

the involvement of state funds. To date more than 10 billion cubic meters of methane and 35 billion kWh of electricity were produced and delivered to the network on a continuous basis. This real made reductions in greenhouse gas emissions amounted to 160 ths. tons equivalent of carbon dioxide. The implementation of the technologies developed for large landfills of Ukraine will steadily replace 0,5 billion m³ of natural gas in a year. *Bibl. 10, Fig. 9, Table 1.*

Key words: alternative energy, landfill biogas, gas-piston engines, power generation.

References

1. Bondarenko B.I., Zhovtianskii V.A. Problema utilizacii tverdikh pobutovikh vidkhodiv ta zneshkodzhennia nebezpechnik vidkhodiv v Ukraїni : Vid proektu kontseptcii – do derzhavnoi naukovo-tekhnichnoi programi, *Energotechnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2008, (4), pp. 63–69. (Ukr.)
2. Pyatnichko A.I., Bannov V.E. Utilizaciya biogaza zakrytyh poligonov TBO, *Ekologiya plyus*, 2009, (4), pp. 12–14. (Rus.)
3. Global Methane Initiative. – [Online Resource]. – Access mode: <http://www.epa.gov/globalmethane/index.htm>
4. Pyatnichko A.I., Zhuk G.V., Bannov V.E. Rezul'taty obsledovaniya poligonov TBO Ukrainy dlya ustanovleniya ob'emov dobychi i sostava biogaza, *Tekhnicheskie gazy*, 2010, (2), pp. 63–66. (Rus.)
5. Lavrenchenko G.K., Kopytin A.V., Pyatnichko A.I., Ivanov Yu.V. Optimizaciya sostava absorbentov aminy – voda uzla izvlecheniya SO₂ iz dymovykh gazov, *Tekhnicheskie gazy*, 2011, (1), pp. 16–25. (Rus.)
6. Carbon Capture and Storage : Progress and Next Steps, Otchet IEA/CSLF dlya sammita grupy G8, Muskoka, 2010, 44 s.
7. Bondarenko B.I., Pyatnichko A.I., Zhuk G.V. Gidratnoe hranenie uglekislogo gaza, *Energotechnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2011, (3), pp. 52–54. (Rus.)
8. Klymenko A.P. Klatraty, Kiev : Naukova dumrf, 1989, 73 p. (Rus.)
9. Krushnevich T.K., Pyatnichko A.I. Izvlechenie metana iz biogaza poligonov i podacha ego v magistral'nyj gazoprovod. *Tekhnicheskie gazy*, 2006, (3), pp. 41–44. (Rus.)
10. Kalashnikov O.V., Ivanov Yu.V., Budnyak S.V. Voprosy adekvatnosti teplofizicheskoy bazy programnykh sistem HYSYS, PRO-2 i GazKondNeft'. 2. Smesi uglevodorodov, vody, metanola i glikolej, *Ecotechnologii i resursosberezhenie [Ecotechnologies and Resource Saving]*, 2000, (1), pp. 31–35. (Rus.)

Received December 17, 2015

УДК 662.66

**Безценний І.В., Дунаєвська Н.І., канд. техн. наук,
Чернявський М.В., канд. техн. наук**

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: mchernyavski@yandex.com

Визначення кінетичних характеристик взаємодії коксів вугілля марок АШ, П та Г з киснем повітря та особливості горіння їх сумішей

Показано актуальність спалювання вугільних сумішей у пиловугільних котлоагрегатах ТЕС України, що спалюють антрацит. Досліджено взаємодію коксів антрациту, пісного та газового вугілля з киснем повітря. Визначено кінетичні константи швидкості горіння у наближенні Арреніуса для внутрішньокінетичного та внутрішньодифузійного режимів реагування для частинок розміром 90–200 мкм. Порівняно отримані результати з результатами інших авторів. Показано особливості взаємодії сумішей коксу антрациту з коксами пісного та газового вугілля з киснем повітря. Побудовано залежності швидкості реакції від ступеня конверсії при сталій температурі, а також від температури для коксів окремих марок та сумішей. Підтверджено припущення про незалежність виграєння компонентів суміші в ізотермічних умовах. *Бібл. 5, рис. 5, табл. 1.*

Ключові слова: вугільні суміші, кокс, швидкість горіння, антрацит.

