

В. П. ЯЦЕНКО, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України, Київ

ПРОГНОЗУВАННЯ СХИЛЬНОСТІ ВУГІЛЛЯ ДО ШЛАКУВАННЯ І ЗАБРУДНЕННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПОВЕРХОНЬ КОТЛА

Проаналізовано існуючі методи прогнозування схильності вугілля до утворення шлакуючих і забруднюючих відкладень на теплообмінних поверхнях котла. Виконані розрахунки прогнозних показників схильності вугілля до утворення відкладень при спалюванні різних марок вітчизняного і зарубіжного вугільного палива та їх сумішей.

Одна із серйозних проблем, що виникають при експлуатації пиловугільних котлоагрегатів ТЕС, пов'язана зі шлакуванням і забрудненням теплообмінних поверхонь (ТП). Відкладення шлаку і золи на поверхнях котла має місце навіть при спалюванні проектного палива у проектних режимах. При постачанні на ТЕС непроектного вугілля або при спалюванні його сумішей інтенсивність шлакування і забруднення ТП може підсилюватись. З огляду на це значний інтерес має прогнозування шлакуючих і забруднюючих властивостей вугільного палива.

Процеси шлакування і забруднення теплообмінних поверхонь залежать від технічних характеристик, складу вугілля і золи. Відомо, що для вугілля з переважаючим вмістом основних компонентів (CaO, Fe₂O₃, K₂O, MgO, Na₂O) характерним є утворення достатньо міцних сульфатно-кальцієвих відкладень на хвостових ТП. Зокрема, вміст оксиду кальцію в золі палива визначає його здатність до утворення на конвективних поверхнях нагрівання твердих відкладень, що важко видаляються. Згідно з [1] інтенсивність росту таких відкладень значно посилюється при вмісті CaO в золі більше 13 – 15 %. При спалюванні вугілля з кислим складом золи, як правило, утворюються шлакові відкладення на поверхнях топки і трубах пароперегрівачів.

Кислотність вугілля характеризується відношенням сум кислих ΣK і основних ΣO компонентів $k_c = \frac{Al_2O_3 + SiO_2 + TiO_2}{CaO + Fe_2O_3 + K_2O + MgO + Na_2O}$. Тут і надалі вміст оксидів у процентах.

Відомостей про кислотність вугілля недостатньо для оцінки його шлакуючого чи забруднюючого потенціалів. У зв'язку з цим для прогнозування шлакування і забруднення у

світовій практиці застосовуються і інші методи, що базуються на використанні даних про характеристики вугілля. За цими даними формуються кількісні показники, за якими обчислюється ймовірність утворення на ТП шлакуючих чи забруднюючих відкладень (ШЗВ).

Зазначимо, що ці показники наводяться у відомих літературних джерелах розрізнено, стосовно тільки до палив, які в них розглядаються. У зв'язку з цим було виконано збір, аналіз і систематизацію показників, а також розрахунки за їх допомогою прогнозних значень ймовірності утворення тих чи інших відкладень при спалюванні вітчизняного вугілля і його сумішей.

Аналіз показників (індексів), наведених в [1 – 7], свідчить, що їх умовно можна поділити на прості і комбіновані. Прості знаходяться за вмістом одного чи двох оксидів у золі вугілля. Зокрема, для оцінки схильності палива до утворення селективно збагачених (залізистих, сульфатно-кальцієвих, лугових та ін.) відкладень використовуються індекси

$$I_1 = Fe_2O_3; \quad (1)$$

$$I_2 = Fe_2O_3/CaO; \quad (2)$$

$$I_3 = 0,567(Na_2O)^{0,423} - 0,333; \quad (3)$$

$$I_4 = SiO_2/Al_2O_3. \quad (4)$$

Зазначимо, що індекс I_3 , який характеризує схильність вугілля до утворення забруднень з активних лугів, має фізичний зміст лише при вмісті в золі оксиду натрію $Na_2O > 0,284$ %. При меншому вмісті цього оксиду величина $I_3 < 0$.

