

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2018, 1(52): 5–11
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2018.01.005>

УДК 622.338

М.І. КАПЛІН, канд. техн. наук, **В.М. МАКАРОВ**, канд. техн. наук,
Т.Р. БІЛАН, канд. техн. наук, Інститут загальної енергетики
НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

БАЛАНСОВО-ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ЕНЕРГЕТИКИ З ПАЛИВНИМИ ГАЛУЗЯМИ ПЕК УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ ЄВРОПЕЙСЬКИХ ЕКОЛОГІЧНИХ НОРМ

Розроблено балансово-оптимізаційну модель виробничого типу для вирішення задачі оптимізації взаємоузгодженого функціонування енергетики України і паливних галузей ПЕК. Застосування технологічного способу багатопродуктової моделі дозволило врахувати утворення забруднювачів оточуючого середовища, як побічних продуктів технологій виробництва електричної і теплової енергії, що надає можливості оцінки заходів, спрямованих на поступове досягнення екологічних норм європейського законодавства.

Ключові слова: енергетика, органічне паливо, модель виробничого типу, технологічний спосіб, екологічні норми.

У зв'язку з остаточним приєднанням України до Європейського Енергетичного співтовариства 1 лютого 2011 року та ратифікацією у вересні 2014 року Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом наша країна має виконувати зобов'язання європейських Директив 2001/80/ЕС та 2010/75/EU, які містять три складові: 1) ринкову, що має за мету лібералізацію ринку газу, 2) безпеки, що забезпечує надійність постачання електричної енергії завдяки інтеграції енергетичних мереж, 3) екологічну, яка передбачає скорочення викидів забруднюючих речовин.

У зв'язку із втратою державного контролю та анексією окремих території значно зменшився видобуток органічних палив, спричинений скороченням виробничих потужностей галузей паливно-енергетичного комплексу, що може призвести до зниження рівня надійності постачання палива для об'єктів енергетики та відповідного знижен-

ня рівня надійності виробництва електричної енергії. Забезпечення цих умов функціонування ПЕК потребує залучення ресурсів світових ринків енергоносіїв, що, в свою чергу, вимагає визначення доцільного співвідношення обсягів імпортування з окремих джерел з метою виконання вимог енергетичної безпеки.

Забезпечення паливом національної економіки є одним з основних факторів прогнозування розвитку енергетики в «Енергетичній стратегії України до 2030 року». Окремі аспекти проблеми паливозабезпечення досліджувались в РВПСУ НАН України (роботи Б.З. Піріашвілі, І.К. Чукаєвої), Національному інституті міжнародної безпеки (С.І. Пирожков) та в Інституті економіки і прогнозування НАН України (В.Е. Лір).

Розробкою методик та математичних моделей оптимізації розвитку паливних галузей займалися такі провідні вчені: Ю.І. Кіяшко (ІГТМ НАН України); А.І. Акмаєв (ДонДУ); Ю.П. Корчевий (ІВЕ НАН України); Г.Г. Півняк (НГУ); В.І. Логвиненко (Донву-

гі); Н.С. Сургай (УкрНДІпроект); В.В. Косарев (ДонДіпровуглемаш); М.М. Кулик (ІЗЕ НАН України) та інші.

Сучасні дослідження стосовно взаємодії електроенергетики і паливних галузей з врахування ринкових трансформацій практично відсутні.

Метою роботи є розроблення методичних основ забезпечення органічним паливом енергетики України з урахуванням скорочення видобутку вуглецевмісних палив, викликаних змінами структури видобувних галузей, спричиненими втратою державного контролю над окремими територіями країни з урахуванням виконання зобов'язань Директив європейських вимог щодо зменшення викидів діоксиду сірки, оксидів азоту та пилу тепловими електростанціями.

