

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, П.В. СЕРГЕЕВ, доктори техн. наук, проф.  
Донецький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ ТА ВУГЛЕМАЗУТНИХ КОМПЛЕКСІВ

Виконано лабораторні і стендові дослідження спалювання вугілля і вугільно-мазутних комплексів. Показано переваги вугільно-мазутних комплексів над вугіллям з точки зору інтенсифікації процесу спалювання. Знайдені аналітичні вирази, які характеризують динаміку вигорання паливних частинок.

Ключові слова: енергетика, вугілля, вугільно-мазутні комплекси, спалювання.

**Постановка проблеми і стан її вивчення.** Тенденції до вичерпання традиційних видів палива, екологічні проблеми та регіональний дефіцит паливних ресурсів обумовлюють пошук нових альтернативних палив, зокрема для ТЕС. Актуальність цієї проблеми настільки висока, що в Україні прийнято Закон «Про альтернативні види палива» (2009 р.) [1].

Одним з різновидів альтернативного палива розглядаються водо-вугільні, водо-мазутно-вугільні та мазутно-вугільні суспензії і вугле-масляні агломерати (гранули) [2-6]. Е попередніх роботах [7-9] розпочато дослідження процесу спалювання вуглемазутних комплексів (агрегатів).

**Мета роботи** - порівняльне дослідження спалювання вугілля і вуглемазутних комплексів і встановлення закономірностей динаміки спалювання.

**Викладення основного матеріалу.** Об'єктом дослідження вибрано вугілля марки Г і вуглемазутні комплекси одержані з цього вугілля. Характеристика вугілля і комплексів наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики досліджуваного палива

Характеристика палива	Вугілля		Вуглемазутні комплекси		
	0-0,1 мм	1,0-0 мм	I типу (плівкові), вугілля 0-1,0 мм	II типу (мазутонаповнені) з вугілля	
				0-0,1 мм	0-1,0 мм
$Q_m$ , %	-	-	5	20	16
$d_a$ , мм	-	-	0,1 - 1,2	0,3 - 1,2	0,5 - 2,0
$W_t^c$ , %	4,3	4,5	6,9	4,81	4,95
$A_k^d$ , %	12,8	12,8	6,1	3,9	6,2
$S_t^d$ , %	0,52	0,36	0,24	0,40	0,25
$\gamma^{daf}$	41,0	41,0	42,4	54,2	47,4
C, %	77,5	77,5	78,5	81,0	80,2
H, %	5,2	5,2	5,5	7,0	6,2
$Q_x^c$ , ккал/кг	7497	7652	7720	8420	8089

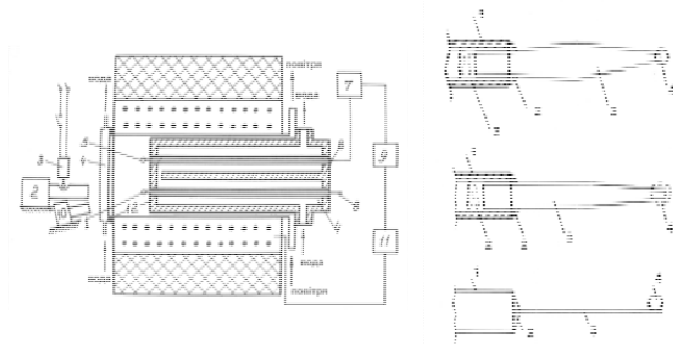
Примітка: параметр  $S_t^d$  визначено на аналізаторі LECO-132, чутливість приладу 0,0001% S

Характеристики зв'язуючого мазуту М100:  $Q_n=9500$  ккал/кг,  $S_t^d = 0,5\%$ ;  $W_{tk}^c = 2,0\%$ . Всього було досліджено 150 частинок палива (вугілля та вугле-мазутних комплексів) в діапазоні температур 710-810 °С.

Методика дослідження горючих властивостей вуглемасляних агрегатів розроблена В. Білецьким спільно з фахівцями УралВТИ (зокрема, А. Хідіятовим) на базі аналогічної методики для вугілля [10] і враховує специфічні властивості агрегатів. Вона полягає з одночасній фотота кінореєстрації процесу вигорання частинки палива [8-9].

