

УДК 620.9:338.26

М.М. МАКОРТЕЦЬКИЙ, М.О. ПЕРОВ, І.Ю. НОВИЦЬКИЙ,
Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ВУГІЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ ДЛЯ ТЕС УКРАЇНИ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Запропоновано математичну модель оптимізації забезпечення ТЕС вугільною продукцією з проектними теплофізичними властивостями при мінімальних фінансових витратах із врахуванням екологічних обмежень. Модель дозволяє проводити розрахунки обсягів постачання вугільної продукції необхідного типу за прогнозними показниками якості за цінами світового ринку із врахуванням екологічних обмежень.

Ключові слова: вугільна продукція, математична модель, оптимізація, екологічні обмеження, паливозабезпечення.

Очікувані тенденції в паливозабезпеченні ТЕС, орієнтовані на підвищення ролі вугілля на ТЕС і посилення екологічних вимог, зумовлюють, по-перше – необхідність змін у технологічній структурі виробництва електроенергії, по-друге – підвищення споживчої якості вугільної продукції. Забезпечення ТЕС вугільною продукцією потрібної якості є важливим фактором покращання екологічної ситуації в державі в цілому.

Прагнення України до інтеграційних процесів з країнами Західної Європи неминуче буде супроводжуватись запровадженням більш жорстких екологічних вимог до функціонування підприємств, що видобувають, переробляють та споживають вугілля. Тому дослідження з оптимізації структури вугільної продукції різ-

ного технологічного призначення (зокрема для ТЕС) за її якістю з урахуванням якісних характеристик власних запасів і імпортованого вугілля, нинішніх і перспективних вимог споживачів теплової генерації з урахуванням екологічних обмежень наразі є актуальним.

Питанням надійності забезпечення та ефективності використання паливних ресурсів на енергетичних об'єктах присвячено зокрема роботи Г.Л. Краснянського [1] та ін.

Питанням визначення структури вуглепостачання для вітчизняних ТЕС присвячені роботи, виконані у тому числі в Інституті загальної енергетики НАН України [2, 3].

Метою даного дослідження є розроблення математичної моделі постачання вугільної продукції для ТЕС в умовах можливих імпортних поставок та продукції власного виробництва при мінімальних фінансових

витратах за певних рівнях встановлених екологічних обмежень. Дана модель поширюється на стаціонарні сталі режими роботи устаткування ТЕС і не стосується пуско-зупинних та перехідних режимів і експлуатаційного обслуговування.

Загальна вартість вугільної продукції, що надходить на ТЕС, обчислюється відповідно до встановленої базової ціни на вугільну продукцію із врахуванням теплофізичних характеристик її складових, а також знижок і надбавок за транспортування і переробку на збагачувальних фабриках, що можна виразити формулою [2]:

$$S = \sum_{k=1}^G \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L s_{ijl}^k x_{ijl}^k, \quad (1)$$

де S – загальна вартість вугільної продукції на всіх ТЕС України, грн; G – кількість ТЕС; N_k – кількість постачальників вугільної продукції на k -ту ТЕС; M – кількість марок енергетичного вугілля; L – кількість видів вугільної продукції (рядове вугілля, що відвантажується споживачам, та продукти переробки на збагачувальних фабриках: концентрат, промпродукт, відсів, шлам); s_{ijl}^k – ціна 1 т готової вугільної продукції, грн/т; x_{ijl}^k – обсяги готової вугільної продукції, т.

$$S = \min \sum_{k=1}^G \sum_{m=1}^H \eta^{mk} d^{mk} W^{mk} \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L [s_{ijl}^k x_{ijl}^k + \sum_{n=1}^H (c_{ijl}^{nk} z_{ijl}^{nk})], \quad (3)$$

де c_{ijl}^{nk} – податок за m -й викид в атмосферу, грн/т; z_{ijl}^{nk} – обсяги викидів, т; H – кількість видів шкідливих речовин.