Комбіновані індекси розраховуються за вмістом всіх або найбільш представницьких оксидів у золі та, в деяких випадках, вмістом у вугіллі золи A^d і загальної сірки S_t^d (в % на суху масу). Вони мають більший ступінь достовірності, ніж прості.

Комбінований показник здатності вугільного палива утворювати сульфатно-кальцієві відкладення обчислюється за виразом [1]

$$I_5 = \text{CaO}(\text{K}_2\text{O})^{0,5}(\text{Na}_2\text{O})^{-1}, \quad (5)$$

а індекс схильності вугілля до утворення залізистих відкладень має вигляд

$$I_6 = 1 - 0,92 / S_t^*, \quad (6)$$

де $S_t^* = (220 - 8 \cdot 10^{-2} \vartheta_a) S_t^d / A^d$, ϑ_a – адиабатна температура горіння, °С.

Індекс забруднюючих властивостей (критерій Аттіга – Дьюзі [2]) визначається за рівнянням

$$I_7 = \frac{\text{Na}_2\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})}{(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)}. \quad (7)$$

Вираз для обчислення показника шлакування має вигляд [3]

$$I_8 = 0,707 \left\{ \left[1 - \frac{0,025(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)}{(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})} \right]^2 + \left(1 - \frac{8 \cdot 10^{-3} A^d}{S_t^d} \right)^2 \right\}^{0,5}, \quad (8)$$

а схильність вугілля до забруднення конвективних ТП –

$$I_9 = (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2). \quad (9)$$

Зазначимо, що у зарубіжній практиці [4] останній показник обраховують за формулою

$$I_{10} = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2), \quad (10)$$

причому його використання обмежується тільки паливами, для яких $\text{CaO} + \text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$. При $\text{CaO} + \text{MgO} < \text{Fe}_2\text{O}_3$ використовується індекс $I_{11} = I_{10} S_t^d$.

Для прогнозування відкладень, збагачених кремнієм, в роботі [4] наводиться індекс

$$I_{12} = \text{SiO}_2 / (\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3). \quad (11)$$

Окрему групу складають показники, які базуються на фізичних властивостях шлаку – в'язкості і міцності на розрив, а також на його температурних характеристиках – температурах початку плавкої деформації і початку шлакування. Зокрема, індекс, що базується на в'язкості шлаку, при якій забезпечується штатна робота котла, має вигляд [4]

$$I_{13} = \lg(\eta_{\text{ш}}^*) = 4,468 I_{12}^* + 1,265(10^4 / T_r) - 8,44, \quad (12)$$

де I_{12}^* обраховується за (11) при $\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 100\%$; T_r – температура газового середовища в зоні, де утворюється шлак, К.

Достовірність оцінки ШЗВ вугілля підвищується при використанні результатів

спеціальних досліджень його мінеральної частини. В останні роки за кордоном для ранжування вугілля за шлакуючими і забруднюючими властивостями розробляються показники, в яких використовуються результати комп'ютеризованої скануючої електронної мікроскопії – ССЕМ та хімічного фракціонування. За допомогою скануючої мікроскопії отримуються дані не тільки про склад золи в цілому, але і про компонентний склад окремих її частинок. Вираз для розрахунків індексу ШЗВ з використанням цих даних, наведений в [4], має вигляд

$$I_{14} = \sum_{i=1}^n g_i \left[\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \left(1 - 0,5 \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2} \right) \right], \quad (13)$$

де g_i – масова частка фракції i ; n – кількість фракцій; вміст оксидів у квадратних дужках береться для кожної фракції.

У вітчизняній практиці подібні дослідження розподілу мінеральних компонентів у вугіллі і золи не проводяться, і даних про компонентний склад окремих частинок золи немає. Наскільки нам відомо, систематично такі дослідження не проводились і в країнах ближнього зарубіжжя. Лише в УралВТІ [5] з використанням електронного мікрозонда Сомебах було визначено компонентний склад невеликої кількості N ($N = 100 \dots 200$) індивідуальних частинок легкої золи декількох проб вугілля.