Для забезпечення необхідного температурного режиму використана експериментальна установка зібрана на основі електропечі СУСЛ-0,25-1/12-М1 (рис. 1). Кіно та фотоапарати як правило обладнуються оптичними приставками й кільцями для збільшення зображення частинок в полі кадру в 3-10 разів. Зонд 8 обладнується пластинчатим списоподібним тримачем зі слюди, товщиною 0,05-0,15 мм, довжиною 40 мм. Досліджувана частинка закріплюється на кінці тримача тонкою плівкою каоліну в слабкому водному розчині рідкого скла. Потім ка-

оліновий клей висушується при кімнатній температурі. Введення зонду з частинкою палива в камеру здійснюється з допомогою пневмоподачі або вручну.



**Рис. 1.** Експериментальна лабораторна установка спалювання палива: А: 1 - досліджуване зерно; 2 - кінокамера; 3 - іскровий відмітчик; 4 - тепловий екран; 5 - термопара; 6 - електроніч; 7 - вторинний прилад; 8 - зонди; 9 - блок керування; 10 - фотокамера; 11 - блок живлення; Б: 1 - зонд; 2 - каолін; 3 - списоподібні слюдяні тримачі; 4 - досліджувана паливна частинка

мент вводу фіксується на плівці іскровим відмітчиком. Після спалаху іскрового відмітчика відкривається затвор фотоапарата, вставлений на витримку „В“. Характер протікаючих процесів оцінюється по кіно- та фотоматеріалам. Продукти згорання видаляються з камери продувкою повітрям. Середній еквівалентний діаметр досліджуваних зерен визначається з допомогою мікроскопів. Розроблена методика дозволяє отримувати якісну і кількісну оцінку процесу вигорання окремих вугільнозв'язуючих агрегатів.

По фото- й кіноплівках визначається відсоток „вибухаючих“ паливних зерен і характер цього процесу, по кіноплівках - тривалість окремих стадій горіння.

Фрагменти кінограм та фото вигорання вуглемазутних гранул, одержані за описаною методикою, подані на рис. 2.

Аналіз результатів дослідження свідчить, що процес горіння вуглемазляних гранул та зерен вугілля характеризується чітко вираженою стадійністю.

Прослідковуються чотири характерні стадії горіння: 1 - прогрів частинки до займання легких компонентів (тривалість  $\tau_{зл}$ ); 2 - вогневого горіння легких речовин  $\tau_{гл}$ ; 3 - індукції коксового залишку частинки  $\tau_{лк}$ ; 4 - горіння коксового залишку  $\tau_{тк}$ .

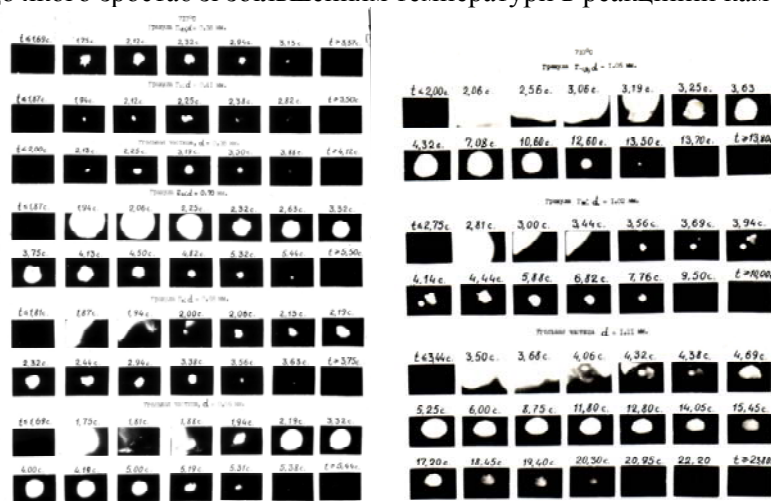
При цьому сумарний час запалювання коксового залишку визначається за формулою

$$\tau_{зк} = \tau_{зл} + \tau_{гл} + \tau_{лк}, \quad (1)$$

а повний час вигорання частинки

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{зк} + \tau_{тк}. \quad (2)$$