Пилоугільні котлоагрегати половини ТЕС України використовують як проектне паливо вугілля марки АШ (антрацитовий штиб). Протягом майже трьох десятиліть, починаючи з середини 1970-х рр., антрацит постачався погіршеної якості, звичайною практикою було його спалювання з газомазутним підсвічуванням. Коли на початку 2000-х рр. внаслідок стрімкого подорожчання імпортованого газу та мазуту їх постачання на ТЕС було обмежене, з'ясувалося, що спалювання донецького АШ без підсвічування навіть за проектної калорійності можливе лише в діапазоні навантажень 80–100 %; при менших навантаженнях не забезпечуються умови займання факелу внаслідок низького виходу летких речовин.

Найпростіший спосіб покращення умов займання пиловидного антрациту без реконструкції котлоагрегатів полягає у збільшенні виходу летких речовин за рахунок його шихтування з вугіллям інших марок. Починаючи з 2005 р., поширеною практикою на антрацитових ТЕС стало додавання у паливо 20–30 % вугілля марки П (пісного) [1], у 2009 р. було виконане експериментальне спалювання суміші АШ та 10–15 % вугілля марки Г (газового) на Трипільській ТЕС [2]. При цьому відзначалися покращення умов займання факелу та розширення діапазону навантажень без підсвічування, проте, з огляду на відносно незначну частку домішки більш реакційноздатного вугілля, детальні розрахунки процесів, які відбуваються у паливній котла при спалюванні вугільних сумішей, не виконувалися.

За останні 2 роки поставки антрациту з тимчасово неконтрольованої частини Донбасу значно скоротилися, натомість зросла частка імпортованого з Росії та ПАР пісного вугілля. Наприкінці 2015 р. з метою диверсифікації паливної бази на Зміївській ТЕС було здійснено спробу спалювання суміші антрациту з 25–30 % газового вугілля. За цих умов актуальною стала задача дослідження особливостей кінетики та динаміки вигорання паливних сумішей з порівняними частками антрациту, пісного та газового вугілля для забезпечення можливості подальшого розрахунку топкових процесів.

У цій статті наведені результати дослідження кінетики сумішей коксів вугілля з різним ступенем метаморфізму на лабораторній установці РСК-1Д Інституту вугільних енерготехнологій НАН України. Головною частиною установки є імпульсний безградієнтний реактор киплячого шару атмосферного тиску, який знаходиться у вертикальній трубчастій печі [3].

Досліджувалася фракція вугілля розміром 90–200 мкм, отримана просіюванням вугільного пилу, відібраного з пиложивильників: антрациту з

Трипільської ТЕС, пісного вугілля зі Зміївської ТЕС та газового вугілля з Ладжинської ТЕС.

Досліди проводилися наступним чином. Зразок коксу масою 0,1 г розташовувався на решітці у центральній частині реактора. Під решітку через шар оксиду магнію подавалися поперемінно інертний газ або повітря зі швидкістю, яка не об'єднана для утворення киплячого шару. Це дозволяє забезпечити однакові температуру, тиск та концентрацію окислювача у зоні реагування. Після розміщення зразку на решітці в холодний реактор подавався інертний газ та вмикався нагрів печі, який продовжувався до досягнення необхідної температури T_c . Після стабілізації температури у реактор замість інертного газу подавалася порція повітря постійної величини, яка задавалася об'ємом петлі та складала $3 \cdot 10^{-4}$ м³. Під час проходження повітря крізь реактор відбувалася взаємодія кисню із зразком коксу, в результаті чого утворювалися продукти згоряння (СО та СО₂), які після охолодження з установки надходили до газоаналізатора.

