

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

УДК 004.942:622.68

О.В. СТОГНІЙ, канд. техн. наук, В.М. МАКАРОВ, М.І. КАПЛІН, Т.Р. БІЛАН,  
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ МАРКИ ВУГІЛЛЯ ТЕЦ ПРИ ПЕРЕВЕДЕННІ ЇХ КОТЛОАГРЕГАТІВ НА ПИЛОВУГІЛЬНЕ СПАЛЮВАННЯ

*Вибір оптимальної марки вугілля для ТЕЦ під час переведення їх котлоагрегатів на пиловугільне спалювання здійснюється за допомогою формулювання задачі багатокритеріальної оптимізації для системи котел–вугільне паливо. Запропоновано сукупність частинних критеріїв оптимальності для оцінки ефективності функціонування ТЕЦ при спалюванні вугілля в котлі. Обґрунтовано застосування принципу крайнього песимізму для визначення узагальненого критерію оптимальності системи. Розглянуто приклад застосування розробленої моделі до вибору оптимальної марки палива при переведенні на спалювання вугілля котла БКЗ-420-140НГМ. Для оцінки ефективності паливозабезпечення ТЕЦ використано вісім технологічних, теплотехнічних та фізико-хімічних, цінкових показників вугільної продукції власного виробництва та шість – для імпортованого вугілля.*

*К л ю ч о в і с л о в а:* енергетичне вугілля, марка, ТЕЦ, штиб, багатокритеріальна оптимізація.

Оскільки напрацювання енергетичних котлів більшості ТЕЦ в Україні перевищує парковий ресурс – 200 тис. годин, необхідною умовою їх подальшої експлуатації є глибока реконструкція з подовженням ресурсу або заміна.

В умовах прогнозованого підвищення цін на природний газ і мазут, одним з найбільш доцільних варіантів глибокої реконструкції котлів ТЕЦ є їх поетапне переведення на спалювання вугілля. Незважаючи на те, що цей варіант реконструкції вже застосовується на багатьох діючих ТЕЦ, необхідним елементом проектів такої реконструкції є вибір оптимального виду вугільного палива, що має здійснюватись на основі всебічного аналізу подальшої тривалої роботи ТЕЦ на вибраному паливі. Зокрема, мають бути обов'язково враховані можливості паливних баз держави в забезпе-

ченні нових споживачів належними типами вугільної продукції, обґрунтовані як необхідність, так і обсяги її імпортування. Тому, метою дослідження є розробка основних методичних засад та побудова математичної моделі визначення оптимального виду вугільної продукції для паливозабезпечення котлоагрегатів ТЕЦ при переведенні їх зі спалювання газу-мазуту на спалювання пиловугільного палива.

**Вибір типу вугільної продукції для спалювання у котлі ТЕЦ.** В техніко-економічних задачах вибору найкращого рішення, як правило, мають місце декілька критеріїв оптимальності. Задачу вибору деякого рішення з множини допустимих рішень із врахуванням декількох критеріїв оптимальності називають багатокритеріальною задачею оптимізації. Ці критерії можуть відображати оцінки різних властивостей об'єкта або процесу, стосовно яких приймається рішення.

Вибір марки вугілля для спалювання у котлі ТЕЦ є типовою задачею багатокритеріальної оптимізації. Це впливає як із умов існування множини проектних палив для котлоагрегатів кожного типу, так і наявних конкретних умов постачання вугільної продукції для їх роботи.

Сутність задачі векторної оптимізації полягає у відшуканні такого її допустимого рішення, яке в тому чи іншому сенсі максимізує (мінімізує) значення всіх цільових функцій. Існування рішення, що буквально максимізує всі цільові функції, є рідкісним винятком. Завдання векторної оптимізації в загальному випадку не має строго математичного рішення. Для отримання того чи іншого її рішення необхідно використовувати додаткову суб'єктивну інформацію фахівця в даній галузі, якого прийнято називати особою, що приймає рішення (ОПР). Це означає, що під час вирішення задачі різними фахівцями із залученням різних джерел інформації, швидше за все, будуть отримані різні відповіді.

Задачі векторної оптимізації прийнято розглядати в рамках теорії прийняття рішень, основною особливістю задач якої є наявність невизначеності. Ця невизначеність не може бути виключена за допомогою різних прийомів моделювання та об'єктивних розрахунків. У багатокритеріальних задачах невизначеність полягає в тому, що невідомо, яким критерієм віддати перевагу і в якій мірі. Для усунення цієї невизначеності необхідно сформулювати спеціальний принцип оптимальності, а також залучити додаткову суб'єктивну інформацію ОПР, засновану на її досвіді та інтуїції.

