

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАЛИВОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЗАМІНИ ШТАТНОГО ПАЛИВА ТА ОБМЕЖЕНЬ НА ВИКИДИ

Запропоновано економіко-математичну модель вибору оптимального варіанта функціонування теплової енергетики та відповідного йому способу вуглепостачання. Модель побудовано на основі технологічного способу, а вибір доцільного варіанта функціонування здійснюється за допомогою бінарних змінних. Виконано розрахунки забезпечення вугіллям теплової енергетики України з урахуванням обмежень на викиди шкідливих речовин за різних варіантів функціонування.

Ключові слова: вугілля, тепла енергетика, викиди, паливний баланс, оптимізація, технологічний спосіб.

Ефективне й надійне функціонування теплової енергетики неможливе без одночасного розгляду всіх технологічних аспектів споживання палива. При забезпеченні паливом теплових електростанцій необхідно врахувати можливі джерела надходження палива як з вітчизняних паливних баз – вугілля власного видобутку, так і за імпортом – як можливого джерела задоволення загального паливного балансу теплової енергетики. Крім того, прогнозування перспективних балансів палив, що споживаються тепловими електростанціями, передбачає можливість подальшої реконструкції та модернізації основного теплосилового устаткування, що може, в свою чергу, потребувати заміну або часткове переоснащення основного та допоміжного обладнання котлоагрегатів, а також зміну технологічної схеми підготовки та спалювання вугілля з переведенням на непроектні види палива. Дефіцит штатного палива електростанцій може викликати необхідність повної заміни споживаних марок вугілля, що потягне за собою повну заміну котлоагрегату станції, наприклад, заміну котла, спроектованого на спалювання антрацитової групи вугілля, на котли для газової групи (марка Г).

© М.І. КАПЛІН, Т.Р. БІЛАН, 2015

Оскільки екологічні наслідки функціонування теплових електростанцій передбачають необхідність врахування не лише технічного оснащення, а й фізико-хімічних характеристик споживаного виду палива, наявності та типу очисного устаткування, ці аспекти експлуатації теплових установок мають розглядатись взаємоузгоджено і, як результат, залежать від вибраного виду палива та можливостей його постачання на станцію. Таким чином, всі ці показники роботи теплових енергоблоків утворюють цілісні варіанти переоснащення ТЕС, які формують множину можливостей розвитку теплової енергетики. Вибір оптимальних варіантів реконструкції та модернізації з цієї множини має здійснюватись з урахуванням економічної доцільності та надійності постачання перспективних видів палива.

З цією метою для дослідження особливостей паливозабезпечення теплової енергетики створено економіко-математичну модель, в межах якої здійснюється вибір доцільних варіантів реконструкції та модернізації енергоблоків теплових електростанцій й постачання відповідних видів вугільних продуктів з урахуванням вимог екологічної безпеки та обмежень на обсяги постачання вугільної продукції дефіцитних марочних груп.

Модель, побудована на основі поняття технологічного способу Канторовича, вміщує технологічні ланцюги варіантів функціонування ТЕС, що розглядаються, із врахуванням альтернативних способів вуглезабезпечення відповідними марочними групами палива, а також викидів забруднювачів, й описує таким чином екологічні наслідки вибору цих варіантів.

Вибір варіанта вуглепостачання модельним шляхом потребує зіставлення статистичної інформації щодо фактичних показників роботи електростанції з даними стосовно можливостей паливних баз у забезпеченні необхідною кількістю палива. Зокрема, для вираження обсягів надходження вугілля на ТЕС від постачальника, як правило, використовуються натуральні одиниці – мільйони тонн конкретної марки вугільної продукції з заданим значенням її теплотворної здатності. В той самий час, споживання палива станцією у її звітності щодо фактичних показників роботи задається в одиницях витрат умовного палива. Особливості вираження обсягів вугільного палива з боку постачальників та споживачів забезпечуються у моделі допоміжними технологічними способами перетворення одиниць виміру. Вироблення електричної енергії здійснюється окремими групами технологічних способів, у яких споживається вугільна продукція власного виробітку та імпортована. У цих технологічних способах разом з основним продуктом – електричною енергією, виробляються додаткові продукти – викиди шкідливих речовин, зокрема пилу, сірки, азоту.