При обмеженнях:

– на середньозважену калорійність запасів палива кожної ТЕС:

$$q_p^k \leq \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L q_{ijl} x_{ijl}^k}{\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L x_{ijl}^k} \leq \delta^k q_p^k; \quad (4)$$

$$k = 1, \dots, G$$

Як бачимо з (1), загальна вартість вугільної продукції S залежить від обсягів, отриманих від постачальників, і оптової ціни на цю продукцію, яка, в свою чергу, в значній мірі залежить від її показників якості, тобто

$$s_{ijl}^k = f(A_{ijl}^k, W_{ijl}^k), \quad (2)$$

де A_{ijl}^k і W_{ijl}^k – процент зольності і вологи в компонентах вугільної продукції відповідно.

Крім того, на ефективність роботи ТЕС в значній мірі впливають витрати, пов'язані з екологічними обмеженнями, що впливають з вимог кіотського протоколу. Тому в рівнянні (1) необхідно враховувати і фінансові витрати у вигляді податків за обсяги викидів в атмосферу шкідливих речовин, що утворюються в результаті спалювання на ТЕС вугільної продукції, а також витрат на установку газоочисного обладнання, які пропорційні електричній потужності ТЕС, тобто математичну модель забезпечення ТЕС вугільною продукцією із заданими теплофізичними властивостями за мінімальну ціну можна сформулювати таким чином:

де q_p^k – проектне для k -ї ТЕС значення нижчої теплоти згорання палива, ккал/кг. Верхнє обмеження калорійності палива величиною q_p^k пов'язане з безпекою котлів, термін експлуатації яких на ТЕС України досить значний; δ^k – стала величина, яка встановлює нижню межу калорійності палива для k -ї ТЕС, $\delta^k < 1$; d^{mk} – питома вартість очисного обладнання для m -го викиду k -ї ТЕС, грн/кВт; η^{mk} – параметр, який характеризує рівень

уловлювання забруднюючих речовин газоочисними установками, $0 \leq \eta^{mk} \leq 0,99$; W^k – електрична потужність k -ї ТЕС, МВт;
– на потенційні можливості постачальників:

$$\sum_{k=1}^G x_{ijl}^k \leq X_{ijl}; i = 1, \dots, N_k; j = 1, \dots, M; l = 1, \dots, L; \quad (5)$$

– на загальні обсяги потреб кожної ТЕС:

$$\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L \bar{x}_{ijl}^k \geq \bar{X}^k; \quad (6)$$

$$k = 1, \dots, G,$$

де \bar{x}_{ijl}^k – обсяги вугільної продукції в перерахунку на умовне паливо, тобто $\bar{x}_{ijl}^k = q_{ijl} x_{ijl}^k / Q_u$.

Вугільний еквівалент Q_u для перерахунку натурального палива в умовне

дорівнює величині 7000 ккал/кг або 29,33 МДж/кг.

Калорійність вугільної продукції в обмеженні (4) обчислюється згідно з [4] за формулою:

$$\begin{cases} q_{ijl} = q_j^{daf} (1 - A_{ijk}^d)(1 - W_{ijl}^{tr}) - \\ - 2,442 [W_{ijl}^{tr} + k_{ijl}(1 - A_j^d)(1 - W_{ijl}^{tr})], \quad (7) \\ i = 1, \dots, N_k; j = 1, \dots, M; l = 1, \dots, L \end{cases}$$

де q_{ijl} – питома теплота згорання вугільної продукції, ккал/кг; q_j^{daf} – середні значення вищої теплоти згорання на сухий беззолний стан палива, ккал/кг; k_j – коефіцієнт, що враховує вміст водню у вугіллі (усереднені значення: 0,46 для бурого і кам'яного вугілля крім антрациту і 0,21 для антрациту).

