

ПОБУДОВА, ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГОРИНКІВ

УДК 620.9:338.26

О.В. СТОГНІЙ, канд. техн. наук, М.М. МАКОРТЕЦЬКИЙ, М.О. ПЕРОВ
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ВУГІЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ ДЛЯ ТЕС УКРАЇНИ

Запропоновано математичну модель оптимізації забезпечення ТЕС вугільною продукцією із заданими теплофізичними властивостями та мінімальною ціною. Проведено апробацію моделі при оптимізації структури вугільної продукції. Отримано оптимальну структуру забезпечення паливом 6-ти ТЕС антрацитової групи, що задовольняє як за обсягами умовного палива, так і за його калорійністю відповідно до проектних характеристик електростанцій.

Ключові слова: енергетична безпека, математична модель, вуглевидобуток, екологія довкілля, теплофізичні властивості.

Забезпечення ТЕС вугільною продукцією необхідної якості є важливим фактором як з точки зору енергетичної незалежності країни, так і екологічної ситуації, яка в значній мірі потерпає внаслідок спалювання високосольного вугілля. Особливо, якщо враховувати геологічні особливості лав вітчизняних вуглевидобувних підприємств, видобуте вугілля на яких, як правило, низької якості. Розглянемо структуру формування обсягів вугільної продукції, що надходить на ТЕС. Це рядове вугілля, видобуте на шахтах і відвантажене споживачеві, та вугільна продукція, отримана шляхом переробки на збагачувальних фабриках. Структура цієї продукції за своїми фізичними і хімічними властивостями досить різноманітна і ці відмінності залежать не тільки від технології переробки вугілля на фабриках, а в значній мірі і від геологічних і технологічних особливостей кожної шахти (лави). В той самий час споживачі (ТЕС) зацікавлені в отриманні вугілля з певними

хімічними властивостями за прийнятну ціну. Як правило, запаси вугільної продукції, що є в наявності на ТЕС, формуються за рахунок обсягів, які надходять з декількох вугільних підприємств і збагачувальних фабрик, з якими є спеціальні угоди на поставку. Загальна вартість цих поставок 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

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

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

© О.В. СТОГНІЙ, М.М. МАКОРТЕЦЬКИЙ, М.О. ПЕРОВ,
2013

вугілля, що відвантажується споживачам, та продукти переробки на збагачувальних фабриках: концентрат, промпродукт, відсів, шлам); s^k_{ijl} – вартість 1 т готової вугільної продукції, грн/т;

x^k_{ijl} – обсяги готової вугільної продукції, т.

Як бачимо (1), загальна вартість вугільної продукції 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: $s^k_{ijl} = f(A^k_{ijl}, W^k_{ijl})$, де A^k_{ijl} і W^k_{ijl} – відповідно % зольності і вологи в компонентах вугільної продукції. Таким чином, математична модель забезпечення ТЕС вугільною продукцією із заданими теплофізичними властивостями за мінімальну ціну може бути сформульована таким чином:

$$S = \sum_{k=1}^G \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L s^k_{ijl} x^k_{ijl} \rightarrow \min \quad (2)$$

при обмеженнях:

– на середньозважену калорійність запасів палива кожної ТЕС

$$q^k_p \leq \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L q_{ijl} x^k_{ijl}}{\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L x^k_{ijl}} \leq \delta^k q^k_p; \quad k = 1, \dots, G, \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} q_{ijl} &= q_j^{daf} (1 - A^d_{ijk})(1 - W^{tr}_{ijl}) - 2,442 [W^{tr}_{ijl} + k_{ijl}(1 - A^d_j)(1 - W^{tr}_{ijl})] \\ i &= 1, \dots, N_k; j = 1, \dots, M; l = 1, \dots, L, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

де q_{ijl} – питома теплота згорання вугільної продукції, ккал/кг;

q^{daf}_j – середні значення вищої теплоти згорання на сухий беззольний стан палива (табл.1), 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).