**Основні визначення теорії векторної оптимізації.** Принцип Парето [1]. Нехай  $x'$ ,  $x''$  – допустимі рішення задачі векторної оптимізації. Кажуть, що віддається більша перевага рішенню  $x'$  в порівнянні з  $x''$ , якщо воно не гірше  $x''$  по всіх розглянутих критеріях, причому серед всіх критеріїв існує хоча б один критерій з номером  $i_0$ , для якого рішення  $x'$  краще, ніж  $x''$ . Деяке рішення  $x^*$  задачі називається ефективним рішенням даної задачі, якщо для нього не існує більш бажаних рішень. Інакше можна сказати, що ефективним рішенням називається таке рішення  $x^*$ , яке не можна поліпшити за рахунок якогось з критеріїв, не погіршивши при цьому значення інших критеріїв. Множина ефективних рішень називається множиною Парето. Множина Парето є підмно-

жиною множини допустимих рішень. Вектор значень критеріїв, обчислених для ефективного рішення, називається ефективною оцінкою. Сукупність всіх ефективних оцінок називається множиною ефективних оцінок. Множина ефективних оцінок є підмножиною образу множини допустимих рішень в просторі критеріїв. Тобто можна сказати, що множині Парето, яка належить множині допустимих рішень, співставляється множина ефективних оцінок. Рішення називається слабоефективним рішенням, якщо воно не може бути покращене одночасно за всіма критеріями. Субоптимальне рішення – оптимальне рішення багатокритеріальної задачі, знайдене за яким-небудь одним критерієм без врахування інших.

**Нормалізація критеріїв.** Критеріальні функції мають різну розмірність і їх необхідно звести до безрозмірного вигляду за допомогою якого-небудь перетворення. Це перетворення має задовольняти принаймні такі умови:

- мати спільний початок відліку і один порядок зміни значень на всій множині допустимих рішень;

- бути монотонним перетворенням, тобто зберігати відношення переваги на множині  $D$ , тобто не змінювати множину Парето;

- враховувати необхідність мінімізації відхилення від оптимальних значень за кожним з частинних критеріїв.

Недолік принципу Парето в тому, що він пропонує в ролі рішення деяку область векторного простору критеріїв, що містить у загальному випадку нескінченну множину рішень. Для того щоб вибрати з цієї множини єдине рішення, потрібні додаткові відомості, припущення, домовленості про те, що вважати найкращим рішенням. Ці припущення, додаткові відомості, домовленості формалізуються узагальненим критерієм оптимальності.

**Узагальнені критерії прийняття рішень в умовах невизначеності.** Узагальнений критерій оптимальності – це функція, що виражає переваги особи, що приймає рішення, і що визначає правило, за яким вибирається прийнятний або оптимальний варіант рішення.

Частинні критерії обчислюються по черзі, причому після їх визначення серед декількох варіантів доводиться довільним чином виділяти деяке остаточне рішення, що дозволяє краще врахувати усі внутрішні зв'язки проблеми прийняття рішень, а також ослабити вплив суб'єктивного фактора.

**Критерій крайнього песимізму (критерій Вальда).** Застосування критерію Вальда є доцільним, якщо ситуація, в якій приймається рішення, така:

– про можливість появи станів системи  $P_j$  нічого не відомо;

– існує декілька або безліч різних станів системи  $P_j$ . Відомо тільки, що вони належать множині непокрашуваних станів – множині Парето;

– рішення приймається тільки один раз, коли необхідно виключити щонайменшу можливість ризику, тобто є актом надзвичайної відповідальності.

Критерій Вальда є критерієм крайнього песимізму, оскільки ОПР вважає найвищим пріоритетом своєї діяльності уникнення негативних наслідків за всіма частинними критеріями, які можуть повністю зупинити функціонування системи. Це критерій гарантованого результату.