Розв'язок задачі (3) – (6) забезпечує оптимальну структуру запасів палива енергогенеруючої галузі країни з допустимими

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку питомих викидів

Фактор, який враховується коефіцієнтом	Залежність	Діапазон придатності залежності
Вплив коефіцієнта надлишку повітря в вихровому пальнику $\beta_{\alpha_G} \beta_{\alpha_G}^{BXP}$	$(0,35 \alpha_G + 0,4)^2$	$0,9 \leq \alpha_G \leq 1,3$
Вплив коефіцієнта надлишку повітря в прямоточному пальнику $\beta_{\alpha_G}^{PRM}$	$(0,53 \alpha_G + 0,4)^2$	$0,9 \leq \alpha_G \leq 1,3$
Вплив частки первинного повітря в пальнику β_{α_1}	$1,73 \alpha_G + 0,48$	$0,15 \leq \alpha_G \leq 0,55$
Вплив рециркуляції димових газів в первинному повітрі (без врахування зниження температури в зоні активного горіння) β_G	$1 - 0,016 \sqrt{r_G}$	$0 \leq r \leq 30\%$
Вплив максимальної температури на ділянці утворення паливних оксидів азоту β_θ	$0,11 \sqrt{T_{AG}'' - 1100}$	$1250 \leq r \leq 2050 \text{ K}$
Вплив сумішоутворення в корені факела вихрових пальників β_{CM}	$0,4 \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2 + 0,32$	$1,0 \leq W_2/W_1 \leq 1,6$
Вплив сумішоутворення в корені факела прямоточних пальників β_{CM}	$0,98 \cdot \frac{W_2}{W_1} - 0,47$	$1,4 \leq W_2/W_1 \leq 4,0$

ними параметрами якості при мінімальних фінансових витратах.

Основні види викидів, що надходять в атмосферу від спалювання вугільного палива на ТЕС, це оксид вуглецю, діоксид азоту, діоксид сірки, бенз(а)пірен, пил (тверді частинки), вуглекислий газ. Для обчислення z_{ijl}^{mk} використані матеріали робіт [5–10], де детально описані методи розрахунків обсягів вказаних шкідливих речовин. Маємо:

а) Маса викидів оксиду вуглецю z_{ijl}^{1k} (т/рік) обчислюється за формулою [5]:

$$z_{ijl}^{1k} = 0,001x_{ijl}^k K_{co} Q_{ijl}^k \quad (8)$$

де Q_{ijl}^k – нижча теплота згорання палива, МДж/кг; K_{co} – коефіцієнт, що характеризує викид оксиду вуглецю на 1 ГДж теплоти, кг/ГДж.

б) Масу викидів оксидів азоту z_{ijl}^{2k} (т/рік) розраховано за питомими викидами або по концентрації оксидів азоту [5, 6]:

$$z_{ijl}^{2k} = x_{ijl}^k K_{NO_2} Q_{ijl}^k \quad (9)$$

де x_{ijl}^k – розрахункова витрата палива, т/рік; Q_{ijl}^k – теплота згорання палива, МДж/кг; K_{no_2} – питомий викид оксидів азоту в перерахунку на NO_2 , кг/ГДж.

Вихідні дані, необхідні для розрахунку питомих викидів (табл. 1): N^2 – вміст азоту в паливі, у відсотках на робочу масу; тип пальників (вихрові, прямоочні, з подачею

пилу високої концентрації); ∞_{Γ} – коефіцієнт надлишку повітря в пальниках; ∞_1 – частка первинного повітря по відношенню до теоретично необхідного; r_{Γ} – ступінь рециркуляції димових газів через пальники, %; W_2/W_1 – відношення швидкостей у вихідному перерізі пальників; W_2/W_1 можна прийняти 1,4–2,0; Δ^{∞}_T – присоси повітря в топку; приймається до 0,1; Δ^{∞}_3 – третинне повітря, що подається в топку окрім пальників; приймається до 0,1; Δ^{∞}_{cbr} – скидне повітря (сушильний агент) при транспорті пилу до пальників гарячим повітрям; T'_{AG} – температура за зоною активності горіння, К.