Експерименти проводилися на зразках коксу антрациту, пісного та газового вугілля з розміром частинок $d = 90\text{--}200$ мкм, а також на сумішах коксу антрациту з коксами пісного та газового вугілля у співвідношенні 1 : 1 за масою. Зольність зразків коксів становила 10,6, 16,9 та 33,6 % для антрациту, пісного та газового вугілля відповідно. Малу зольність коксу антрациту можна пояснити тим, що під час просіювання в діапазон розміру частинок 90–200 мкм потрапила малозольна фракція.

Розрахунок питомої швидкості вигорання та ступеня конверсії здійснювався на основі вимірювання масових витрат СО та СО₂ за брутто-реакцією $C + O_2$ за такими виразами:

$$W_m = (\Delta m / \Delta t) / m;$$

$$W_{m0} = (\Delta m / \Delta t) / m_0;$$

$$(\Delta m / \Delta t) = G_{\text{п}} ([CO] + [CO_2]) M_c / 22,4,$$

де W_m — питома на поточну масу вуглецю швидкість горіння, кг/(кг·с); W_{m0} — питома на початкову масу вуглецю швидкість горіння, кг/(кг·с); $\Delta m / \Delta t$ — зменшення маси вуглецю за одиницю часу, кг/с; m_0 — початкова маса вуглецю, кг; $G_{\text{п}}$ — витрата повітря, нм³; [CO], [CO₂] — концентрації СО та СО₂, частка (об.); M_c — молярна маса вуглецю, кг/кмоль.

Ступінь конверсії вуглецю зразка після i -го імпульсу знаходиться з виразу:

$$x_i = 1 - (m_i - \Delta m_i) / m_0,$$

де m_i — поточна маса вуглецю, що не прореагував, кг; Δm_i — зменшення маси вуглецю за імпульс, кг.

Початкова маса вуглецю m_0 визначалася за даними технічного аналізу коксу.

Температура частинок ($T_{\text{ч}}$, К), які горять, розраховувалась із врахуванням нерівномірності між частинками та газом та визначалася на основі її теплового балансу. Для низьких температур реагування ($T_{\text{ч}} < 950$ К) можна знехтувати радіаційним теплообміном між газом та частинкою. Для умов киплячого шару формула для визначення температурної нерівномірності між газом та часткою (ΔT) має такий вигляд:

$$\Delta T = (Q W_{m0} d_e^2 \rho_T^y) / (6 Nu \lambda_T),$$

де Q – тепловий ефект реакції, кДж/кг ($Q = 32,8 \cdot 10^3$ для реакції $C + O_2 = CO_2$) [4]; d_e – еквівалентний діаметр частинки, м; ρ_T^y – уявна густина частинок, кг/м³; Nu – критерій Нуссельта; λ_T – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/(м·К).

Критерій Нуссельта для умов конвективно-кондуктивного теплообміну:

$$Nu = 6 + 0,1 Ar^{0,39},$$

де Ar – критерій Архімеда:

$$Ar = (g d_e^3 / \nu_T^2) (\rho_T^y - \rho_T) / \rho_T,$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²; ν_T – кінематична в'язкість газу, кг/м³; ρ_T – густина газу, кг/м³.

Найбільше значення температурної нерівномірності в дослідях при горінні окремо коксів та їх сумішей не перевищувало 0,7 К.

Дослідження кінетики горіння коксів відбувалося у два етапи. На першому етапі визначалася залежність швидкості реакції від ступеня конверсії при сталій температурі ($\dot{W}_m = f(X)$ при $T = \text{const}$). Така залежність використовується у подальших розрахунках для визначення діапазону ступеня конверсії

вуглецю, в якому швидкість реакції для певної температури не залежить від ступеня конверсії (квазістаціонарної ділянки).