Таким чином, розв’язання задачі векторної оптимізації щодо вибору типу (марки та фізико-хімічних характеристик) вугільної продукції для спалювання у заданому котлі ТЕЦ, тобто пари «котел–марка вугілля» передбачає:

1. Розробку переліку частинних критеріїв критеріальних функцій, що описують різні/всі сторони (аспекти) функціонування енергетичної установки ТЕЦ на її проектному паливі, тобто пари «котел–марка вугілля». Частинним критерієм оптимальності в загальному випадку для цієї задачі є монотонно зростаюча/спадна функція двох змінних – типу котла та марки вугілля:

$$G_i = G_i(m) \equiv G_i^m, \quad i = \overline{1, N_k}, \quad m = \overline{1, N_m}. \quad (1)$$

2. Приведення критеріїв до співставного – нормалізованого вигляду здійснюється за допомогою співвідношень:

$$g_i^m = \frac{G_i^m - G_i^{\min}}{G_i^{\max} - G_i^{\min}}, \quad i = \overline{1, N_k} \quad (2)$$

– для зростаючих;

$$g_i^m = 1 - \frac{G_i^m - G_i^{\min}}{G_i^{\max} - G_i^{\min}} \quad (3)$$

– для спадних.

3. Впорядкування та ранжування критеріїв згідно з уявленнями ОПР щодо ступеня їх впливу на загальну корисність системи

«котел–марка вугілля». Це здійснюється шляхом обґрунтування принципу оптимальності задачі – вибору способу відображення множини критеріальних функцій у множину дійсних чисел узагальненої корисності системи, тобто:

$$m_{opt} = m \in M : \forall k = 1, N_m : R^{m_{opt}} > R^k, \quad (4)$$

де  $R^k$  – значення узагальненого критерію оптимальності.

У даній роботі розглядаються такі параметри вугільної продукції, які можуть давати критеріальну оцінку системі за різними властивостями або з різних сторін її функціонування:

1. Коефіцієнт доступності, %.
2. Питома теплота згорання, ккал/кг.
3. Зольність, %.
4. Вихід летких речовин, %.
5. Вміст сірки, %.
6. Ціна, грн/т.
7. Волога, %.

Коефіцієнт доступності визначається як питома частка вугільної продукції даного типу у загальному обсязі переробленого вугілля.

Для застосування критерію Вальда необхідно сформуванати множину варіантів прийняття рішень, яка, беручи до уваги векторний характер критеріїв задачі багатокритеріальної оптимізації, являє собою матрицю  $\{V_{ij}\}$  значень частинного критерію  $j$  у варіанті  $i$ . Тоді вибір за критерієм Вальда формально записується у вигляді

$$m_{opt} = \max_i \{M_i\}_{i=1, N_m} = \max_i \left( \min_j \{V_{ij}\} \right),$$

де  $M_i$  – оцінка варіанта  $i$  типу вугільної продукції за мінімальним значенням частинних критеріїв у матриці  $\{V_{ij}\}$ ;

$V_{ij}|_{i=1, N_m; j=1, N_k}$  – матриця критеріаль-

них оцінок  $N_m$  типів вугільної продукції за  $N_k$  критеріями.

Матриця критеріальних оцінок типів вугільної продукції, яка може розглядатися як альтернативні варіанти палива для котлів ТЕЦ, формується з таблиці вихідних даних вказаних вище параметрів вугілля [3], поданих у табл. 1.

Елементами матриці критеріальних оцінок є нормалізовані частинні критерії за згаданими параметрами. Приведення критеріїв до норма-

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку критеріїв вибору оптимальної марки вугілля для котлоагрегату ТЕЦ

Марка	Назва продукту	Фракція, мм		Зольність, $A^d, \%$	Сірка, $S_t^d, \%$	Волога, $W, \%$	Теплота згорання, $Q_i$ , ккал/кг	Вихід легких, $V_{daf}, \%$		Ціна, грн	Випуск, тис. т	Коеф. доступності
		мін.	макс.					мін.	макс.			
Д	Концентрат	0	100	23,5	1,8	12,69	5500	32	40	800	131,6	0,00752
		13	100	8,6	2,5	12,8	6500	35	40	1000	59,8	0,00342
ДГ	Відсів	0	25	36,5	2	12,8	4700	30	40	550	331,2	0,01892
		0	13	30	3	13	5000	30	40	600	223	0,01274
	Концентрат	13	50	8,4	3,5	9,2	6500	30	40	1200	20	0,00114
	Відсів	0	13	23,3	3,7	10,3	5100	30	40	700	173,8	0,00993
Г	Концентрат	13	100	8,2	3,8	9,5	6500	30	40	900	11,3	0,00065
		0	100	22,9	3,3	9,7	5100	35	42	650	176,3	0,01007
П	ДГСШ	0	13	26	3,2	11	5000	30	40	700	23,1	0,00132
		0	13	31	2,8	9,7	4700	30	40	600	32,9	0,00188
А	Концентрат	0	100	24	2,9	10,5	5600	30	40	880	2222,9	0,12702
		13	100	8,4	4,1	9,9	6500	30	40	900	74,5	0,00426
А	Відсів	0	13	25,2	4	9,9	5100	30	40	600	786,9	0,04496
		0	13	26	4,4	9,2	5000	30	40	550	408,3	0,02333
А	Концентрат	0	100	20,3	1,5	8,3	5800	14	26	950	924,5	0,05283
		50	100	6,6	1,6	4,4	7200	3	5	950	153,4	0,00877
А	АКО	25	100	7,2	1,3	4,4	7200	3,2	5	950	594,7	0,03398
		25	50	7	1,5	4,5	7200	3,2	5	950	312,1	0,01783
А	АМ	13	25	9,1	1,5	4,9	7000	3,2	5	850	1263,8	0,07221
		6	13	11,2	1,4	5,7	6800	3,3	5	750	1791,6	0,10237
А	АШ зб	0	6	19,9	1,4	7,7	5800	4	5	500	4027,8	0,23015
		0	6	28	1,7	8,1	5000	4,5	5	450	3738,7	0,21363
А	Промпродукт	0	6	37	1	9	4500	5	5	500	18,8	0,00107