Питомі викиди оксидів азоту K_{NO_2} (г/МДж) складаються з паливних $K_{NO_2}^{PLV}$ і повітряних $K_{NO_2}^{PLV}$ оксидів азоту:

$$K_{NO_2} = K_{NO_2}^{PLV} + K_{NO_2}^{PVT} \quad (10)$$

Паливні оксиди азоту підраховують за формулою:

$$K_{NO_2}^{PLV} = 0,7 \cdot N_{ijl}^k \cdot \beta_{\alpha_G} \cdot \beta_{\alpha_1} \times \beta_{r_G} \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \beta_{CM} \quad (11)$$

де N_{ijl}^k – вміст азоту в паливі, г/МДж,

$$N_{ijl}^k = 10 \bar{N}_{ijl}^k / Q_{ijl}^k \quad (12)$$

значення коефіцієнтів β у формулі (11) наведені в табл. 1; \bar{N}_{ijl}^k – вміст азоту в паливі в процентах на робочу масу.

Таблиця 2 – Орієнтовні значення η'_{SO_2} при спалюванні вугілля

Паливо	η'_{SO_2}
Кам'яне вугілля:	
– для топок з твердим шлаковидаленням	0,2
– для топок з рідким шлаковидаленням	0,05

Для підрахунку повітряних оксидів азоту використовують залежність, що враховує рівняння Зельдовича [6]:

$$K_{NO_2}^{PVT} = 1,54 \cdot 10^{16} \times \sqrt{\frac{\alpha''_{AG} - 1}{\alpha''_{AG}}} \cdot e^{-\frac{6700}{T'_{AG}} / T'_{AG}}, \quad (13)$$

де α''_{AG} – коефіцієнт надлишку повітря в зоні активного горіння, умовно приймається як сума повітря, що подається через пальники і присоси через нижню частину топкової камери, тобто

$$\alpha''_{AG} = \alpha_T + 1/2\Delta\alpha_T, \quad (14)$$

де T'_{AG} – температура на виході із зони активного горіння, К.

Рівняння (14) справедливе в діапазоні коефіцієнтів надлишку повітря $1,05 \leq \alpha''_{AG} \leq 1,4$ і до температури $T'_{AG} = 2050$ К. При температурі, меншій від 1800 К, величиною $K_{NO_2}^{PLV}$ можна знехтувати.

в) Сумарну кількість оксидів сірки z_{ijl}^{3k} , що викидаються в атмосферу з димовими газами (г/с, т/рік), обчислюють за формулою [5, 7]:

$$z_{ijl}^{3k} = 0,02x_{ijl}^k \cdot s_{ijl}^k \times (1 - \eta'_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2}), \quad (15)$$

Таблиця 3 – Коефіцієнти викидів вуглецю

Вид палива	Одиниця виміру	Коефіцієнт викидів вуглецю, т С/ГДж	Фракція окисненого вуглецю
Сира нафта	т	0,0200	0,990
Вугілля кам'яне	т	0,0262	0,980
Природний газ	тис. куб. м	0,0153	0,950

Таблиця 4 – Екологічні обмеження на викиди в повітря шкідливих речовин, мг/м³ [11, 12]

	Україна	Країни ЄС
Діоксид азоту	700; 1500	200
Діоксид сірки	5100	400
Тверді частинки	1000; 1800; 2000	50
Оксид вуглецю	200	–

Таблиця 5 – Питомі величини податків за викиди шкідливих речовин, грн/т [12]

№ з/п	Викид	Податок
1	Оксид вуглецю	83,07
2	Вуглекислий газ	0,37
3	Діоксид азоту	2204,89
4	Діоксид сірки	2204,89
5	Бенз(а)пірен	2806850,49
6	Тверді частинки	83,07

Таблиця 6 – Оцінка питомих капітальних витрат на встановлення сучасних газоочисних установок на конденсаційних енергоблоках ТЕС [11]

№ з/п	Викид	Податок
1	Оксид вуглецю	83,07
2	Вуглекислий газ	0,37
3	Діоксид азоту	2204,89
4	Діоксид сірки	2204,89
5	Бенз(а)пірен	2806850,49
6	Тверді частинки	83,07

де x_{ijl}^k – витрата натурального палива за аналізований період, г/с (т/рік); s_{ijl}^k – вміст сірки в паливі на робочу масу, %; η'_{SO_2} – частка оксидів сірки, що пов'язуються летючої золою в котлоагрегаті; η''_{SO_2} – частка оксидів сірки, що вловлюються в мокрому золоуловлювачі водночас із уловлюванням твердих частинок.