Баланс викидів у моделі забезпечується технологічними способами виробітку загальних обсягів забруднювачів і введенням відповідних ослаблювальних змінних.

Модель, що описується системою (1) – (12), можна сформулювати таким чином – необхідно надати мінімального значення функції сумарних витрат на паливозабезпечення теплової енергетики (1), що включають у себе витрати на видобуток (2) та імпортування вугілля, а також плату за викиди, утворені у процесі його спалювання, при обмеженнях на обсяги постачання палива (11), (12) та викиди забруднювачів (5), (6). Права частина містить потребу в електроенергії на розрахунковий період (9). Змінними моделі є обсяги надходження вугілля для кожного з варіантів функціонування ТЕС

та відповідні їм обсяги викидів забруднювачів, утворених у процесі генерації електроенергії:

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{вар}}} \left(Z_{m_j}^{66} \cdot x_{m_j}^{66} + Z_{m_j}^{imn} \cdot x_{m_j}^{imn} \right) + \sum_{j=1}^{N_{\text{вар}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{забр}}} \Pi_{k m_j} \cdot V_{k m_j} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$Z_{m_j}^{66} = Z_{m_j}^{\text{вид}, \text{збаг}} + \Delta Z_{m_j}^{\text{як}} + Z_{m_j}^{\text{трансп}} \quad (2)$$

$$x_{m_j}^{66} - b_{m_j}^{66} e_{m_j}^{66} = 0 \Big|_{j=1, N_{\text{вар}}} \quad (3)$$

$$x_{m_j}^{imn} - b_{m_j}^{imn} e_{m_j}^{imn} = 0 \Big|_{j=1, N_{\text{вар}}} \quad (4)$$

$$v_{k m_j}^{66} - \xi_{k m_j}^{66} \cdot x_{m_j}^{66} = 0 \Big|_{j=1, N_{\text{вар}}} \quad (5)$$

$$v_{k m_j}^{imn} - \xi_{k m_j}^{imn} \cdot x_{m_j}^{imn} = 0 \Big|_{j=1, N_{\text{вар}}} \quad (6)$$

$$e_{m_j}^{66} + e_{m_j}^{imn} - E_{m_j} = 0 \Big|_{j=1, N_{\text{вар}}} \quad (7)$$

$$v_{k m_j}^{66} + v_{k m_j}^{imn} - V_{k m_j} = 0 \Big|_{j=1, N_{\text{вар}}} \quad (8)$$

$$E_{m_j} + \theta_j \cdot E^{nomp} = E^{nomp} \Big|_{j=1, N_{\text{вар}}} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{вар}}} \theta_j = N_{\text{вар}} - 1, \quad (10)$$

$$x_{m_j}^{66} \leq X_{m_j}^{66}, \quad (11)$$

$$x_{m_j}^{imn} \leq X_{m_j}^{imn}, \quad (12)$$

де $Z_{m_j}^{66}, Z_{m_j}^{imn}$ – витрати на власний видобуток та імпортування вугілля марки m у варіанті спалювання j , млн грн, відповідно;

$x_{m_j}^{66}, x_{m_j}^{imn}$ – обсяги вугілля власного видобутку та імпортованого марки m у варіанті спа-

лювання j , млн т, відповідно;

$X_{mj}^{вв}$, $X_{mj}^{імн}$ – потенційно досяжні обсяги готової вугільної продукції власного виробництва та імпортованої, отриманої з вугілля марки m для варіанта спалювання j , відповідно, млн т;

V_{kmj} – загальний обсяг викидів забруднювача типу k , що утворюються при спалюванні вугілля марки m у варіанті спалювання j , млн т;

P_{kmj} – плата за викиди забруднювача типу k , що утворюються при спалюванні вугілля марки m у варіанті спалювання j , млн грн;

$v_{mj}^{вв}$, $v_{mj}^{імн}$ – обсяги викидів забруднювача типу k , що утворюються при спалюванні вугілля марки m у варіанті спалювання j , млн т;

$\zeta_{mj}^{вв}$, $\zeta_{mj}^{імн}$ – питомі обсяги викидів забруднювача типу k , що утворюються при спалюванні вугілля власного видобутку та імпортованого марки m у варіанті спалювання j , відповідно, т/млн т у.п.;