лізованого вигляду здійснюється за формулою (2) для зростаючих частинних критеріїв і формулою (3) для спадних. Зокрема, частинний критерій «вихід летких речовин» містить як зростаючі, так і спадні частинні критерії оптимальності. Це пояснюється тим, що виділення летких речовин при спалюванні вугілля газової групи є позитивним фактором процесу. При спалюванні вугілля антрацитової групи у котлах відповідного типу цей показник є негативною характеристикою.

Значення критеріальних оцінок варіантів типів вугільної продукції для спалювання на ТЕЦ, розрахованих за критерієм крайнього песимізму (критерієм Вальда), вміщено у стовпчик «Мінімальне значення», див. табл. 2. Як видно з цієї таблиці, оптимальним паливом для ТЕЦ є антрацитовий штиб збагачений (АШ зб) із значенням критеріальної оцінки 0,4815, забезпеченої параметром «питома теплота згорання». Далі у спадному порядку розміщуються АС, АМ, концентрат Г, П з критеріальними оцінками 0,4432; 0,3118; 0,2907 та 0,2274 відповідно.

**Вибір типу імпортованої вугільної продукції для спалювання у котлі ТЕЦ.** При оцінюванні критеріїв вибору палива для кінцевого споживача необхідно брати до уваги всі ланки процесу його постачання в необхідній кількості та з наперед заданими якісними характеристиками, що визначаються особливостями технологічного процесу спалювання. Зокрема, пилоувільні котли ТЕС та ТЕЦ вимагають використання у ролі палива вугілля з чітко обмеженим вмістом сірки. За технологічними нормами значення цього показника має бути близько 0,5%. Натомість, розрахований у попередньому розділі оптимальний варіант вуглезабезпечення антрацитовим штибом з критерієм «Питома теплота згорання» 0,4815, як видно з табл. 1, має вміст сірки 1,4%. Крім того, як показано в табл. 1, всі типи вугільної продукції власного видобутку мають досить високий відсоток вмісту сірки, що коливається в межах від 1,0 до 4,4%. Разом з тим, видалення сірки з продуктів згорання вугілля (сіркоочистка) є досить дорогим технологічним процесом, вартість якого оцінюється близько 300 дол. США за 1 кВт встановленої потужності ТЕЦ. Тому для повного аналізу оптимальності паливозабезпечення необхідно дослідити можливість постачання на станцію імпортованого вугілля із значно нижчим рівнем вмісту сірки. Вихідні дані щодо

наявних (доступних) якісних характеристик імпортованого вугілля, а також його ціну наведено у табл. 3. Результати розрахунку частинних критеріїв оптимальності та застосування узагальненого критерію крайнього песимізму вміщено до табл. 4.

Як бачимо, за цим критерієм, серед імпортованих типів вугільної продукції з низькою, або технологічно прийнятною (штатною) сірчистістю, перевага надається вугіллю марки П Кузнецького басейну, із значенням мінімальної критеріальної оцінки 0,750, за показником «Волога».