Порівняння типів вугілля, яке постачається на ТЕС, його ранжування за тими чи іншими властивостями можуть бути виконані за формулами (1) – (13) при наявності інформації про граничні значення індексів. Ці значення необхідні також при оцінюванні обмежень при заміні одного палива іншим або при необхідності спалювання сумішей вугілля.

В табл. 1 наведені результати систематизації індексів за ступенем прогнозованої ними ймовірності утворення на ТП тих чи інших відкладень.

Аналіз індексів $I_1 - I_{14}$ показав, що їх величина змінюється в досить широких межах. При $I_1 \gg 15$; $0,3 < I_2 < 3$; $I_3 > 0,59$; $I_4 > 2,8$; $I_5 > 30$; $I_6 > 0,62$; $I_7 > 0,6$; $I_8 > 0,75$; $I_9 > 2,2$; $I_{10} > 0,4$; $I_{11} > 2,0$; $I_{12} < 0,65$, $\eta_{\text{ш}}^* > 108,3$ Па·с; $I_{14} > 30,6$ вугілля має високу схильність до шлакування і забруднення теплообмінних поверхонь.

Для розрахунків показників $I_1 - I_{14}$ нами створено банк даних (БД) щодо властивостей

Таблиця 1. Значення показників при різній ймовірності утворення шлакуючих і забруднюючих відкладень за даними [1 – 4, 6, 7]

Індекс	Ймовірність відкладень			
	низька	середня	висока	дуже висока
$I_1, \%$	3 – 8	8 – 15	15 – 23	
I_2	< 0,3; > 3,0		0,3 – 3,0	
I_3	< 0,23	0,23 – 0,59	0,59 – 0,82	> 0,82
I_4	< 1,4	1,4 – 2,8	> 2,8	
I_5 (при CaO < 5%)	< 10	10 – 30	> 30	
I_6	< 0,41	0,41 – 0,62	0,62 – 0,83	> 0,83
I_7	< 0,2	0,2 – 0,6	0,6 – 1	> 1,0
I_8	< 0,56	0,56 – 0,75	> 0,75	
I_9	< 0,9	0,9 – 2,2	> 2,2	
I_{10}	< 0,2	0,2 – 0,4	> 0,4 – 0,55	
I_{11}	< 0,6	0,6 – 2,0	2,0 – 2,6	> 2,6
I_{12}	> 0,72	0,72 – 0,65	0,65 – 0,5	< 0,5
$\eta_{ш}^*, \text{Па}\cdot\text{с}$	< 54,2	54,2 – 108,3	> 108,3	
I_{14}	< 15,3	15,3 – 30,6	> 30,6	

індивідуального вугілля. До банку занесені характеристики вугілля Донецького і Львівсько-Волинського басейнів, а також вугілля деяких родовищ Росії і далекого зарубіжжя (всього 162 індивідуальні палива). Характеристики палив вибирались за джерелами [3, 4, 6, 8 – 10]. Зазначимо, що для деяких палив у джерелі [8] наведено спільний вміст у золі оксидів калію і натрію. До банку даних заносились роздільні вмісти цих оксидів, які розраховувались у пропорції, характерній для вугілля подібної марки.

Для визначення індексів (показників) шлакування і забруднення, крім інформації про властивості вугілля, накопиченої у банку даних, потрібна відповідна програма. Таку програму було розроблено і виконано розрахунки температур ϑ_a , T_p , показників кислотності та індексів $I_1 - I_{14}$ стосовно енергетичного вугілля Донецького і Львівсько-Волинського басейнів. Для порівняння ці величини обчислювались також для засоленого вугілля (ЗВ), вугілля Березівського і Бородінського розрізів Кансько-Ачинського басейну (Росія), а також деяких марок вугілля з далекого зарубіжжя. В табл. 2 для прикладу представлені деякі результати розрахунків. Значення I_1 тут не наведені, оскільки вони дорівнюють вмісту в золі Fe_2O_3 .