$З_{mj}^{вид,збаг}$, $З_{mj}^{трансп}$ – витрати на видобуток і збагачення, а також транспортування вугілля власного видобутку марки m для варіанта спалювання j , відповідно, млн грн;

$\Delta Z_{mj}^{як}$ – плата на невідповідність якості вугілля власного видобутку марки m для варіанта спалювання j , вимогам до штатного палива, млн грн;

$b_{mj}^{вв}$, $b_{mj}^{імн}$ – питомі витрати вугілля власного видобутку та імпортованого марки m для варіанта спалювання j в одиницях обсягу умовного палива, відповідно, г у.п./кВт·год;

$e_{mj}^{вв}$, $e_{mj}^{імн}$ – обсяги електричної енергії, виробленої при спалюванні вугілля власного видобутку та імпортованого марки m для варіанта спалювання j , відповідно, ТВт·год;

E_{mj} – загальний обсяг електричної енергії, виробленої при спалюванні вугілля марки m для варіанта спалювання j , відповідно, ТВт·год;

$E^{потр}$ – потреба в електричній енергії, виробленій вугільними ТЕС, ТВт·год;

$N_{вар}$ – кількість варіантів спалювання вугілля у котлі ТЕС, що розглядаються;

$N_{забр}$ – кількість забруднювачів, що розглядаються, які утворюються у процесі спалювання вугілля у котлі ТЕС;

θ_j – бінарна змінна вибору варіанта функціонування ТЕС – типу котлів для спалювання вугілля антрацитової/газової марочних груп, встановлення очисного обладнання, забезпечення паливом відповідного типу; $\theta_j = 1$ для вибраного варіанта функціонування і $\theta_j = 0$ для всіх інших варіантів.

Вибір доцільного варіанта реконструкції й паливозабезпечення здійснюється за допомогою множини бінарних вирівнювальних множників при обсягах виробництва електричної енергії.

Модель містить такі групи технологічних способів:

1) видобутку/імпортування вугільної продукції марочних груп – антрацитової та газової в натуральних одиницях (групи А, В);

2) переведення обсягів вугілля в одиниці умовного палива (С, D);

3) виробітку електроенергії та викидів забруднювачів в передбачених варіантах функціонування ТЕС (Е, F):

– з реконструкцією котлоагрегату з метою зменшення витрат умовного палива та встановленням очисного обладнання, що забезпечує рівень очищення димових газів до рівня, прийнятеного згідно з законодавством ЄС;

– з повною заміною основного та допоміжного котельного обладнання з метою використання іншої марочної групи вугілля;

4) підсумовування обсягів електроенергії, виробленої при спалюванні вугілля власного видобутку та імпортованого окремо для кожної марочної групи (G);

5) підсумовування обсягів електроенергії за всіма варіантами функціонування ТЕС з цілочисельними коефіцієнтами, що забезпечують вибір одного з цих варіантів (H);

6) підсумовування обсягів викидів кожного виду забруднювачів, утворених при спалюванні всіх видів палива (I).

Структура технологічних способів моделі зображена на рисунку.

За допомогою розробленої моделі було проведено серію розрахунків вуглезабезпечення теплових електростанцій України за різних варіантів функціонування.

Групи технологічних способів									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	
A_A^{66}, A_Γ^{66}		-I							
	$A_A^{imn}, A_\Gamma^{imn}$		-I						
		$\bar{A}_A^{66}, \bar{A}_\Gamma^{66}$		-I					
			$\bar{A}_A^{imn}, \bar{A}_\Gamma^{imn}$		-I				
				E_A^{66}, E_Γ^{66}					
					$E_A^{imn}, E_\Gamma^{imn}$				
						E_A, E_Γ			
							$E_{вироб}$		
								$+ \Theta \cdot E_{потр}$	$E_{потр}$
				V_A^{66}, V_Γ^{66}					
					$V_A^{imn}, V_\Gamma^{imn}$				
								V_A, V_Γ	
									$-V_{вироб}$
									0

Групи продуктів

Структура технологічних способів моделі вибору варіантів функціонування ТЕС

Таблиця 1 – Прогнозні обсяги власного видобутку енергетичного вугілля за марками на контрольованих українською владою територіях, млн т