Аналіз використання палива у тепловій енергетиці України показує, що надійне та ефективне забезпечення об'єктів генерації електричної і теплової енергії органічним паливом можливе лише за умови взаємоузгодженої роботи всіх видобувних галузей ПЕК країни, а також залучення необхідних обсягів імпортованих паливних продуктів зі світових ринків вуглецевмісних палив. Дефіцит окремих видів палива у ресурсній базі держави може бути подоланий як за рахунок їх зовнішнього надходження, так і скороченням інтенсивності використання технологій енергетичної галузі, що використовують ці види палива. Крім того, функціонування об'єктів теплової енергетики супроводжується утворенням шкідливих речовин, обсяги викидів яких залежать від виду використовуваного палива та потужності генеруючого об'єкта і жорстко контролюються світовим енергетичним законодавством.

Тому, проблема паливозабезпечення енергетики полягає у комплексному вирішенні задачі збалансованого використання технологій виробництва паливних продуктів, а також технологій генерування енергії в умовах обмежених можливостей ресурсної бази держави та врахування тривалості й витратності реформування структури генеруючих потужностей ПЕК.

Балансово-оптимізаційна модель взаємодії енергетики України з паливними галузями ПЕК країни враховує вказані вище чинники вирішення проблеми паливозабезпечення

одночасним представленням у її структурі виробництва паливних ресурсів видобувними галузями та їх споживання основними типами об'єктів генерування електричної та теплової енергії, що виробляють супутні продукти – забруднювачі довкілля (рис. 1).

У загальному вигляді модель виробничого типу, що будується на основі використання технологічних способів Л.В. Канторовича, й описує взаємоузгоджену роботу видобувних та теплоенергетичної галузей, можна сформулювати наступним чином. Необхідно надати мінімум сукупним витратам на виробництво та імпортування всіх видів викопного палива, що споживається в енергетичній галузі

$$\sum_{\gamma=1}^{N_{\Gamma}} \sum_{p_{\gamma}=1}^{P_{\gamma}} \sum_{j_{p_{\gamma}}}^{J_{p_{\gamma}}} C_{j_{p_{\gamma}}} \cdot \bar{x}_{j_{p_{\gamma}}} + \sum_{i_{p_{\text{имн}}}}^{I_{p_{\text{имн}}}} C_{i_{p_{\text{имн}}}} \cdot x_{i_{p_{\text{имн}}}} \rightarrow \min \quad (1)$$

за умов балансу обсягів видобування та споживання палив об'єктами теплової енергетики, які подаються системою рівнянь:

– балансу обсягів видобутого та товарного палива

$$g_{j_{p_{\gamma}}} \cdot \bar{x}_{j_{p_{\gamma}}} - x_{j_{p_{\gamma}}} = 0 \Big|_{j_{p_{\gamma}}=1, J_{p_{\gamma}}, p_{\gamma}=1, P_{\gamma}, \gamma=1, N_{\Gamma}}, \quad (2)$$

де $\bar{x}_{j_{p_{\gamma}}}$ – валовий обсяг видобутку палива p виробником j галузі γ в натуральних одиницях, млн т., млн м³;

$C_{j_{p_{\gamma}}}$ – ціна палива p виробника j галузі γ , грн/од. обс.;

$x_{i_{p_{\text{имн}}}}$ – обсяг імпортування палива p з джерела імпорту i в натуральних одиницях, млн т., млн м³;

$C_{i_{p_{\text{имн}}}}$ – ціна імпортованого палива p з джерела імпорту i , грн/од. обс.;

γ – індекс паливної галузі (1 – вугільна, 2 – газова, 3 – нафтовидобувна та нафтопереробна);

P_{γ} – індекс виду палива, що виробляється галуззю γ ;

$J_{p_{\gamma}}$ – індекс виробника палива p галузі γ ;

N_{Γ} – кількість паливних галузей ПЕК;

P_{γ} – кількість видів палива, що виробляються в галузі γ ;

$J_{p_{\gamma}}$ – кількість виробників палива p в галузі γ ;