Зупинимось на особливостях розрахунків індексів I_{13} , I_{14} . Згідно з даними, наведеними в [4], схильність вугілля до шлакування поверхонь котла низька при умові $\eta_{ш}^* \leq 54,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Тоді величина $I_{13} = \lg(\eta_{ш}^*) \leq 1,73$. Виходячи з цього, величина I_{13} для всіх вибраних палив була прийнята

однаковою і рівною 1,73. За цим значенням I_{13} для кожного палива розраховувалась величина температури T_p , яка забезпечує прийнятну, за умовами шлакування, роботу котла.

Для розрахунків показника I_{14} потрібно мати дані про компонентний склад окремих частинок золи, які при спалюванні конкретного вугілля можуть бути отримані методами скануючої електронної мікроскопії. Ці дані для палив у відомих нам літературних джерелах не наводяться. Тому при розрахунках індекса I_{14} приймалось, що хімічний склад окремих золотих фракцій і золи в цілому однаковий.

Зазначимо, що палива, обрані для розрахунків, суттєво відрізняються хімічним складом мінеральної частини. Зокрема, зола ЗВ і газове вугілля українських родовищ має значний вміст сірки. Аномально високі значення має також вугілля МЕ і SM [4]. У зв'язку з цим індекси I_6 , I_8 , які залежать від цього хімічного компонента, будуть мати підвищені значення. Наприклад, індекс I_8 для палива МЕ з аномально високим вмістом сірки приймає значення $I_8^{\max} = 0,94$.

Вугілля Бородінського розрізу (Бр) відрізняється незначною величиною S_d^t і дуже високим вмістом оксиду кальцію. Вірогідність утворення сульфатно-кальцієвих відкладень на поверхнях котла характеризує індекс I_5 . Максимальне значення цього індекса для палива Бр в табл. 2 – $I_5^{\max} = 69,3$. Отже, це вугілля має дуже високу схильність до утворення відкладень, оскільки прийнятні для експлуатації зна-