Коефіцієнт здатності до розмелювання характеризує здатність палива до подрібнення та питомі витрати електричної енергії на розмелювання та пилоприготування. На його основі здійснюється вибір типу, конструкції та продуктивності необхідних млинів, сепараторів, живильників палива та іншого устаткування системи пилоприготування та подачі. Незважаючи на значно нижчий коефіцієнт здатності до розмелювання, АШ надходить на ТЕЦ з розміром частинок до 6 мм на відміну від марки П, що надходить у рядовому вигляді з розміром частинок до 300 мм, що потребує додаткових витрат на подрібнення. Тому необхідні додаткові дослідження стосовно визначення питомих витрат на тракт пилопідготовки та подачі палива.

Оскільки температурні характеристики золи за способом визначення є одним з самих об'єктивних показників «шлакуючих» і «рідкоплавких» станів золи і визначають вибір способу і пристроїв шлаковидалення, а також конструкцію топок котлів, даний якісний показник має особливо велике значення для котлоагрегатів з рідким шлаковидаленням. Взаємозамінність українського антрацитового штибу та російського пісного вугілля дозволяє уникнути заміни системи шлаковидалення та конструкцій топок котла. У випадку спалювання вугілля з низьким вмістом сірки (0,5%) марок Д та Г Кузнецького басейну, що є третім та четвертим за рейтингом у другій оптимізаційній моделі імпортованої вугільної продукції, необхідна відмінна від попередньої (для марок АШ та П) конструкція топки котла та системи шлаковидалення.

Вміст сірки визначає температуру вихідних газів за повітряпідігрівачами котлів і тим самим конструкцію котла, оскільки із збільшенням вмісту сірки зростає температура початку сір-

Таблиця 2 – Результати розрахунків критеріїв вибору марки вугілля та застосування принципу «максимін»

Марка	Назва продукту	Фракція		Зольність, A <sup>d</sup> , %	Сірка, S <sup>d</sup> , %	Волога, W, %	Теплота згорання, Q <sub>г</sub> , ккал/кг	Вихід летких, V <sub>лет</sub> , %		Зольність, A <sup>d</sup> , %	Коеф. доступності	Мінімальне значення
		мін.	макс.					мін.	макс.			
Д	Концентрат	0,0000	1,0000	0,4441	0,7647	0,0360	0,3704	0,9063	0,9459	0,5333	0,0299	0,0299
		0,2600	1,0000	0,9342	0,5588	0,0233	0,7407	1,0000	0,9459	0,2667	0,0121	0,0121
		0,0000	0,2021	0,0164	0,7059	0,0233	0,0741	0,8438	0,9459	0,8667	0,0796	0,0164
		0,0000	0,0745	0,2303	0,4118	0,0000	0,1852	0,8438	0,9459	0,8000	0,0527	0,0000
ДГ	Концентрат	0,2600	0,4681	0,9408	0,2647	0,4419	0,7407	0,8438	0,9459	0,0000	0,0021	0,0000
		0,0000	0,0745	0,4507	0,2059	0,3140	0,2222	0,8438	0,9459	0,6667	0,0404	0,0404
		0,2600	1,0000	0,9474	0,1765	0,4070	0,7407	0,8438	0,9459	0,4000	0,0000	0,0000
		0,0000	1,0000	0,4638	0,3235	0,3837	0,2222	1,0000	1,0000	0,7333	0,0410	0,0410
Г	ДГСШ	0,0000	0,0745	0,3618	0,3529	0,2326	0,1852	0,8438	0,9459	0,6667	0,0029	0,0029
		0,0000	0,0745	0,1974	0,4706	0,3837	0,0741	0,8438	0,9459	0,8000	0,0054	0,0054
		0,0000	1,0000	0,4276	0,4412	0,2907	0,4074	0,8438	0,9459	0,4267	0,5506	0,2907
		0,2600	1,0000	0,9408	0,0882	0,3605	0,7407	0,8438	0,9459	0,4000	0,0157	0,0157
П	Відсів	0,0000	0,0745	0,3618	0,0000	0,4419	0,1852	0,8438	0,9459	0,8667	0,0988	0,0000
		0,0000	1,0000	0,5493	0,8529	0,5465	0,4815	0,6563	0,4324	0,3333	0,2274	0,2274
		1,0000	1,0000	1,0000	0,8235	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	0,0354	0,0354
		0,5000	1,0000	0,9803	0,9118	1,0000	1,0000	0,9938	1,0000	0,3333	0,1452	0,1452
А	АО	0,5000	0,4681	0,9868	0,8529	0,9884	1,0000	0,9938	1,0000	0,3333	0,0749	0,0749
		0,2600	0,2021	0,9178	0,8529	0,9419	0,9259	0,9938	1,0000	0,4667	0,3118	0,3118
		0,1200	0,0745	0,8487	0,8824	0,8488	0,8519	0,9906	1,0000	0,6000	0,4432	0,4432
		0,0000	0,0000	0,5625	0,8824	0,6163	0,4815	0,9688	1,0000	0,9333	1,0000	0,4815
	АШ відсів	0,0000	0,0000	0,2961	0,7941	0,5698	0,1852	0,9531	1,0000	1,0000	0,9280	0,1852
		0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,4651	0,0000	0,9375	1,0000	0,9333	0,0018	0,0000