де q^k_p – проектне для k -ї ТЕС значення нижньої теплоти згорання палива, ккал/кг, а δ^k – стала величина, яка встановлює нижню межу калорійності палива для k -ї ТЕС, $\delta^k < 1$. Верхнє обмеження калорійності палива величиною q^k_p пов'язане з безпекою котлів, термін експлуатації яких на ТЕС України досить значний;

– на потенційні можливості постачальників

$$\sum_{k=1}^G x^k_{ijl} \leq X_{ijl}; \quad i = 1, \dots, N_k; \quad j = 1, \dots, M; \quad l = 1, \dots, L; \quad (4)$$

– на загальні обсяги потреб кожної ТЕС

$$\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^L \bar{x}^k_{ijl} \geq \bar{X}^k; \quad k = 1, \dots, G, \quad (5)$$

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

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 (3) обчислюється за формулою (6) згідно з [1]:

Розв'язок задачі (2)–(5) забезпечує оптимальну структуру запасів палива енергогенеруючої галузі країни з допустимими параметрами якості при мінімальній вартості.

Розробка алгоритму, що реалізує цю модель, передбачає наявність показників якості вугільної продукції, які є визначальними при розрахунку ціни цієї продукції. Відповідно до документації конкурсних торгів між споживачами і постачальниками, які проводяться в рамках

Таблиця 1 – Середні значення вищої теплоти згорання на сухий беззольний стан палива

Марка	Д	ДГ	Г	Ж	К	ПС	П	А
q^{daf} , ккал/кг (середнє)	7650	7880	8020	8530	8590	8530	8500	8140

Закону України від 01.06.2010 р. № 2289-VI «Про здійснення державних закупівель» [2], ціна на вугільну продукцію обчислюється за формулою

$$s^k_{ijl} = s^b \pm \Delta s^a \pm \Delta s^w + \Delta s^t,$$

де s^b – базова ціна, яка встановлюється щорічно виходячи з поточної кон'юнктури ринку, грн/т; Δs^a – надбавка (знижка) за зольність готової продукції, грн/т; Δs^w – надбавка (зниж-

ка) за вміст вологи в готовій продукції, грн/т; Δs^t – витрати на транспортування, грн/т.

Базові характеристики вугільної продукції і система надбавок/знижок, які використовувались в практичних розрахунках за розробленим алгоритмом, наведені в табл. 2–5. При цьому враховано, що максимальна величина загальних знижок не повинна перевищувати $0,9 s^b$, тобто $\Delta s^a + \Delta s^w \leq 0,9 s^b$.

Таблиця 2 – Базові показники вугільної продукції

Марка вугілля	Ае	Ге	Пе	ДГе	Де	Бе	Же
Зольність (А), %	19,8	23	20,2	23	23		23
Волога (W), %	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9		8,9

Таблиця 3 – Базова ціна та вартість транспортування вугільної продукції

Базова ціна 1 т вугільної продукції (грн) ^{*/}	800
Транспортування, грн/т	30

Примітка: */ – в цінах 2011 року.

Таблиця 4 – Система знижок/надбавок вартості вугільної продукції за показниками золи

Марка вугілля	Ае	Ге	Пе	ДГе	Де	Бе	Же
Надбавки							
Зольність (А), %	max	19,8	23	20,2	23	23	23
	min	16	18	18	18	18	18
Надбавка, % від базової ціни		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Знижки							
Зольність (А), %	min	19,8	23	20,2	23	23	23
	max	22	25	24	25	25	25
Знижка, %, від базової ціни		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Зольність (А), %	min	22	25	24	25	25	25
	max	25	27	26	27	27	27
Знижка, % від базової ціни		3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Зольність (А), %	min	25	27	26	27	27	27
	max	100	100	100	100	100	100
Знижка, % від базової ціни		7	7	7	7	7	7

Таблиця 5 – Система знижок/надбавок вартості вугільної продукції за показниками вологи