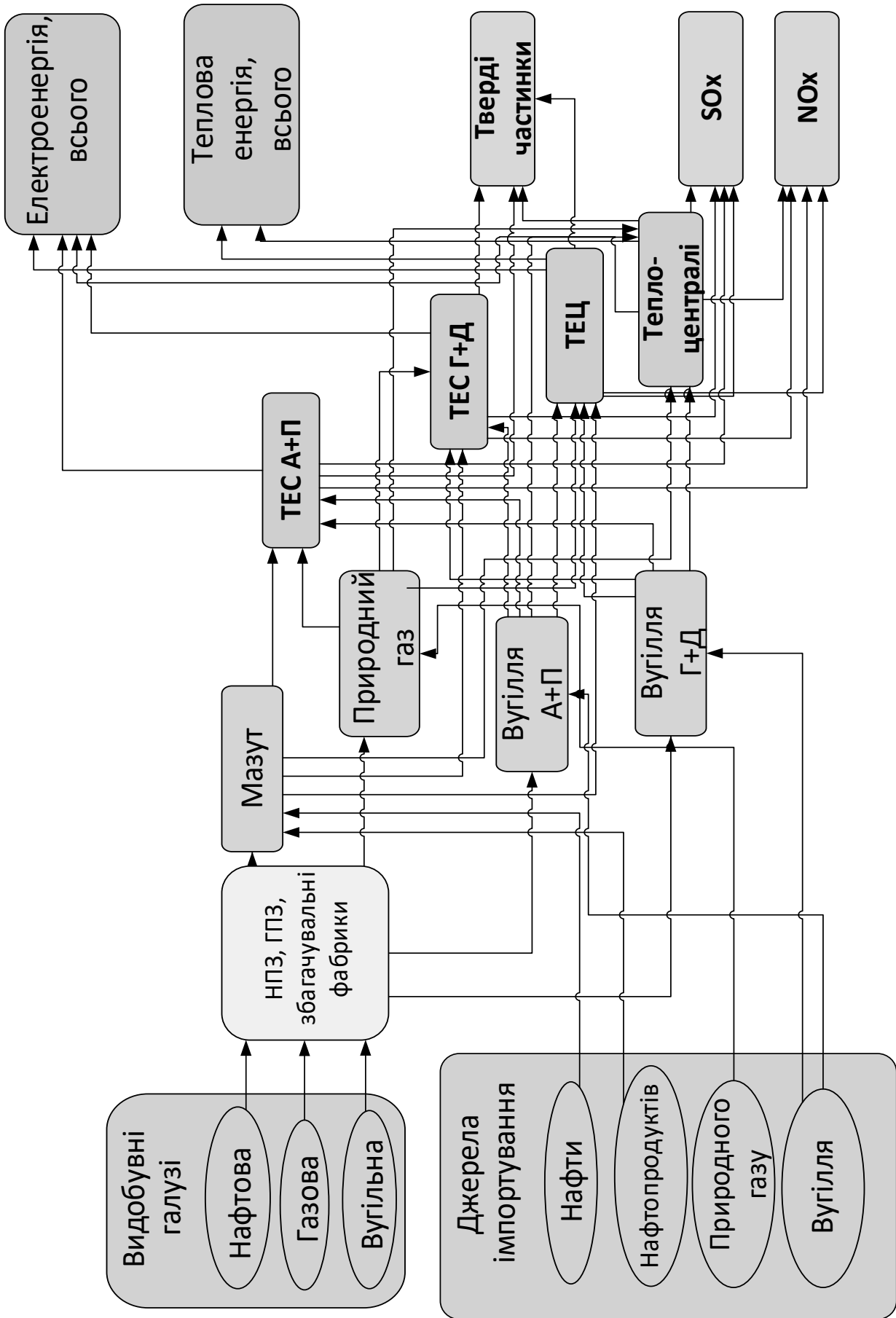


Рисунок 1. Схема балансово-оптимізаційної моделі взаємодії енергетики з паливними галузями ПЕК України.

