trends: the experience of countries of Eastern Europe and prospects of Ukraine: monograph / edited by autors. Riga, Latvia: Baltija Publishing. ISBN: 978-9934-571-28-2. <https://doi.org/10.30525/978-9934-571-28-2>
10. Макаров В.М. Методичні підходи до вибору видобувного обладнання при проведенні модернізації шахти. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вып. 4(43). С. 44—51. <https://doi.org/10.15407/pge2015.04.044>.
11. Кулик М.М., Горбулін В.П., Кириленко О.В. *Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали)*. Інститут загальної енергетики НАН України, 2017. 78 с.
12. Макаров В.М., Перов М.О., Макортецький М.М., Новицький І.Ю. Методика визначення перспективності шахт України. *Науковий вісник НГУ*. 2010. № 6. С. 123—127.
13. Косарев В.В. Новая горная техника Донгипроуглемаша – основа интенсификации добычи угля. *Уголь Украины*. 2003. № 9. С. 5—9.

Надійшла до редколегії: 12.11.2019