Таблиця 2. Склад золи і обраховані значення показників шлакування і забруднення

№ палива	Марка, клас	%	A _d , %	Хімічний склад золи, % на безсульфатну масу						k _c	S _t [*]	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₄		
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO															K ₂ O	Na ₂ O
Антрацитовий штиб, шлами і засолене вугілля Донецького басейну [8]																									
1	АШ	0,7	43,9	59	17,6	7,3	1,2	0,7	1,3	6,5	6,5	3,5	1	10,4	0,65	3,4	0,58	0,13	1,05	0,71	3,68	0,29	0,2	0,86	7,7
2	АРШ	3,6	24,8	43,3	14,3	32,6	0,6	4,3	1,7	2,7	1,1	1,4	9,2	7,6	0,26	3,0	6,4	0,90	0,80	0,90	2,77	0,73	2,62	0,53	31,0
3	ЗВ	2,2	20	28	20	22	0,5	15	3	1,5	10	0,9	8,4	1,5	1,17	1,4	1,8	0,89	10,6	0,94	12,21	1,06	2,34	0,41	33,5
Газове і довополумене вугілля Донецького басейну [8]																									
4	Г	3,4	10,1	43,7	22,2	24,4	1,3	2,2	1,2	3,8	1,2	2	30,9	11,1	0,28	2	3,6	0,97	0,59	0,89	2,44	0,49	1,66	0,61	23,3
5	ДМСШ	1,4	28,9	55,7	27,8	9,3	1	3,5	0,01	2,2	0,5	5,5	4,4	2,7	0,09	2	10,4	0,79	0,09	0,75	0,5	0,18	0,26	0,81	12,3
6	ДСШ	4,4	31,4	48	28,2	12,8	0,8	3,5	1,6	4,3	0,8	3,3	13,3	3,7	0,18	1,7	9,1	0,93	0,24	0,88	1,52	0,3	1,31	0,73	15,4
Вугілля Львівсько-Волинського басейну [8]																									
7	ГСШ	3,7	26	34	17,2	28,9	0,8	14,9	2,2	1	1	1,1	9,3	1,9	0,23	2	14,9	0,9	0,92	0,94	1,85	0,92	3,42	0,43	38,6
8	ГЖР	3,3	35	44	23	19	0,9	8	2	2,5	0,5	2,1	6,2	2,4	0,09	1,9	25,3	0,85	0,24	0,89	1,41	0,47	1,56	0,6	24,9
9	ГР	2,5	29,1	56,5	20,7	11,1	1,1	7	0,5	2,5	0,6	3,6	5,4	1,6	0,12	2,7	18,5	0,83	0,17	0,86	0,86	0,28	0,69	0,75	17,4
Вугілля Бородінського розрізу (Росія) [3]																									
10	БР1	0,2	8,4	56	6,8	6,1	0,3	25,3	5	0,3	0,2	1,7	2	0,2	-	8,2	69,3	0,53	0,12	0,82	0,29	0,58	0,12	0,61	31,1
11	БР2	0,2	10,7	65,1	4,4	5,8	0,3	20,2	3,7	0,3	0,2	2,3	1,5	0,3	-	14,8	55,3	0,38	0,09	0,77	0,22	0,43	0,09	0,69	25,8
12	БР3	0,5	11,3	60,1	7,4	7,6	0,4	20,3	3,6	0,3	0,3	2,1	3,6	0,4	0,01	8,1	37,1	0,75	0,14	0,88	0,28	0,47	0,24	0,66	27,5
Вугілля Мінусінського і Кузнецького басейнів (Росія) [9]																									
13	ДР	0,6	20	49,6	28,7	7,6	1,4	7,5	3,9	0,6	0,7	3,9	1,2	1	0,15	1,7	8,3	0,54	0,18	0,8	0,33	0,25	0,16	0,72	14,8
14	ДР	0,5	22,6	52,2	26,8	10,8	1	5	2,5	1	0,7	4	1	2,2	0,15	1,9	7,1	0,39	0,18	0,73	0,43	0,25	0,14	0,74	15,2
15	Г	0,3	17	61,4	24	4,1	1	3,5	2,8	2,4	0,8	6,4	0,02	1,2	0,18	2,6	6,8	-	0,13	0,69	0,5	0,16	0,05	0,86	7,5
Іспанське та південно-африканське вугілля [4]																									
16	AGF	0,6	17,7	54,3	24,8	6,1	1,4	6,3	2,9	3,3	1	4,1	2	1	0,24	2,2	11,1	0,53	0,25	0,81	1,06	0,24	0,14	0,78	12,1
17	SM	6,8	30	39	24	26,5	0,8	7,3	1	1,4	0,04	1,8	17,2	3,6	-	1,6	220,2	0,95	0,02	0,9	0,84	0,57	3,87	0,53	29,9
18	ME	8,7	28	34,7	10	5,1	0,5	45,4	1,9	1,6	0,8	0,8	23,5	0,1	0,19	3,5	70	0,96	1,01	0,98	3	1,21	10,6	0,4	50,2
Індійське вугілля [6]																									
19	A	0,2	2,1	16,2	12,3	16,9	0,8	34,3	8,7	0,8	0,7	0,5	21	0,5	0,15	1,3	43,8	0,96	1,47	0,95	3,14	2,1	0,42	0,21	48,1
20	G	1,1	28,4	64,6	21,8	4,5	1,4	4,5	0,8	0,7	0,5	8	8,3	1	0,09	3	7,5	0,89	0,06	0,73	0,15	0,13	0,13	0,87	8,9
21	M	0,7	43,3	60,5	31,8	3,7	1,6	1	0,6	0,3	0,2	16,2	3,6	3,7	-	1,9	2,7	0,74	0,01	0,37	0,03	0,06	0,04	0,92	4,6
Австралійське вугілля [10]																									
22	C	0,4	3,2	55,3	20,2	11,5	1,4	7,6	2,7	0,4	0,8	3,3	5,6	1,5	0,19	2,7	6,2	0,83	0,25	0,88	0,38	0,3	0,11	0,72	18,4
23	F	0,2	19,2	51,7	28,5	11,3	2,2	4,1	1,5	0,1	0,5	4,7	0,8	2,8	0,09	1,8	3,1	-	0,1	0,52	0,13	0,21	0,05	0,75	14,7
24	G	0,5	12,7	59,1	34,3	2,3	2	0,4	0,4	1,3	0,2	21	1,8	5,8	-	1,7	2,9	0,48	0,01	0,58	0,07	0,05	0,03	0,95	2,7