Горіння легких речовин гранул (рис. 2), особливо з вугілля <0,1 мм, має вибуховий характер і супроводжується виносом за межі частинок струменів газу й рідких компонентів, а в окремих випадках і частковим розривом („вибухом“) вугільно-мазутних комплексів, тенденція до якого зростає зі збільшенням температури в реакційній камері.



**Рис. 2.** Кінограми вигорання вуглемазутних гранул та зерен вугілля при 710°C і 810°C

Явище розриву гранул при їх спалюванні помічено також К.Е. Кейпсом [11].

Стадії горіння легких та коксового залишку для гранул  $d_a < 1$  мм, як правило, суміщуються, а їх розрив та деформація протікає також під час вигорання коксу.

Механізм термодеструкції гранул, очевидно, викликаний їх полікомпонентністю і певною мірою схожий з механізмом термодеструкції крапель емульсії „вода-мазут“.

Якщо при 710 °C доля

гранул вигоряючих з ефектом часткового або повного руйнування складала 7,5 %, то при 810 °С вона підвищилась до 15,6 %. Отже, при спалюванні гранул в факелі топки ( $t_c=1200-1500^\circ\text{C}$ ) слід очікувати їх інтенсивного термодрібнення, що покращує процес сумішеутворення і підвищує швидкість вигорання вугільної компоненти гранул.

Використовуючи виявлений ефект термодрібнення гранульованого палива можливе створення нових технічних рішень для інтенсифікації процесу його спалювання.

На відміну від вугільно-мазутних комплексів горіння частинок вугілля при 810°С не супроводжується яскраво вираженим виносом смолистих речовин.

При  $d_3 > 0,5$  мм для вугільних зерен існує стадія індукції коксика.

Порівняльна кількісна оцінка тривалостей стадій вигорання вугільно-мазутних комплексів та зерен вугілля показує, що запалювання і горіння вуглемазутних комплексів протікає значно швидше.

Тривалість стадій  $\tau_{зл}$ ,  $\tau_{лк}$ ,  $\tau_{зк}$  для цих комплексів менша ніж для зерен вугілля.

Результати обробки експериментальних даних відображені в кривих  $\tau_{зк}(d)$  та  $\tau_{\Sigma}(d)$  (рис. 3-5).

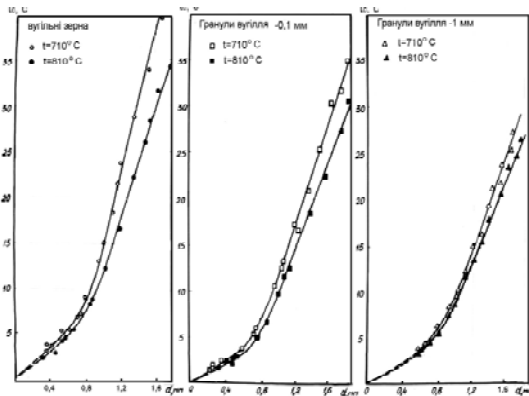


Рис. 3. Експериментальні залежності  $\tau_2(d)$

Слід відзначити нестабільність параметра  $\tau_{зк}$  для вугільно-мазутних комплексів з вугілля крупністю 0-1,0 мм (рис. 5), що, очевидно, викликано нестабільністю їх складу внаслідок близькості розмірів вугільно-мазутних комплексів та зерен комплексоутворюючого вугілля.

Для вугільно-мазутних комплексів з вугілля 0-0,1 мм зв'язок  $\tau_{зк}(d)$  близький до функціонального (рис. 4), що зумовлено  $d_a \gg d_3$  і, як наслідок, суттєво більшою гомогенністю спалюваної речовини.