Марка вугілля		Ае	Ге	Пе	ДГе	Де	Бе	Же
Надбавки								
Волога (А), %	max	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9		8,9
	min	0	0	0	0	0		0
Надбавка, %		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3		1,3
Знижки								
Волога (А), %	min	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9		8,9
	max	12	12	12	12	12		12
Знижка, % від базової ціни		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3		1,3
Знижки								
Волога (А), %	min	12	12	12	12	12		12
	max	100	100	100	100	100		100
Знижка, % від базової ціни		5	5	5	5	5		5

У табл. 6 наведена оптимальна структура палива для 6-ти основних ТЕС, які споживають енергетичне вугілля марок А і П. Це є результатом розв’язку задачі (2)–(5), що задовольняє потреби цих ТЕС як за обсягами умовного палива, так і за його калорійністю відповідно до проектних характеристик електростанцій (табл. 7). Виняток становить лише калорійність вугільної продукції в оптимальній структурі палива для

Криворізької ТЕС, яка споживає пісне вугілля – середньозважене значення питомої теплоти згорання компонентів вугільної продукції марки П за статистичними даними значно нижче від проектних потреб Криворізької ТЕС. Тому практично для отримання розв’язку поставленої задачі обмеження (5) для цієї ТЕС було знижено до рівня 5100 ккал/кг. Нижня межа калорійності (3) обмежена величиною $\delta^* = 0,9$.

Таблиця 6 – Оптимальна структура палива для 6-ти основних ТЕС, які споживають енергетичне вугілля марок А і П

Назва ТЕС	Оптимальний варіант				
	Обсяги		Зола, %	Теплота, ккал/кг	Вартість, млн грн
	тис. т н.п.	тис. т у.п.			
Придніпровська	2612	2200	19,32	5895	2087,377
Слов’янська	1001	800	22,49	5597	618,983
Старобешівська	1871	1600	19,22	5985	1436,150
Трипільська	1343	1100	21,00	5732	928,836
Зміївська	2317	2000	17,29	6042	2014,353
Криворізька	3297	2400	29,46	5096	804,657
Луганська	1282	1000	24,58	5462	782,862
Разом	13722,49	11100,0	22,00	5685,27	8673,22

Таблиця 7 – Проектні характеристики електростанцій

Назва ТЕС	Потреба			Ознака допустимих варіантів потреб вугільної продукції за марками				
	Обсяги, тис. т у.п.	Теплота, ккал/кг		Ае	Ге	Пе	ДГе	Де
		min	max					
Придніпровська	2200	5895	5955	+				
Слов'янська	800	5544	5600	+		+		
Старобешівська	1600	5950	6010	+				
Трипільська	1100	5732	5790	+				
Зміївська	2000	6039	6100	+		+		
Криворізька	2400	5049	5100			+		
Луганська	1000	5445	5500	+				
	11100							

Як постачальники, в задачі розглядаються лише ті підприємства, які видобувають вугілля відповідних марок, тобто 10 структурних підрозділів, які об'єднують 34 вуглевидобувних підприємства і видобувають антрацитове і пісне вугілля (табл.8). Для оптимізації структури вугільної продукції для ТЕС, що споживають вугілля інших енергетичних марок, достатньо в програмі, що реалізує розглянутий алгоритм, замінити назви структурних підрозділів на підрозділи, які видобувають вугілля відповідних марок. Всі обчислювальні операції реалізовані в структурі програмно-інформаційного комплексу (ПК), що дозволяє в повній мірі використати наявну в ній базу статистичних даних у галузі вуглевидобувної і вуглепереробної промисловості України.