Орієнтовні значення η'_{SO_2} при спалюванні вугілля наведено в табл. 2.

Частка оксидів сірки (η''_{SO_2}), що вловлюються в сухих пиловловлювачах, приймається рівною нулю.

г) Викид бенз(а)пірену, що надходить в атмосферу з димовими газами, т/рік (г/с), розраховується за рівнянням [8]:

$$z_{ijl}^{4k} = C_{BP} V_R x_{ijl}^k K_P, \quad (16)$$

де C_{BP} – масова концентрація бенз(а)піре-

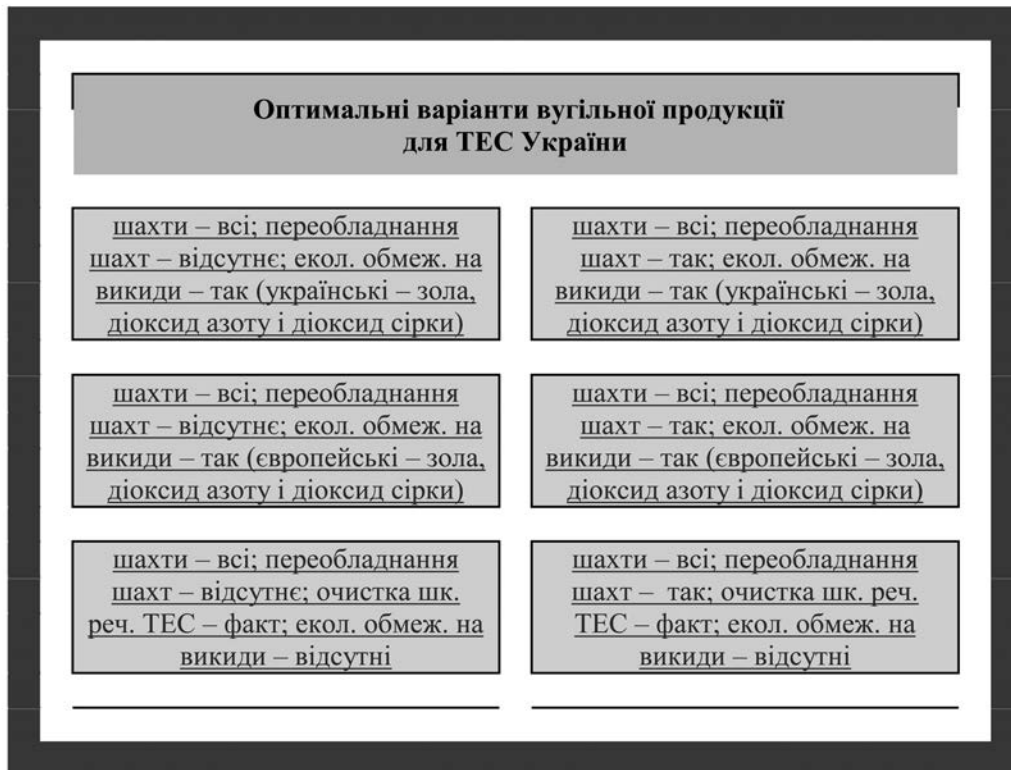


Рисунок – Блок розрахунку варіантів постачання палива на ТЕС з урахуванням екологічних обмежень та переобладнання шахт технікою нового технічного рівня в структурі ППК «Вугілля України»

ну в сухих димових газах при стандартному коефіцієнті надлишку повітря $\alpha'_T = 1,4$ і нормальних умовах ($T = 273 \text{ К}$, $P = 101,3 \text{ кПа}$), мг/нм^3 (Мг/м^3); V_R – обсяг сухих димових газів, що утворюються при повному згоранні (при $\alpha'_T = 1,4$), $\text{нм}^3/\text{кг}$ ($\text{нм}^3/\text{нм}^3$); K_P – коефіцієнт перерахунку (при визначенні викидів в м/с, $K_P = 0,278 \cdot 10^3$; при визначенні викидів в т/рік $K_P = 10^6$).