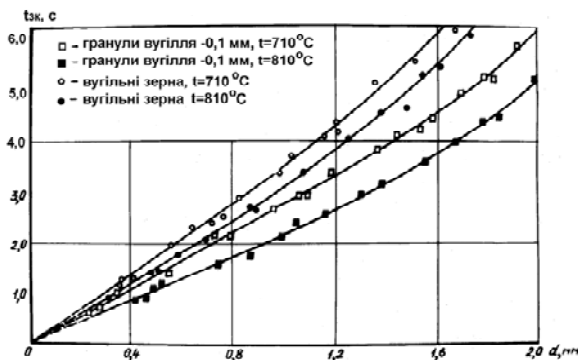


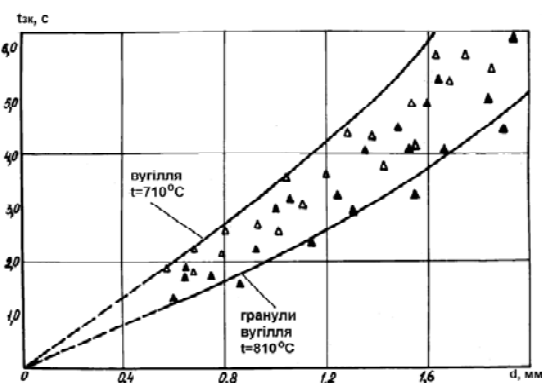
Рис. 4. Експериментальні залежності  $\tau_{зк}(d)$

В цілому час займання коксового залишку  $\tau_{зк}$  вугільно-мазутних комплексів з вугілля 0 - 0,1 мм у 1,35-1,4 рази менший ніж для частинок вугілля еквівалентного розміру.

Час повного вигорання вугільно-мазутних комплексів  $\tau_{\Sigma}$  на 15-25 % менше ніж частинок вугілля (рис. 3).

При цьому величина скорочення сумарного часу вигорання вугільно-мазутних комплексів по відношенню до вугільних зерен визначається їх крупністю, що, очевидно, пояснюється зміною закономірностей горіння частинок залежно від їх розміру.

Рис. 5. Кореляційне поле  $\tau_{зк}(d)$  для гранул з вугілля 0-1,0 мм



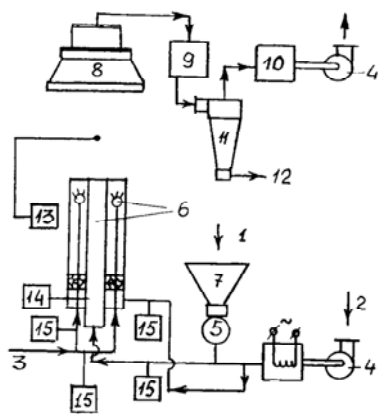
Криві  $\tau_{\Sigma}(d)$ ,  $\tau_{зк}(d)$  та  $\tau_{зл}(d)$ , (див. на рис. 3-5), апроксимуються поліномом другого ступеню виду

$$t_{зк} = t_o + a \cdot d + b \cdot d^2 \quad (3)$$

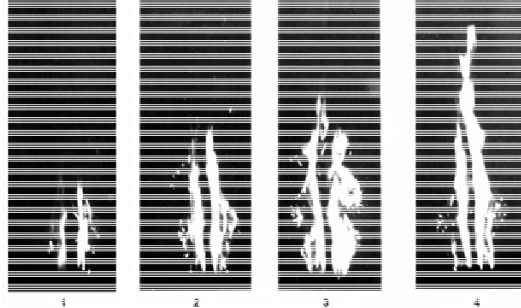
Як видно з фотографій факелів (рис. 7), одержаних при температурі вогневих потоків 1250-1300 °С та їх швидкості 15 м/с найбільш активно займаються вугільно-мазутні комплекси I структурного типу.

Факел комплексів II типу нестійкий, пульсує.

При тих же умовах аеросуміш вугільного пилу займається слабо.