$i_{p_{\text{імп}}}$ – індекс джерела імпортування палива виду p ;

$I_{p_{\text{імп}}}$ – кількість джерел імпортування палива виду p ;

$g_{j_{p\gamma}}$ – технологічний коефіцієнт витрат і втрат основного продукту моделі виробничого типу Леонт'єва – Канторовича – Купманса у технологічному способі виробництва палива виду p виробником j галузі γ ;

$X_{j_{p\gamma}}$ – обсяг видобутку палива p виробником j галузі γ в натуральних одиницях, нетто, млн т., млн м³;

– утворення сукупного обсягу палива p , видобутого всіма виробниками всіх паливних галузей

$$\sum_{\gamma=1}^{N_{\Gamma}} \sum_{j_{p\gamma}=1}^{J_{p\gamma}} x_{j_{p\gamma}} - X_p = 0 \Big|_{p=1, P}, \quad (3)$$

де X_p – загальний обсяг виробництва палива p у всіх паливних галузях ПЕК, в натуральних одиницях обсягу;

P – кількість видів палива, що виробляються всіма паливними галузями ПЕК;

p – індекс палива у загальному переліку палив, що виробляються всіма паливними галузями ПЕК і

$$\{p\} = \bigcup_{\gamma=1}^{N_{\Gamma}} \{p_{\gamma}\}, \quad P = \sum_{\gamma=1}^{N_{\Gamma}} P_{\gamma}. \quad (4)$$

– утворення сукупного обсягу палива p , імпортованого з усіх джерел світового ринку

$$\sum_{i_{p_{\text{імп}}}=1}^{I_{p_{\text{імп}}}} x_{i_{p_{\text{імп}}}} - X_p^{\text{імп}} = 0 \Big|_{p=1, P}, \quad (5)$$

де $x_{i_{p_{\text{імп}}}}$ – обсяг імпортування палива p з джерела імпортування i в натуральних одиницях, млн т., млн м³;

$X_p^{\text{імп}}$ – загальний обсяг імпортування палива p в натуральних одиницях, млн т., млн м³;

$i_{p_{\text{імп}}}$ – індекс джерела імпортування палива виду p ;

$I_{p_{\text{імп}}}$ – кількість джерел імпортування палива виду p ;

– утворення загального обсягу палива p , що постачається в енергетичну галузь

$$X_p + X_p^{\text{імп}} - X_p^{\Sigma} = 0 \Big|_{p=1, P}, \quad (6)$$

де X_p^{Σ} – загальний обсяг виробництва палива виду p всіма виробниками всіх паливних галузей ПЕК;

– витрати палива виду p при виробництві електричної (та теплової) енергії

а) тепловими електростанціями

$$X_p^{\Sigma} - \sum_{k_1=1}^{N_E} g_{e, k_1}^p \cdot \bar{e}_{k_1} = 0 \Big|_{p=1, P}, \quad (7)$$

де g_{e, k_1}^p – технологічний коефіцієнт витрат і втрат палива виду p у технологічному способі виробництва електричної енергії тепловою електростанцією k_1 ;

\bar{e}_{k_1} – валове виробництво електричної енергії тепловою електростанцією k_1 , млрд кВт·год;

k_1 – індекс об'єктів генерації електричної енергії – теплових електростанцій;

N_E – кількість теплових електростанцій;

б) теплоелектроцентралями

$$X_p^{\Sigma} - \sum_{k_2=1}^{N_{EQ}} g_{e, k_2}^p \cdot \bar{e}_{k_2} = 0 \Big|_{p=1, P}, \quad (8)$$

де g_{e, k_2}^p – технологічний коефіцієнт витрат і втрат палива виду p у технологічному способі виробництва електричної енергії об'єктом когенерації електричної і теплової енергії (теплоелектроцентральною) k_2 ;