чення $I_5 < 10 \div 30$. Найбільший вміст CaO наводиться в [4] для лігнітів (паливо ME). Індекс I_5 для цього палива майже однаковий з I_5^{\max} для вугілля Бр. Схильне до утворення сульфатно-кальцієвих відкладень також і газове вугілля Львівсько-Волинського басейну, особливо його марки ГР, ГСШ, (див. табл. 2). Високі значення цього індекса має вугілля SM [4] при помірному вмісті CaO, але дуже малому вмісті оксиду натрію.

Завдяки високій кислотності деякі палива з табл. 2 мають низькі значення індекса забруднюючих властивостей. Зокрема, для індійського вугілля величина цього індекса знаходиться, в основному, в межах $I_7 = 0,01 \div 0,063$. Лише одна марка цього палива має аномально високе значення $I_7 = 1,47$. Для австралійського вугілля значення критерію Аттіга-Дьюзі $I_7 = 0,008 \div 0,247$, а для російського [9] $-I_7 = 0,126 \div 0,178$. Вугілля Мінусінського і Кузнецького родовищ має низьку схильність до утворення залістих і сульфатно-кальцієвих відкладень, а також відкладень на базі активних лугів.

Насамкінець розглянемо результати прогнозування шлакуючих і забруднюючих показників для сумішей вугілля. Змішування високозабруднюючого палива Π_1 з одним або двома низькозабруднюючими паливами Π_2, Π_3 , у певних пропорціях $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3$ може дозволити спалювати Π_1 без збільшення частоти очищення поверхонь і зменшення їх ресурсних показників. Тут $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – частки високозабруднюючого і низькозабруднюючих палив.

Результати прогнозування проаналізуємо на прикладі розрахунків критерію Аттіга-

Дьюзі. Низькозабруднюючим за цим критерієм будемо вважати паливо, для якого величина $I_7 \leq 0,6$. Граничне значення критерію $I_7 = 0,6$ позначимо індексом I_7^* .

В табл. 3 для прикладу наведені характеристики сумішей високозабруднюючих палив Π_1 з деякими низькозабруднюючими марками вугілля з банку даних, для якого значення критерію Аттіга – Дьюзі $I_7 \leq I_7^*$. Аналіз отриманих результатів показав, що певні марки вугілля Донецького басейну, які характеризуються високими забруднюючими властивостями, можна безпроблемно спалювати у сумішах з низькозабруднюючим вітчизняним вугіллям при величині $\alpha_1 > 0,5$. Наприклад, при змішуванні АШ (паливо № 1 табл. 2) з ДМСШ для забезпечення величини I_7^* потрібне значення $\alpha_1 = 0,61$. Ще більші значення α_1 можна отримати при змішуванні цього палива з австралійським вугіллям (див. рядок 4 даних табл. 3). З нашої точки зору, такі значення α_1 слід вважати економічно доцільними, оскільки у випадку спалювання суміші вони забезпечують використання більшої кількості менш цінного високозабруднюючого палива.