Марка вугілля	2013 (факт)	2020 р.	2025 р.	2030 р.	2035 р.
Д	0,283	0,350	0,475	0,570	0,660
ДГ	16,380	18,250	20,760	17,900	15,440
Г	10,404	14,510	18,190	20,203	26,255
Всього газової групи	27,067	33,110	39,425	38,673	42,355
Ж	0,247	–	–	–	–
П	0,131	0,280	0,285	0,285	0,285
А	–	–	–	–	–
Б	–	1,235	1,805	2,375	2,850
Всього	27,446	34,625	41,515	41,360	45,490

Орієнтовні прогнозні обсяги власного видобутку енергетичного вугілля за марками на контрольованих українською владою територіях, використані при розрахунках, наведено у табл. 1.

Вихідними даними та припущеннями, використаними при розрахунках, були такі:

– обсяги генерації електричної енергії тепловими станціями встановлено за показниками їх роботи у 2012 р. – 78,907 ТВт·год, у т.ч. – 40,519 ТВт·год при спалюванні антрацитової групи (марки вугілля А та П) та 38,388 ТВт·год – при спалюванні газової групи (марки Г, ДГ, Д) [1];

– показник витрат умовного палива вибрано єдиним для всіх станцій та встановлено на рівні 0,411 кг у.п./кВт·год, що відповідає значенню цього показника для Придніпровської ТЕС у 2011 р. [2];

– у технологічному способі, який описує варіант функціонування станції з реконструкцією котлоагрегату з метою зменшення витрат умовного палива та встановленням очисного обладнання, що забезпечує рівень очищення димових газів до рівня, прийнятного згідно з законодавством ЄС, витрати умовного палива становлять 0,362 кг у.п./кВт·год;

– технологічний коефіцієнт відповідного технологічного способу переведення обсягів вугілля в умовне паливо за теплотворною здатністю встановлено для вугілля власного видобутку рівним 1,795, для імпортованого – 1,399.

Валові, на тонну умовного палива, обсяги викидів пилу, діоксиду сірки та оксидів азоту, визначені на основі [3] при витратах умовного палива на рівні 0,416 кг у.п./кВт·год, подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Валові величини викидів забруднювачів, т/т у.п.

Вид забруднювача	Марка та клас спалюваного вугілля		
	АШ	ПР	ГР
Тверді частинки (пил)	1527,036	1575,605	1790,048
Діоксиди сірки	9632,675	13187,2524	35478,6852
Оксиди азоту	1274,3136	1315,8852	790,272

Таблиця 3 – Валові величини викидів забруднювачів при встановленому очисному устаткуванні, т/т у.п.

Вид забруднювача	Марка та клас спалюваного вугілля		
	АШ	ПР	ГР
Тверді частинки (пил)	63,627	65,650	74,585
Діоксиди сірки	1167,597	1598,455	4300,447
Оксиди азоту	242,726	250,645	150,528

Для варіанта функціонування станції із встановленням очисного устаткування, що зменшує рівень викидів забруднювача до норм європейського законодавства, валові, на тонну умовного палива, величини викидів забруднювачів подано у табл. 3.

Проведені розрахунки варіантів вуглезабезпечення теплової енергетики паливом власного видобутку та імпортованим, свідчать про таке:

1. За поточного стану шахтного фонду країни, коли орієнтовно 54% його виробничої потужності знаходиться на тимчасово окупованих територіях, при виробітку електроенергії тепловими електростанціями в обсязі 78,907 ТВт·год держава вимушена імпортувати, або завозити з тимчасово окупованих територій 6,915 млн т вугілля газової групи та 23,332 млн т вугілля марок А та П при середніх питомих витратах палива на рівні 0,416 кг у.п./кВт·год. Викиди забруднювачів становлять: при використанні антрацитової групи вугілля: пилу – 0,062 млн т, діоксидів сірки – 0,390 млн т, оксидів азоту – 0,052 млн т; при спалюванні імпортованого вугілля газової групи відповідні обсяги забруднювачів становлять 0,021 млн т, 0,426 млн т та 0,009 млн т. Спалювання газової групи вугілля власного видобутку призводить до утворення викидів забруднювачів у обсягах 0,047 млн т, 0,936 млн т та 0,021 млн т для пилу, діоксиду сірки та азоту відповідно (сукупні викиди забруднювачів: пилу – 0,13 млн т, діоксиду сірки – 1,752 млн т, оксидів азоту – 0,082 млн т).