Залежність $\dot{W}_m = f(X)$ визначалася для коксів кожного окремого вугілля та сумішей при температурі 823 К. На рис.1, 2 показано залежності швидкості взаємодії коксів антрациту, пісного вугілля, газового вугілля та двох сумішей з киснем повітря від ступеня конверсії вуглецю для температури 823 К, а також криві, розраховані як середні швидкості конверсії від двох компонентів суміші.

З рис.1, 2 видно, що залежність швидкості конверсії вуглецю від ступеня вигорання для окремої марки вугілля має квазістаціонарну ділянку та характеризується практично постійною швидкістю вигорання, значення якої відхилялося не більше ніж на 10 %. Значення діапазону квазістаціонарної конверсії знаходиться у межах $X = 10\text{--}40$ % для антрациту, $X = 12\text{--}30$ % для пісного вугілля, $X = 10\text{--}50$ %, для газового вугілля. Для суміші коксів антрациту та газового вугілля залежність швидкості реакції від ступеня вигорання вуглецю не має чітко вираженої квазістаціонарної ділянки. На початку горіння суміші у діапазоні конверсії $X < 20$ % швидкість горіння наближена до газового вугілля (з урахуванням його частки у суміші), у діапазоні $X = 20\text{--}40$ % вона знижується та після $X = 40$ % досягає швидкості горіння антрациту.

Характер кривої пояснюється тим, що на початку горіння у суміші здебільшого вигоряє кокс газового вугілля, після його вигорання співвідношення коксів у суміші змінюється у бік збільшення частки коксу антрациту, що й обумовлює зниження швидкості горіння. Після досягнення ступеня конверсії $X = 40$ % кокс газового вугілля вигоряє, залишається лише кокс антрациту, що пояснює пологі ділянку при $X = 40\text{--}60$ %.

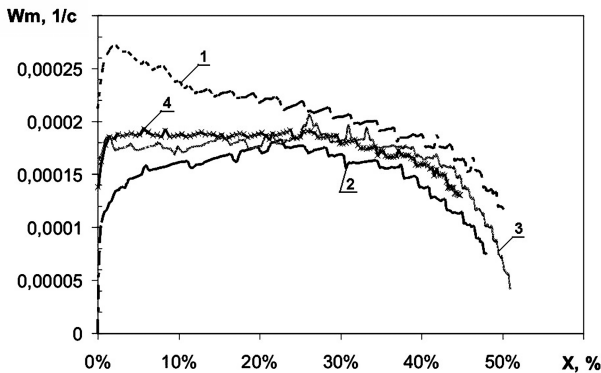


Рис.1. Залежність швидкості вигорання коксів вугілля марок АШ, П та їх сумішей у співвідношенні 1 : 1 за масою від ступеня конверсії вуглецю: 1 – П; 2 – АШ; 3 – суміші коксів АШ та П; 4 – розрахункова середня.

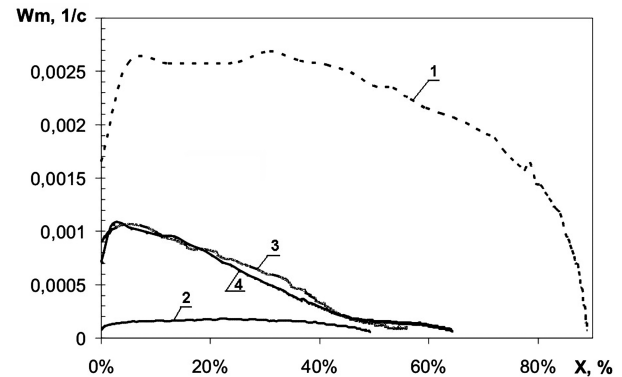


Рис. 2. Залежність швидкості вигорання коксів вугілля марок АШ, Г та їх сумішей у співвідношенні 1 : 1 за масою від ступеня конверсії: 1 – Г; 2 – АШ; 3 – суміші коксів АШ та Г; 4 – розрахункова середня.