\* – виділені курсивом параметри вугільної продукції не використовувались як критерії оптимальності;

\*\* – підкресленням виділено спадні критерії.

Максимін 0,4815

**Таблиця 3 – Вихідні дані для розрахунку критеріїв вибору оптимальної марки імпортованої вугільної продукції для коглюаграту ТЕЦ**

Марка	Назва продукту	Зольність, $A^d$ , %	Сірка, $S_t^d$ , %	Волога, $W$ , %	Теплота згорання, $Q_i$ , ккал/кг	Вихід легких, $V_{daf}$ , %		Ціна імпортованого вугілля, дол. США
						мін.	макс.	
КСН (Казахстан)	Р	38	0,7	5	4360	24	40	59*
Д, (Казахстан)	Р	5	0,5	14,5	5100	40	47	83
Д, Кузб.	ДР	18	0,5	10	5600	40	43	60
СС, Кузб.	ССР	15	0,5	6	6000	40	40	64
Г, Кузб.	ГР	15	0,5	11	6000	40	40	64
Г, Кузб.	ГР	22	0,5	8	5500	30	40	60
ПС, Кузб.	ПСР	22	0,5	8	5800	15	22	70
П, Кузб.	ПОМСШ	12	0,4	8	6400	13	15	64
П, Кузб.	ПР	14	0,5	9	6000	12	18	64
Енергетичне вугілля, Австралія (в МТП «Південний» без проміжної перевалки у Керченському МТП)		14	1	15	6700	30	40	129**
Енергетичне вугілля, Австралія (в МТП України з проміжною перевалкою в Керченському МТП)		14	1	15	6700	30	40	135
Енергетичне вугілля, Південна Африка (ПАР) (в МТП «Південний» без проміжної перевалки у Керченському МТП)		14	1	15	6000	30	40	129
Енергетичне вугілля, Південна Африка (ПАР) (в МТП України з проміжною перевалкою в Керченському МТП)		14	1	15	6000	30	40	135
Енергетичне вугілля, Колумбія (в МТП «Південний» без проміжної перевалки у Керченському МТП)		9	0,8	15	6450	30	40	129
Енергетичне вугілля, Колумбія (в МТП України з проміжною перевалкою в Керченському МТП)		9	0,8	15	6450	30	40	135
Енергетичне вугілля, Індонезія (в МТП «Південний» без проміжної перевалки у Керченському МТП)		8	0,75	17	6300	42	44	129
Енергетичне вугілля, Індонезія (в МТП України з проміжною перевалкою в Керченському МТП)		9	0,8	15	6450	30	40	135

\* – ціна на імпортоване вугілля на умовах DAP (залізнична станція Роток), що перевозиться залізничним транспортом з Росії та Казахстану, розрахована як сума 1) ціни виробника, 2) тарифів на залізничні перевезення країн, через які проходить шлях перевезення, а також 3) ПДВ і 4) митного збору;

\*\* – ціна на імпортоване вугілля на умовах DAP (залізнична станція Роток), що перевозиться морським транспортом, розрахована як сума 1) CIF-ціни на вугілля в Україні, 2) плати за перевалку вугілля в портах, 3) тарифів на залізничні перевезення в Україні, 4) ПДВ і 5) митного збору.