\bar{e}_{k_2} – валове виробництво електричної енергії теплоелектроцентральною k_2 , млрд кВт·год;

k_2 – індекс об'єктів генерації електричної енергії – теплоелектроцентралей;

N_{EQ} – кількість теплоелектроцентралей;

– витрати палива виду p при виробництві теплової енергії теплоцентралями

$$X_p^\Sigma - \sum_{k_3=1}^{N_Q} g_{q,k_3}^p \cdot \bar{q}_{k_3} = 0 \Big|_{p=1, P}, \quad (9)$$

де g_{q,k_3}^p – технологічний коефіцієнт витрат і витрат палива виду p при виробництві теплової енергії у технологічному способі виробництва теплової енергії теплоцентраллю k_3 ; \bar{q}_{k_3} – валове виробництво теплової енергії теплоцентраллю k_3 , млн Гкал;
 k_3 – індекс об'єктів генерації теплової енергії – теплоцентралей;
 N_Q – кількість теплоцентралей;
 – балансу обсягів виробленої та виданої в систему електричної (та теплової) енергії
 а) тепловими електростанціями

$$g_{e,k_1}^e \cdot \bar{e}_{k_1} - e_{k_1} = 0 \Big|_{k_1=1, N_E}, \quad (10)$$

де g_{e,k_1}^e – технологічний коефіцієнт витрат і витрат основного продукту у технологічному способі виробництва електричної енергії тепловою електростанцією k_1 ;
 e_{k_1} – обсяг виробництва електричної енергії тепловою електростанцією k_1 , нетто млрд кВт·год;
 б) теплоелектроцентралями

$$g_{e,k_2}^e \cdot \bar{e}_{k_2} - e_{k_2} = 0 \Big|_{k_2=1, N_{EQ}}, \quad (11)$$

$$g_{q,k_2}^e \cdot \bar{e}_{k_2} - q_{k_2} = 0 \Big|_{k_2=1, N_{EQ}}, \quad (12)$$

де g_{e,k_2}^e – технологічний коефіцієнт витрат і витрат основного продукту у технологічному способі виробництва електричної енергії об'єктом когенерації електричної і теплової енергії (теплоелектроцентраллю) k_2 ;
 e_{k_2} – обсяг виробництва електричної енергії теплоелектроцентраллю k_2 , нетто млрд кВт·год;
 q_{k_2} – обсяг виробництва теплової енергії теплоелектроцентраллю k_2 , нетто, млн Гкал;
 – балансу обсягів виробленої та виданої в систему теплової енергії теплоцентралями

$$g_{q,k_3}^q \cdot \bar{q}_{k_3} - q_{k_3} = 0 \Big|_{k_3=1, N_Q}, \quad (13)$$

де g_{q,k_3}^q – технологічний коефіцієнт витрат і витрат основного продукту у технологічному способі виробництва теплової енергії теплоцентраллю k_3 ;
 q_{k_3} – обсяг виробництва теплової енергії теплоцентраллю k_3 , млн Гкал;
 – співвідношення обсягів виробництва електричної (та теплової) енергії та обсягів забруднювачів оточуючого середовища, що утворюються
 а) тепловими електростанціями

$$g_{z,m,k_1}^e \cdot \bar{e}_{k_1} - z_{m,k_1} = 0 \Big|_{k_1=1, N_E, m=1, N_Z}, \quad (14)$$

де g_{z,m,k_1}^e – технологічний коефіцієнт виробництва забруднювача m у технологічному способі виробництва електричної енергії тепловою електростанцією k_1 ;
 z_{m,k_1} – обсяг забруднювача m , що виробляється у технологічному способі виробництва електричної енергії тепловою електростанцією k_1 ;
 N_Z – кількість забруднювачів, що виробляються об'єктами генерації ПЕК;
 б) теплоелектроцентралями

$$g_{z,m,k_2}^e \cdot \bar{e}_{k_2} - z_{m,k_2} = 0 \Big|_{k_2=1, N_{EQ}, m=1, N_Z}, \quad (15)$$