**Рис. 6.** Вогневий стенд: 1 - досліджуваний матеріал; 2 - повітря; 3 - природний газ; 4 - вентилятор; 5 - живильник; 6 - горілки; 7 - бункер; 8 - витяжний зонд; 9 - теплообмінник; 10 - фільтр; 11 - циклон; 12 - зола; 13 - блок вимірювального зонду; 14 - блок термопари; 15 - дифманометри



**Рис. 7.** Фотограми запалювання аеросуміші палив на вогневому стенді: а- вугілля 0,1-0 мм; б- вугільно-мазутні комплекси II типу з вугілля 0,1-0 мм; в- вугільно-мазутні комплекси II типу з вугілля 1,0-0 мм; г- вугільно-мазутні комплекси I типу з вугілля 1,0-0 мм

### Висновки. 1. Лабораторні

дослідження спалювання вугілля та вугільно-мазутних комплексів показали, що час займання коксового залишку  $\tau_{зк}$  вугільно-мазутних комплексів з вугілля 0-0,1 мм в 1,35-1,40 рази менший ніж для частинок вугілля еквівалентного розміру.

Час повного вигорання вугільно-мазутних комплексів  $\tau_2$  на 15-25 % менше ніж частинок вугілля.

Результати лабораторних досліджень узагальнені і знайдені аналітичні вирази, які характеризують динаміку вигорання паливних частинок.

2. Виконані стендові випробовування підтвердили результати лабораторних досліджень горючих властивостей вугілля та вугільно-мазутних комплексів і дозволяють рекомендувати вугільні агрегати плівкового типу як паливо в першу чергу для топків циклонного типу та топків киплячого шару з циркуляційним потоком, де тривалість перебування паливного зерна у зоні згорання визначається його масою.

3. Отже, використання вуглемазутних комплексів (вуглемазляних агрегатів-гранул та частинок висококонцентрованої мазуто-вугільної суспензії) як енергетичного палива є перспективним з точки зору інтенсифікації (у порівнянні з вугіллям) процесу спалювання. При цьому, використання паливних вугільно-мазутних гранул потребує опрацювання питань подачі палива у зону горіння та схем спалювання, які виключають сепарацію недопалу в низ топкової камери.

### Список літератури

1. Про альтернативні види палива. Закон України N 1391-VI (1391-17) від 21.05.2009.
2. G. Parachristodoulou, O. Trass. Coal slurry fuel technology. // The Canadian Journal of Chemical Engineering. Volume 65, Issue 2, April 1987. pages 177-201.
3. Glenn R.D. Coal slurry applications and technology. EPRJ GS-7209, Palo Alto, C A, USA, Electric Power Research Institute, 1991.- 66 p.
4. Charcoal-Oil Mixture as an Alternative Fuel: A Preliminary Study // American Journal of Applied Sciences 6 (3). – 2009, 393-395 p.
5. Maglaya, A.B. Utilizing philippine calatrava Coal-Diesel Oil Mixture (CDOM) as alternative fuel for industrial steam generator // Fuel, 84. 2005.- P. 29-35.
6. Білецький В.С. Розробка наукових основ і способів селективної масляної агрегації вугілля та вугле-вміщуючих продуктів. - Дисертація на здобуття вченого ступеня докт. техн. наук. - Донецьк, 1994, 452 с.
7. Білецький В.С. Дослідження процесу горіння вуглемазляних агломератів // Термодеструкція вугілля. - К.: Наукова думка, 1993. - С. 73-80.
8. Белецкий В.С., Хидиятов А.М. Исследования процесса горения углемазляного гранулята// Теплоэнергетика. 1991, № 8. - С. 66-71.
9. Белецкий В.С. Методика исследования горючих свойств углемазляного гранулята// Горный журнал. Изв. ВУЗов. - 1991, № 12. - С. 8-12.
10. Иванова И.П. и др. Изучение механизма выгорания частиц Наровского угля// Горение твердого топлива. - Новосибирск: Наука, 1969. - С. 140-146.
11. Кейнс К.Е. Применение сферической агломерации в углеобогатнении// 7 Международный конгресс по обогащению углей. Сидней. 1976.

Рукопись поступила в редакцию 22.03.14