Таблиця 4 – Результати розрахунків критеріїв вибору марки імпортованого вугілля та застосування принципу крайнього песимізму

Марка	Назва продукту	Зольність, $A^d$ , %	Сірка, $S^d$ , %	Волога, $W$ , %	Теплота згорання, $Q_i$ , ккал/кг	Вихід летких, $V_{daf}$ , %		Ціна	Мінімальне значення
						мін.	макс.		
КСН (Казахстан)	Р	0,0000	0,5000	1,0000	0,0000	0,4000	0,7813	1,0000	0,0000
Д, (Казахстан)	Р	1,0000	0,8333	0,2083	0,3162	0,9333	1,0000	0,6842	0,2083
Д, Кузб.	ДР	0,6061	0,8333	0,5833	0,5299	0,9333	0,8750	0,8824	0,5299
СС, Кузб.	ССР	0,6970	0,8333	0,9167	0,7009	0,9333	0,7813	0,8353	0,6970
Г, Кузб.	ГР	0,6970	0,8333	0,5000	0,7009	0,9333	0,7813	0,8353	0,5000
Г, Кузб.	ГР	0,4848	0,8333	0,7500	0,4872	0,6000	0,7813	0,8824	0,4848
ПС, Кузб.	ПСР	0,4848	0,8333	0,7500	0,6154	0,9000	0,7813	0,7647	0,4848
П, Кузб.	ПОМСШ	0,7879	1,0000	0,7500	0,8718	0,9667	1,0000	0,8353	0,7500
П, Кузб.	ПР	0,7273	0,8333	0,6667	0,7009	1,0000	0,9063	0,8353	0,6667
Енергетичне вугілля, Австралія (в МТП «Південний» без проміжної перевалки у Керченському МТП)		0,7273	0,0000	0,1667	1,0000	0,4000	0,2188	0,0706	0,0000
Енергетичне вугілля, Австралія (в МТП України з проміжною перевалкою в Керченському МТП)		0,7273	0,0000	0,1667	1,0000	0,4000	0,2188	0,0000	0,0000
Енергетичне вугілля, Південна Африка (ПАР) (в МТП «Південний» без проміжної перевалки у Керченському МТП)		0,7273	0,0000	0,1667	0,7009	0,4000	0,2188	0,0706	0,0000
Енергетичне вугілля, Південна Африка (ПАР) (в МТП України з проміжною перевалкою в Керченському МТП)		0,7273	0,0000	0,1667	0,7009	0,4000	0,2188	0,0000	0,0000
Енергетичне вугілля, Колумбія (в МТП «Південний» без проміжної перевалки у Керченському МТП)		0,8788	0,3333	0,1667	0,8932	0,4000	0,2188	0,0706	0,0706
Енергетичне вугілля, Колумбія (в МТП України з проміжною перевалкою в Керченському МТП)		0,8788	0,3333	0,1667	0,8932	0,4000	0,2188	0,0000	0,0000
Енергетичне вугілля, Індонезія (в МТП «Південний» без проміжної перевалки у Керченському МТП)		0,9091	0,4167	0,0000	0,8291	0,0000	0,0938	0,0706	0,0000
Енергетичне вугілля, Індонезія (в МТП України з проміжною перевалкою в Керченському МТП)		0,8788	0,3333	0,1667	0,8932	0,4000	0,2188	0,0000	0,0000

Максимін 0,7500



кокислотної корозії металевих елементів повітряпідігрівачів. З метою уникнення сіркокислотної корозії необхідно підвищувати температуру вихідних газів, що істотно знижує ККД котла. На відміну від імпортованого вугілля марки П з вмістом сірки на рівні 0,4%, спалювання вітчизняного вугілля марки АШ ( $S_f^d = 1,4\%$ ) потребує додаткових капітальних витрат, пов'язаних з сіркоочисним обладнанням (близько 300 дол. США/кВт встановленої потужності).

Тому конкурентна перевага за показником «ціна» українського антрацитового штибу компенсується більшим вмістом сірки та нижчим коефіцієнтом здатності до розмелювання порівняно з цими показниками для пісного вугілля Кузбасу. Результат конкуренції вказаних показників потребує додаткового вивчення для конкретних родовищ та постачальників антрацитового штибу та пісного вугілля.

Аналізуючи фізико-хімічні та теплотехнічні властивості індонезійського вугілля, бачимо, що його зольність (8%) є досить низькою величиною, і наближається до відповідного показника антрацитів власного видобутку. Вміст сірки (0,75%) перевищує цей показник у вугілля з Казахстану та Російської Федерації та значно нижчий порівняно з вітчизняними марками вугілля. Лише вітчизняне пісне вугілля має таку саму сірчистість. Вологість індонезійського вугілля (16%) значно вища, ніж у всіх марок вугілля власного видобутку та такого, що може бути імпортоване з близького зарубіжжя. Теплота згорання дорівнює 6300 ккал/кг і дещо поступається антрацитам власного видобутку (6800–7200 ккал/кг), але перевищує теплоту згорання антрацитового штибу (5800 ккал/кг). У порівнянні з вугіллями Кузнецького басейну лише пісне вугілля (ПОМСШ) має вищу теплоту згорання (6400 ккал/кг). Вихід летких речовин (42%) перевищує середнє значення цього показника у всіх марок вугілля, що розглядалися в роботі.