Засолене вугілля має аномально високі значення індекса I_7 , з якими воно не може спалюватись самостійно у топках котлів традиційними методами. Розрахунки критерію Аттіга – Дьюзі для сумішей ЗВ і іншого вугілля з БД показали наступне. Прийнятна для спалювання величина може бути отримана при шихтуванні ЗВ лише з окремими паливами Донецького чи Львівсько-Волинського вугільних басейнів при низьких значеннях α_1 ($\alpha_1 \leq 0,2$).

Таблиця 3. Характеристики сумішей і значення індекса забруднюючих властивостей

№ з/п	Номер палива з табл. 2			Частка палива			$S_f^d, \%$	$A^d, \%$	Хімічний склад золи суміші, % на безсульфатну масу								I_7
	Π_1	Π_2	Π_3	α_1	α_2	α_3			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	
1	1	5	-	0,61	0,39	0	0,97	38,09	57,72	21,55	8,07	1,12	1,78	0,80	6,49	2,46	0,60
2	1	2	-	0,50	0,50	0	2,15	34,35	51,15	15,95	19,95	0,90	2,50	1,50	5,95	2,40	1,14
3	1	7	-	0,50	0,50	0	2,20	34,95	46,50	17,40	18,10	1,00	7,80	1,75	5,10	2,35	1,27
4	1	24	-	0,74	0,26	0	0,65	35,85	59,03	21,91	6,01	1,41	0,62	1,07	7,16	2,80	0,60
5	3	9		0,12	0,88	0	2,46	27,97	52,97	20,61	12,45	1,03	7,99	0,81	2,38	1,76	0,60
6	1	7	24	0,44	0,26	0,3	1,42	29,81	52,50	22,53	11,44	1,34	4,32	1,26	4,67	1,94	0,60
7	1	7	24	0,19	0,54	0,27	2,27	25,91	45,52	21,84	17,64	1,20	8,29	1,55	2,66	1,31	0,60
8	1	5	9	0,55	0,2	0,25	1,29	37,23	57,72	20,40	8,65	1,14	2,83	0,84	6,14	2,29	0,60
9	3	9	24	0,17	0,56	0,27	1,91	23,15	52,32	24,22	10,61	1,24	6,60	0,90	2,01	2,10	0,60

Наприклад, величина $I_7 = 0,6$ для суміші ЗВ і ГР (паливо 9 з табл. 2) досягається при $\alpha_1 = 0,12$.

Слід вказати на істотно нелінійну залежність між забруднюючими властивостями вихідних палив P_1, P_2 , величиною α_1 та індексом для сумішного палива P . Наприклад, якщо у якості P_1, P_2 з таблиці 2 вибрати вугілля № 1 і № 2 або № 1 і № 7, то при змішуванні їх у пропорції 0,5 : 0,5 величини $I_7 = 1,14$ і 1,27, тобто є більшими, ніж аналогічні показники для кожного вихідного палива.

Як показали розрахунки, суміш двох високозабруднюючих палив, що має величину I_7 більшу, ніж кожна з її складових, можна перевести в придатну до спалювання шляхом шихтування її з третім паливом. Зокрема, при змішуванні згаданих вище палив № 1 і № 7 з австралійським вугіллем № 24 у пропорції 0,44 : 0,26 : 0,3 забезпечується прийнятне значення індекса I_7 (див. табл. 3). Величина I_7^* забезпечується і при шихтуванні цих трьох палив у іншій пропорції, а саме $\alpha_1 = 0,19$, $\alpha_2 = 0,54$, $\alpha_3 = 0,27$. В обох цих випадках частка низькозабруднюючого вугілля майже однакова, а частки високозабруднюючих – різні. Вибір пропорцій змішування залежить від того, яке з двох високозабруднюючих палив є менш цінним.