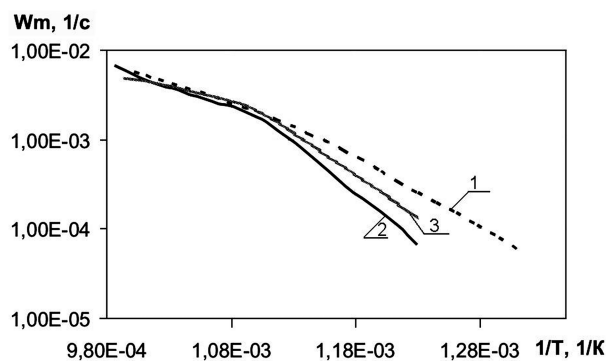


Рис.3. Залежність швидкості вигорання коксів вугілля марок АШ, П та їх суміші у співвідношенні 1:1 за масою від оберненої температури: 1 – П; 2 – АШ; 3 – суміш коксів АШ та П.

Для суміші коксів антрациту та пісного вугілля існує ділянка постійної швидкості реакції, яка не залежить від ступеня конверсії у діапазоні $X = 0-30\%$, хоча у цьому діапазоні конверсії компоненти суміші окремо не мають квазістаціонарних ділянок швидкості горіння. Полога ділянка для суміші утворилася внаслідок суперпозиції швидкостей компонентів суміші.

На другому етапі дослідження кінетики горіння сумішей коксів проводилися експерименти для отримання залежності швидкості реакції від температури $W_m = f(T)$. Температура збільшувалася ступінчасто з кроком 10 К, починаючи від температури 653 К.

На рис.3, 4 представлені криві швидкості взаємодії коксів антрациту, пісного та газового вугілля, а також їх суміші у масовому співвідношенні 1 : 1. Криві для окремих марок вугілля сформовані з точок, ступінь конверсії яких потрапляла в інтервал квазістаціонарності, визначений у попередніх дослідженнях.

З рис.3, 4 видно, що швидкість горіння сумішей знаходиться безпосередньо між антрацитом та пісним або газовим вугіллями окремо у діапазоні температур від 743 до 833 К. У цьому діапазоні температур швидкість горіння суміші антрациту та газового вугілля наближена до

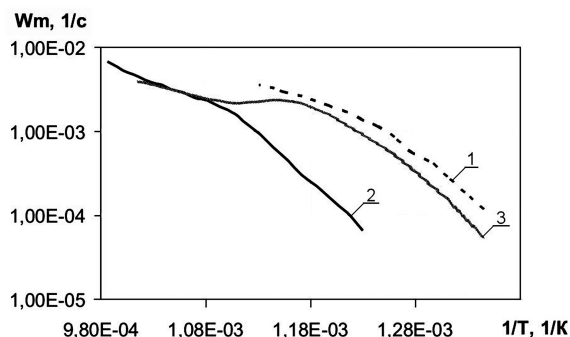


Рис.4. Залежність швидкості вигорання коксів вугілля марок АШ, Г та їх суміші у співвідношенні 1:1 за масою від оберненої температури: 1 – Г; 2 – АШ; 3 – суміш коксів АШ та Г.

швидкості горіння коксу газового вугілля. У діапазоні від 833 до 903 К швидкість реагування суміші не змінювалася та наближалася до швидкості антрациту, що можна пояснити зміною у бік збільшення частки коксу антрациту у суміші через вигорання коксу газового вугілля. Починаючи від температури 903 К швидкість реагування суміші відповідає швидкості горіння антрациту; це свідчить про те, що кокс газового вугілля у суміші вже вигорів. Подібні тенденції спостерігаються для суміші коксів антрациту та пісного вугілля.