де g_{z,m,k_2}^e – технологічний коефіцієнт виробництва забруднювача m у технологічному способі виробництва електричної енергії тепловою електростанцією k_2 ;
 z_{m,k_2} – обсяг забруднювача m у технологічному способі виробництва електричної енергії теплоелектроцентраллю k_2 ;
 – співвідношення обсягів виробництва теплової енергії та обсягів забруднювачів оточуючого середовища, що утворюються теплоцентралями

$$g_{z,m,k_3}^q \cdot \bar{q}_{k_3} - z_{m,k_3} = 0 \Big|_{k_3=1, N_Q, m=1, N_Z}, \quad (16)$$

де g_{z,m,k_3}^q – технологічний коефіцієнт обсягу забруднювача m у технологічному способі виробництва теплової енергії теплоцентраллю k_3 ;

Z_{m, k_3} – обсяг забруднювача m у технологічному способі виробництва теплової енергії теплоцентраллю k_3 ;

– забезпечення прогнозованого збалансованого із потребою обсягу електричної енергії, що виробляється об'єктами генерації на викопному паливі

$$\sum_{k_1=1}^{N_E} e_{k_1} + \sum_{k_2=1}^{N_{EQ}} e_{k_2} - u_E = E_{\text{вироб}}^{\text{прог}}, \quad (17)$$

де u_E – вирівнювальна змінна загального обсягу електричної енергії, що виробляється всіма об'єктами генерації ПЕК;

$E_{\text{вироб}}^{\text{прог}}$ – прогнозоване збалансоване з потребою значення обсягу електричної енергії, виробленої всіма об'єктами генерації ПЕК, що споживають паливні продукти видобувних галузей за період прогнозування;

– забезпечення прогнозованого збалансованого із потребою обсягу теплової енергії, що виробляється об'єктами генерації на викопному паливі

$$\sum_{k_3=1}^{N_Q} q_{k_3} + \sum_{k_2=1}^{N_{EQ}} q_{k_2} - u_Q = Q_{\text{вироб}}^{\text{прог}}, \quad (18)$$

де u_Q – вирівнювальна змінна загального обсягу теплової енергії, що виробляється всіма об'єктами генерації ПЕК;

$Q_{\text{вироб}}^{\text{прог}}$ – прогнозоване збалансоване значення обсягу теплової енергії, виробленої всіма об'єктами генерації ПЕК, що споживають паливні продукти видобувних галузей за період прогнозування;

– неперевищення сукупними обсягами забруднювачів від всіх об'єктів генерації на викопному паливі гранично-допустимих значень, що регламентуються екологічними нормами європейського законодавства

$$\sum_{k_1=1}^{N_E} z_{m, k_1} + \sum_{k_2=1}^{N_{EQ}} z_{m, k_2} + \sum_{k_3=1}^{N_Q} z_{m, k_3} + u_{Z_m} = Z_m^{\text{сп. доп.}}, \quad (19)$$

$\left. \vphantom{\sum_{k_1=1}^{N_E} z_{m, k_1} + \sum_{k_2=1}^{N_{EQ}} z_{m, k_2} + \sum_{k_3=1}^{N_Q} z_{m, k_3} + u_{Z_m} = Z_m^{\text{сп. доп.}}} \right\} m=1, N_Z$

де u_{Z_m} – вирівнювальна змінна загального обсягу забруднювача m , що виробляється всіма об'єктами генерації ПЕК;

$Z_m^{\text{сп. доп.}}$ – гранично-допустимий обсяг виробітку забруднювача m всіма об'єктами генерації ПЕК згідно екологічних норм європейського законодавства;

m – індекс виду забруднювача, що виробляється при функціонуванні об'єктів генерації електричної і теплової енергії ПЕК (1 – тверді частинки, 2 – оксиди азоту, 3 – оксиди сірки).