При змішуванні високозабруднюючого палива P_1 з двома низькозабруднюючими P_2, P_3 прийнятні для спалювання трьохкомпонентні суміші у деяких випадках можна отримати при частці вугілля P_1 , меншій, ніж при змішуванні

P_1 з одним із палив P_2 або P_3 . Наприклад, при змішуванні АШ з довгополуменевим ДМСШ ($P_2, I_7 = 0,092$) і газовим ГР ($P_3, I_7 = 0,166$) вугіллем прийнятна величина $I_7 = 0,6$ досягається при частках цих палив у суміші, що дорівнюють 0,55, 0,20 і 0,25, відповідно. Як зазначалося вище, при змішуванні тільки P_1 і P_2 $\alpha_1 = 0,61$.

В той же час в інших схемах шихтування трьохкомпонентне змішування порівняно з двоохкомпонентним дозволяє збільшити частку використання високозабруднюючого палива. Наприклад, при змішуванні ЗВ з вітчизняним ГР і австралійським G прийнятна величина критерію Аттіга – Дюзі може бути забезпечена при вмісті ЗВ $\approx 17\%$. При оптимальному змішуванні ЗВ і ГР частка засоленого вугілля у суміші становить лише 12,4%.

Наведені результати свідчать, що знаходження потрібних складів сумішей є непростим завданням вирішення якого потребує виконання оптимізаційних розрахунків. Створений банк даних щодо технічних характеристик вугілля і хімічного складу його золи дозволяє вибрати те чи інше паливо, розрахувати за допомогою розробленої програми найбільш розповсюджені індекси шлакування і забруднення індивідуального вугілля, двох – чи трьохкомпонентних сумішей і вказати оптимальні значення пропорції, у якій потрібно шихтувати індивідуальні палива з метою отримання сумішей з низькими шлакуючими і забруднюючими властивостями.

1. *Алехнович А. Н., Богомолов В. В., Гладков В. Е., Артемьева Н. В.* Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла // Теплоэнергетика. – 1997. – № 3. – С. 64 – 68.
2. *Attig R. G., Duzy P. C.* Coal ash deposition studies and application to boiler design // Proc. Amer. Power Conf., Chicago, Ill, 1969. – Vol. 31. – P. 290 – 295.
3. *Пронин М. С., Бруер Г. Г., Бычков А. М., Кириллов М. А.* Использование березовских углей Канско-Ачинского бассейна для сжигания в мощных парогенераторах ТЭС // Электрические станции. – 2003. – № 2. – С. 6 – 10.
4. *Barroso J., Ballester J., Pina A.* Study of coal ash deposition in an entrained flow reactor: Assessment of traditional and alternative slagging indices // Fuel Processing Technology. – 2007. – Vol. 88. – P. 865–876.
5. *Алехнович А. Н.* Уточнение расчетной схемы закрепления частиц и роста шлаковых отложений // Теплоэнергетика. – 2008. – № 9. – С. 24 – 28.
6. *Lawrence A., Kumar R., Nandakumar K., Narayanan K. A.* Novel tool for assessing slagging propensity of coals in PF boilers // Fuel. – 2008. – Vol. 87. – P. 946 – 950.
7. *Van Alphen C.* Automated mineralogical analysis of coal and ash products – challenges and requirements // Minerals Engineering. – 2007. – Vol. 20. – P. 496 – 505.
8. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ). Справочник / В. С. Вдовченко, М. И. Мартынова, Н. В. Новицкий, Г. Д. Юшина. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 184 с.
9. *Изюмов М. А., Супранов В. М., Росляков П. В., Новиков А. В.* Исследование возможности перевода котлов ТП-92 Яйвинской ГРЭС на непроектные виды углей // Теплоэнергетика. – 2008. – № 9. – С. 7 – 18.
10. *Rushdi A., Gupta R., Sharma A., Holcombe D.* Mechanistic prediction of ash deposition in a pilot-scale test facility // Fuel. – 2005. – Vol. 84. – P. 1246 – 1258.