2. Розрахунок паливозабезпечення ТЕС при переведенні всіх енергоблоків на спалювання газової групи призводить до вимушеного імпортування вугілля у обсязі 30,247 млн т за рівня власного видобутку у обсязі 19,489 млн т (фактичне значення у 2013 р.). При цьому, за

середнього значення питомих витрат палива на рівні 0,416 кг у.п./кВт·год значення викидів забруднювачів при спалюванні імпортованого вугілля становить: пилу – 0,094 млн т, діоксиду сірки – 1,864 млн т, оксидів азоту – 0,042 млн т. Викиди забруднювачів, що утворюються в процесі спалювання вугілля власного видобутку, становлять, відповідно, 0,047 млн т, 0,936 млн т, 0,021 млн т (сукупні викиди забруднювачів: пилу – 0,141 млн т, діоксиду сірки – 2,8 млн т, оксидів азоту – 0,063 млн т).

3. Зниження середніх питомих витрат палива до рівня 0,362 кг у.п./кВт·год при одночасному використанні очисного обладнання, що зменшує рівень забруднювачів до рівня, прийняттого за вимогами європейського законодавства, призводить, за результатами розрахунку, до необхідності імпортування вугілля газової групи у обсязі 24,772 млн т, за рівня власного видобутку 19,489 млн т. За таких умов, обсяги викидів шкідливих речовин становлять при використанні імпортованого палива: пилу – 0,003 млн т, діоксиду сірки – 0,171 млн т, оксидів азоту – 0,006 млн т. При спалюванні вугілля власного видобутку у цьому випадку викидається у повітря 0,002 млн т пилу, 0,105 млн т діоксиду сірки та 0,004 млн т оксидів азоту (сукупні викиди забруднювачів: пилу – 0,005 млн т, діоксиду сірки – 0,276 млн т, оксидів азоту – 0,01 млн т).

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано економіко-математичну модель паливозабезпечення ТЕС ОЕС України для визначення економічно-доцільних варіантів реконструкції енергоблоків ТЕС та відповідних варіантів забезпечення їх роботи вугільним паливом антрацитової та газової

марочних груп. Структура рівнянь балансу палива в моделі формується технологічними способами моделі виробничого типу, що описують джерела власного видобутку й імпортування вугільних продуктів, виробництво електричної енергії та викидів забруднювачів на ТЕС.

2. З огляду на відсутність наразі профіциту вугілля газової групи, а також в середньому вищий рівень викидів забруднювачів при спалюванні цього вугілля на діючих ТЕС, переоснащення станцій, що споживають антрацитову групу, на марки Г, ДГ, Д без встановлення очисного обладнання є недоцільним. Враховуючи значно нижчі рівні питомих викидів забруднювачів при використанні марки Г у сучасних енергоблоках нових ТЕС, наявність цього виду палива у покладах країни, а також можливість нарощення обсягів його видобутку та імпортування з джерел світового ринку, на відміну від антрацитової групи, оптимальним напрямком модернізації вугільно-енергетичного комплексу є побудова сучасних ТЕС, що використовують газову групу вугілля. Як тимчасовий варіант вуглезабезпечення теплової енергетики слід розглядати надходження необхідних обсягів антрацитової групи вугілля за імпортом з ПАР, США чи Австралії, можливо – В'єтнаму, розробку нових власних родовищ.

1. *Вольчин І.А.* Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України / І.А. Вольчин та ін. – К.: ГНОЗІС, 2013. – 310 с.
2. *Характеристика станцій* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ecu.gov.ua/ua/activity/production/power_plant.html.
3. *Ильченко К.Д.* Исследование зависимости вредных выбросов в атмосферу от вида твердого топлива, сжигаемого на тепловых электрических станциях / К.Д. Ильченко // *Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України.* – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2008. – С. 152 – 158.

Надійшла до редколегії 30.10.2015