Обсяги вироблених палив, а також електричної та теплової енергії обмежуються в моделі значеннями максимально-можливих обсягів виробників, що визначаються їх виробничою потужністю та коефіцієнтом використання встановлених потужностей, таким чином, що:

$$0 \leq \bar{x}_{j_{p\gamma}} \leq \bar{X}_{j_{p\gamma}}^{\text{max}}, \quad (20)$$

$$0 \leq X_p^{\text{имп max}} \leq X_p^{\text{имп max}}, \quad (21)$$

$$0 \leq \bar{e}_{k_1} \leq \bar{E}_{k_1}^{\text{max}}; 0 \leq \bar{e}_{k_2} \leq \bar{E}_{k_2}^{\text{max}}, \quad (22)$$

$$0 \leq \bar{q}_{k_3} \leq \bar{Q}_{k_3}^{\text{max}}, \quad (23)$$

де $\bar{X}_{j_{p\gamma}}^{\text{max}}$ – граничний обсяг виробництва палива виду p виробником j галузі γ ;

$X_p^{\text{имп max}}$ – граничний практично-досяжний загальний обсяг імпортування палива виду p із врахуванням наявних його обсягів на світових ринках палива, а також транспортно-інфраструктурних обмежень;

$\bar{E}_{k_1}^{\text{max}}$ – максимальний обсяг виробництва електричної енергії тепловою електростанцією k_1 протягом періоду прогнозування із врахуванням гранично-досяжних значень коефіцієнта використання встановленої потужності, млрд кВт·год;

$\bar{E}_{k_2}^{\text{max}}$ – максимальний обсяг виробництва електричної енергії теплоелектроцентраллю k_2 , млрд кВт·год;

$\bar{Q}_{k_3}^{\text{max}}$ – максимальний обсяг виробництва теплової енергії теплоцентраллю k_3 , млрд кВт·год.

Обмеження на вирівнювальні змінні забезпечують значення необхідних обсягів виробітку електричної та теплової енергії, а також неперевищення обсягами викидів забруднювачів гранично-допустимих значень

$$u_E \geq 0; \quad u_Q \geq 0; \quad u_{Z_m} \geq 0. \quad (24)$$

Математична модель, що виражена системою рівнянь (1) – (24) надає загальне подання продуктово-виробничих зв'язків видобувних галузей та теплової енергетики, з деталізацією до окремого видобувного підприємства та електростанції. Її практична реалізація можлива лише за наявності деталізованої вихідної інформації щодо витрат та випусків окремих виробників. Наразі ця умова є практично недосяжною, тому у контексті виробника в поточній реалізації моделі доцільним є відображення або технологій виробництва, або груп паливних / енергетичних об'єктів, для яких можливо знайти відповідну техніко-економічну інформацію.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено балансово-оптимізаційну модель виробничого типу для вирішення задач оптимізації взаємоузгодженого функціонування енергетики України і паливних галузей ПЕК, що відрізняється

від відомих можливостями співставлення рівнів розвитку цих секторів економіки з метою гарантованого задоволення вимог енергетичної безпеки держави. Виробництво паливних ресурсів видобувними галузями ПЕК, а також їх використання об'єктами генерації електричної і теплової енергії представлено в моделі в межах єдиного підходу технологічними способами Л.В. Канторовича, що забезпечило можливість отримання взаємоузгоджених обсягів потреби на палива в задачах прогнозування розвитку енергетики, її технологічних підсистем, що використовують викопні види палива.

2. Застосування технологічного способу багатопродуктової моделі виробничого типу дозволило врахувати утворення забруднювачів оточуючого середовища, як побічних продуктів технологій виробництва електричної і теплової енергії, що надає можливості оцінки заходів, спрямованих на поступове досягнення екологічних норм європейського законодавства.

Надійшла до редколегії 09.02.2018