Концентрація бенз(а)пірену C_{BP} (мкг/м^3), приведена до надлишку повітря ($\alpha'_T = 1,4$), визначається за формулою:

$$C_{BP} = \frac{AQ_i^r}{e^{1.5\alpha'_T}} K_d K_z, \quad (17)$$

де A – коефіцієнт, що характеризує нижню зону топки; Q_i^r – нижча теплота згорання палива, МДж/кг ; K_d – коефіцієнт, що враховує навантаження котла; K_z – коефіцієнт, що враховує ступінь вловлювання бенз(а)пірену золовловлювачами.

д) Сумарна кількість твердих частинок (летючої золи і незгорілого палива) z_{ijl}^{5k} , що надходять в атмосферу з димовими газами котлів обчислюється за формулою [5, 7]:

$$z_{ijl}^{5k} = 0,01 x_{ijl}^k \left(a_{yn} A_{ijl}^k + q_4 \frac{Q_{ijl}^k}{32,68} \right) \times (1 - \mu_3), \quad (18)$$

де x_{ijl}^k – витрата натурального палива, г/с (т/рік); A_{ijl}^k – зольність палива на робочу масу, %; a_{yn} – частка золи, що виноситься газами з котла (частка золи палива в віднесенні); за відсутності даних замірів можна використовувати орієнтовні значення, наведені в нормативному методі теплового розрахунку котельних агрегатів [9]; η_3 – частка твердих частинок, що уловлюються в золоуловлювачах (в розрахунку не вра-

ховується вплив сіркоуловлюючих установок); q_4 – втрати тепла від механічної неповноти згорання палива, % [9]; Q_{ijl}^k – нижча теплота згорання палива, МДж/кг ; 32,68 – теплота згорання вуглецю, МДж/кг .

е) Стандартним підходом при розрахунку викидів вуглекислого газу z_{ijl}^{6k} , який утворюється при спалюванні вугілля за певний проміжок часу (наприклад, за рік), є добуток обсягів палива, яке згоріло, на коефіцієнт викидів (табл. 3) для певного виду палива за формулою [5, 10]:

$$z_{ijl}^{6k} = c_j Q_m B_p k_n 44/12, \quad (19)$$

де c_j – обсяг використаного палива (вугілля), т; Q_m – нижча теплотворна спроможність палива, ГДж ; B_p – коефіцієнт викидів вуглецю, т С/ГДж ; k_n – коефіцієнт фракції окисненого вуглецю; для мазуту, сухого природного газу та вугілля – 0,989; 0,994; 0,979 відповідно; 44/12 – коефіцієнт перетворення вуглецю в CO_2 .

Розробка алгоритму, що реалізує дану модель, передбачає наявність показників якості вугільної продукції, які є визначальними при розрахунку ціни цієї продукції, екологічних обмежень z_0^{mk} (табл. 4), питомих величин податку на викиди в атмосферу шкідливих речовин c^m (табл. 5). Вихідні дані для розрахунку витрат на газоочисне обладнання для енергетичних спалювальних установок, які працюють на вироблення електричної енергії на ТЕС, наведені в табл. 6.

Відповідно до документації конкурсних торгів між споживачами і постачальниками, які проводяться в рамках Закону України від 01.06.2010 р. № 2289-VI «Про здійснення державних закупівель» [14], ціна на вугільну продукцію обчислюється за формулою:

$$s_{ijl}^k = s^b \pm \Delta s^a \pm \Delta s^w - \Delta s^t, \quad (20)$$

де s^b – базова ціна, яка встановлюється щорічно виходячи з поточної кон'юнктури ринку, грн/т; Δs^a – надбавка (знижка) за зольність готової вугільної продукції, грн/т; Δs^w – надбавка (знижка) за вміст вологи в готовій вугільній продукції, грн/т; Δs^t – витрати на транспортування, грн/т.