Такий характер залежностей $W_m = f(X)$ при $T = \text{const}$ та $W_m = f(T)$ свідчить про те, що в умовах ізотермічності взаємовплив між частинками коксу відсутній, тобто компоненти суміші вигорять незалежно один від одного.

При розрахунку процесів спалювання вугільних сумішей у котлоагрегатах необхідно враховувати швидкість горіння кожної марки вугілля при однакових температурах газів. Отримані в експериментах дані дозволяють визначити кінетичні характеристики процесу взаємодії коксів окремих марок вугілля у наближенні Арреніуса, а також визначити діапазони внутрішньокінетичного та внутрішньодифузійного режимів реагування, які необхідні для розрахунку швидкості конверсії вуглецю. Ці характеристики були знайдені за методом найменших квадратів у арреніусовському наближенні для таких співвідношень:

$$W_m = k_0 \cdot \exp(-E_a / (R T_c));$$

$$W_m = k_0' C_0 \cdot \exp(-E_a / (R T_c));$$

$$W_m = \beta S_{\text{пит}} C_0 k_0'' \cdot \exp(-E_a / (R T_c));$$

$$\beta = 0,375 ([CO] + [CO_2]) / (0,5 [CO] + [CO_2]),$$

де k_0 – передекспоненційний множник, 1/с; E_a – енергія активації, Дж/моль; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К), $R = 8,314$; k_0' – константа швидкості реакції, 1/с; C_0 – концентрація кисню у зоні реакції, кг/м³; β – стехіометричний коефіцієнт перерахунку зменшення маси кисню у зменшення маси вуглецю ($0,375 \leq \beta \leq 0,75$; для 0,375 – єдиним продуктом реакції $C + O_2 \rightarrow CO_2$, для 0,75 – CO); $S_{\text{пит}}$ – питома (віднесена до одиниці зовнішньої поверхні) площа частинки, м²/кг; k_0'' – хімічна константа швидкості реакції, 1/с.

Значення енергії активації та хімічної константи швидкості реакції розраховувалися за методом найменших квадратів із залежності $W_m = f(T)$. Для цього зазначені вище вирази

ліанеризувалися з використанням таких співвідношень:

$$Y = A + B \cdot X;$$

$$Y = \ln (W_m T_q / (\beta \cdot 273));$$

$$A = \ln (C_0 k_0'' S_{\text{пшт}});$$

$$B = -E_a / R, X = 1 / T_q.$$

Значення коефіцієнтів А та В обчислюються за формулами:

$$A = [(\sum_{i=1}^N x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^N y_i) - (\sum_{i=1}^N x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^N x_i y_i)] / \Delta;$$

$$B = [N (\sum_{i=1}^N x_i y_i) - (\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N y_i)] / \Delta;$$

$$\Delta = N (\sum_{i=1}^N x_i^2) - (\sum_{i=1}^N x_i)^2,$$

де N — кількість експериментальних точок на різних температурних рівнях.

Отримані величини А та В використовувалися для розрахунку значень енергії активації та хімічної константи швидкості реакції:

$$E_a = B R;$$

$$k_0'' = \exp (A) / (C_0 S_{\text{пшт}}).$$

Аналіз отриманих результатів дав змогу виявити два режими реагування коксів вугілля марок АШ, П та Г розміром d = 90–200 мкм з киснем повітря. У діапазоні температур частинки до 900 К для коксу антрациту, 895 К для коксу пісного вугілля та 793 К для коксу газового вугілля має місце внутрішньокінетичне обмеження швидкості. Починаючи від температур частинок 910, 905 та 803 К для коксів антрациту, пісного та газового вугілля відповідно, переважає внутрішньодифузійне обмеження швидкості. Результати розрахунків кінетичних характеристик досліджуваних зразків наведено у таблиці.