Важливою особливістю розглянутої моделі є те, що цільовою функцією в ній може розглядатись не лише загальна вартість вугільної продукції (2), а і екстремальні значення середньозважених величин зольності або питомої теплоти згорання вугільної продукції, тобто:

$$S = \frac{\sum_{k=1}^G A^k x^k}{\sum_{k=1}^G x^k} \rightarrow \min (\max), \quad (2')$$

або

$$S = \frac{\sum_{k=1}^G q^k x^k}{\sum_{k=1}^G x^k} \rightarrow \min (\max), \quad (2'')$$

причому алгоритм і програмні засоби в цьому випадку не потребують жодних змін. Це забезпечує отримання багатоваріантних результатів розрахунків і проведення глибокого аналізу отриманої структури вугільної продукції для ТЕС України залежно від вибраних критеріїв оптимальності.

ВИСНОВКИ

Проведено апробацію розробленої математичної моделі оптимізації забезпечення ТЕС вугільною продукцією із заданими теплофізичними властивостями та мінімальною ціною. На основі запропонованої моделі отримано оптимальну структуру забезпечення паливом 6-ти ТЕС антрацитової групи, що задовольняє як за обсягами умовного палива, так і за його калорійністю відповідно до проектних характеристик електростанцій. Виняток становить лише калорійність вугільної продукції в оптимальній структурі палива для Криворізької ТЕС, яка споживає пісне вугілля. Оскільки середньозважене значення питомої теплоти згорання компонентів вугільної продукції марки П за статистичними даними значно нижче від проектних потреб Криворізької ТЕС, тому для отримання розв'язку обмеження (5) для цієї ТЕС було знижено до рівня 5100 ккал/кг.

Таблиця 8 – Підприємства, що видобувають антрацитове та пісне вугілля

№ з/п	Структурний підрозділ	Шахта	Марка вугілля
1	ДП «Макіїввугілля»	ш. Холодна Балка	Пе
2	ДП «Орджонікідзевугілля»	ш. Булавінська	Ае
		ш. Ольховатська	Ае
		ш. Вуглегірська	Пе
		ш. Єнакієвська	Пе
		ш. Полтавська	Пе
3	ДП «Горезантрацит»	Прогрес	Ае
		- ш/у ім.Лутугіна	Ае
		ш. Волинська	Ае
4	Самостійні шахти, Донецька область	- Ударник	Ае
		- Зоря	Ае
		ОАО «ш. Комсомолец Донбасу»	Ае
5	ДХК Жовтеньвугілля	ООО «ш. Рассвет-1»	Пе
		ЗАО «ш. Жданівська»	Пе
6	Самостійні шахти, Луганська область	ш. Никанор-Нова	Пе
7	ДП «Донбасантрацит»	ш. Краснолуцька	Ае
		ш. ім. газети «Известия»	Ае
		ш. Княгинівська	Ае
		ш. Міусинська	Ае
		ш. Хрустальська	Ае
		ш. Краснокутська	Ае
8	ДП «Антрацит»	ш. Партизанська	Ае
		ш. Крепінська	Ае
		ш. Комсомольська	Ае
9	ДП «Ровенькиантрацит»	ш. № 2 ім. Ф.Е. Дзержинського	Ае
		ш. № 81 Київська	Ае
		ш. ім. М.В. Фрунзе	Ае
		ш. ім. В.В. Вахрушева	Ае
		ш. ім. Космонавтів	Ае
10	ДП «Свердловантрацит»	ш. Довжанська-Капітальна	Ае
		ш. ім. Я.М. Свердлова	Ае
		ш. Центросілка	Ае
		ш. Харківська	Ае
		ш. Червоний партизан	Ае

1. Вугілля кам'яне та антрацит для пило-видного спалювання на теплових електростанціях. Технічні умови: ДСТУ 4083-2002 [Чинний від 2002-09-01]. – К.: Держстандарт України, 2002. – 10 с.
2. Закон України від 01.06.2010 р. № 2289-VI «Про здійснення державних закупівель». – Режим доступу: <http://www.nibu.factor.ua/ukr/info/goszakup/Z2289/>.

Надійшла до редколегії: 19.11.2013

Рецензент

*Зав. відділу прогнозування розвитку та управління функціонуванням електроенергетики ІЗЕ НАН України, д-р техн. наук, ст. наук. співр.
С.В. Дубовський*