Для оптимізації структури вугільної продукції для ТЕС, як постачальники, розглядаються не лише вітчизняні підприємства, які видобувають вугілля відповідних марок, а також варіанти можливого імпорту (наприклад, з Польщі) [15].

Всі обчислювальні операції реалізовані в структурі програмно-інформаційного комплексу (ПК) [16], що дозволяє в повній мірі використати наявну в ній базу статистичних даних в області вуглевидобувної і вуглепереробної промисловості України (див. рисунок).

ВИСНОВКИ

Запропоновано та апробовано математичну модель оптимізації забезпечення вітчизняних ТЕС вугільною продукцією із загальними теплофізичними властивостями за мінімальною ціною та витратами, пов'язаними з податком на викиди в атмосферу шкідливих речовин від спалювання вугілля та затрат на встановлення газоочисного устаткування.

На основі запропонованої моделі надалі буде визначено оптимальну структуру забезпечення паливом семи ТЕС, які працюють на вугіллі газової групи, що задовольняє як за обсягами умовного палива, так і за його калорійністю відповідно до проектних характеристик електростанцій із врахуванням екологічних обмежень.

1. Краснянский Г.Л. Экономические аспекты развития топливно-энергетического комплекса России. М.: Изд-во АГН, 2000. 128 с.
2. Стогній О.В., Макортецький М.М., Перов М.О. Математична модель оптимальної структури вугільної продукції для ТЕС. *Проблеми загальної енергетики*. 2013. Вип. 4(35). С. 41–46.
3. Макортецький М.М., Перов М.О., Новицький І.Ю. Оптимальна структура вугільної продукції для ТЕС України з врахуванням імпорту. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 3(42). С.13–16. <https://doi.org/10.15407/page2015.03.013>
4. ДСТУ 4083-2012. Вугілля кам'яне та антрацит для пиловидного спалювання на теплових електростанціях. Технічні умови. Київ, 2012. 10 с.
5. ГДК 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Київ: вид-во «КВІЦ».
6. СО 153-34.02.304-2003. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. URL: https://znaytovar.ru/gost/2/SO_15334023042003_Metodicheski.html.
7. РД 34.02.305-98. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. URL: https://znaytovar.ru/gost/2/RD_340230598_Metodika_opredele.html.
8. РД 153-34.1 02.316-99. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. URL: https://znaytovar.ru/gost/2RD_1533410231699_Metodika_rasc.html.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубровского, Э.С. Карасиной. М.: Энергия, 1973. 295 с.
10. Методика расчета выбросов парниковых газов (CO₂-эквивалента). URL: <http://sro150.ru/index.php/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovykh-gazov>.
11. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок Київ, 2015. С. 78.
12. Состояние котельного хозяйства в Украине и направления его модернизации. URL:

<http://energetika.in.ua/ru/books/book-3/part-1/section-2/2-13>.

13. Ставки экологического налога – 2017. URL: <http://chp.com.ua/newspaper-news/item/47826-stavki-ekologicheskogo-naloga-2017>.

14. Про здійснення державних закупівель: Закон України за станом на 1 черв. 2010 р. № 2289-VI. URL: <http://www.nibu.factor.ua/ukr/info/goszakup/Z2289/>.

15. Кто импортировал дефицитный антрацит в Украину в 2016 году. URL: <https://biz.censor.net.ua>

[/resonance/3021268/kto_importiroval_defitsitnyyi_antratsit_v_ukrainu_v_2016_godu](https://biz.censor.net.ua/resonance/3021268/kto_importiroval_defitsitnyyi_antratsit_v_ukrainu_v_2016_godu).

16. Стогній О.В., Макортецький М.М. Математична модель оптимізації впровадження передової техніки у вугледобувній галузі України. *Проблеми загальної енергетики*. 2012. Вип. 2 (29). С. 27–34.

Надійшла до редколегії: 06.06.2017