Таким чином, за більшістю проаналізованих показників, індонезійське вугілля можна віднести до бітумінозного вугілля, що наближається за своїми параметрами до вугіль газової групи. За цими показниками індонезійське вугілля переважає всі марки вугілля власного видобутку, вугілля Кузнецького басейну та казахстанське вугілля. Незначним недоліком можна вказати дещо нижчу здатність до розмелювання порівняно з вугіллям газової групи.

## ВИСНОВКИ

1. Коефіцієнт корисної дії котлоагрегату ТЕЦ визначається як його типом, так і ефективністю спалювання окремого виду вугільної продукції. Вид вугільної продукції характеризується маркою вугілля, ступенем збагачення (концентрат, промпродукт, відсів), фракцією та фізико-хімічними і теплотехнічними властивостями. Частинні критерії оптимальності, побудовані на основі цих параметрів, використані в роботі для визначення оптимальної марки вугільної продукції як палива ТЕЦ.
2. Узагальненим критерієм оптимальності видів вугільної продукції вибрано принцип максимального песимізму. Оптимальним вважається вид вугільної продукції, для якого мінімальна оцінка за одним із частинних критеріїв, є максимальною у переліку цих видів. Таким чином досягається рівноправність впливу окремих критеріїв на результат вибору.
3. На основі аналізу та оцінки ступеня впливу основних параметрів енергетичного вугілля на показники роботи ТЕЦ для математичного моделювання вибрано фізико-хімічні, теплотехнічні та економічні характеристики – зольність, вміст сірки, волога, теплота згорання, ціна продукції та коефіцієнт доступності, який визначено в цій роботі як частка виду вугільної продукції в сукупному обсязі вітчизняного товарного вугілля.
4. У результаті оцінки за вибраними критеріями 23-х видів вугільної продукції вітчизняного виробництва оптимальним виявився антрацитовий збагачений штиб Донбасу (АШ зб. у табл. 2), а серед імпортованої – кузнецьке вугілля марки П (Російська Федерація). Конкурентною перевагою антрацитових штибів є їх висока доступність та низький вміст сірки серед української вугільної продукції. Показником з мінімальним значенням, за яким і здійснено вибір АШ, є теплота згорання. Конкурентною перевагою кузнецького пісного вугілля, порівняно з іншими видами імпортованої вугільної продукції, є низький вміст сірки.
5. Для більш точного порівняння конкурентних можливостей вітчизняного вугілля марки АШ та імпортованого марки П необхідно додатково розглядати ще дві принципово

важливі технологічні ланки: систему пило-підготовки та подачі палива, а також очищення димових газів та утилізації відходів, зокрема оксидів сірки. У зв'язку з цим при остаточному розгляді пріоритетних марок вугілля АШ Донецького вугільного басейну та марки П Кузбасу слід, крім кінцевої ціни вугілля на ТЕЦ, орієнтуватись на коефіцієнт здатності до розмелювання, температуру плавкості золи та вміст сірки.

7. У випадку прийняття рішення щодо постачання імпортного вугілля заслуговує додаткового аналізу вирішення проблеми, пов'язаної з обмеженнями пропускної здатності морських терміналів та залізничних магістралей, що контролюються економічно та політично потужними фінансово-промисловими групами України.

1. *Подиновский В.В.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. — М.: Наука, 1982. — 254 с.

2. *Повний С.М.* Довідник показників якості, обсягу видобутку вугілля та випуску продуктів збагачення у 2003 р. / С.М. Повний,

І.П. Курченко, В.Я. Довгий та ін. — Луганськ: Укрндівуглезбагачення, Держспоживстандарт України, 2003. — 46 с.

3. *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. — 8 с. — (Національні стандарти України).

4. *Commodity Price Forecast Update Released: September 10, 2012* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [http://sitere-sources.worldbank.org/INTPROSPECTS/Resources/334934-1304428586133/Price\\_Forecast.pdf](http://sitere-sources.worldbank.org/INTPROSPECTS/Resources/334934-1304428586133/Price_Forecast.pdf).

*Надійшла до редколегії 15.03.2013*

*Рецензент*

*Зав.відділу прогнозування розвитку та управління функціонуванням електроенергетики ІЗЕ НАН України, д-р техн. наук*

*С.В. Дубовський*