Кінетичні характеристики швидкості взаємодії коксів вугілля марок АШ, П та Г з киснем повітря (середній d = 145 мкм)

Кокс	$k_0', \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с})$	$k_0'', \text{ м} / \text{с}$	$E_a, \text{ кДж} / \text{моль}$
Внутрішньокінетичний режим реагування ($\beta = 0,45$)			
АШ	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,02 \cdot 10^{10}$	221,7
П	$1,62 \cdot 10^7$	$1,35 \cdot 10^6$	152,5
Г	$1,83 \cdot 10^{11}$	$1,39 \cdot 10^{10}$	202,4
Внутрішньодифузійний режим реагування ($\beta = 0,75$)			
АШ	$6,18 \cdot 10^4$	3188	108,4
П	$1,6 \cdot 10^4$	798,6	96,5
Г	$7,39 \cdot 10^4$	3333	100,9

Для оцінки достовірності отриманих кінетичних характеристик ці дані були зіставлені з наявними константами з інших джерел [5]. Кінетичні константи, отримані О.Ю.Майстренком, були використані для розрахунку швидкостей у внутрішньокінетичній ($W_{в.к}$) та внутрішньодифузійній ($W_{в.д}$) областях для частинок коксів вугілля марок АШ, П та Г середнім розміром d = 145 мкм за виразами:

$$W_{в.к} = C_0 k_0'' \cdot 273 / T_q \cdot \exp (-E_a / (R T_q));$$

$$W_{в.д} = \beta \cdot 273 / T_q S_{\text{пшт}} C_0 k_0'' \times \exp (-E_a / (R T_q)).$$

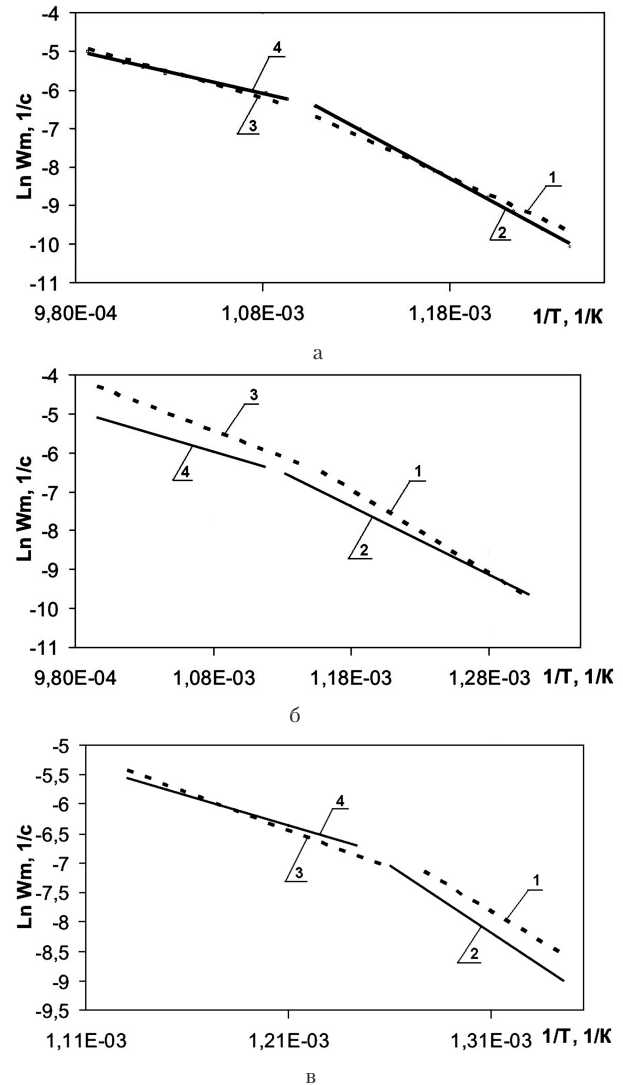


Рис.5. Залежність питомої швидкості вигорання коксу вугілля марки АШ (а), П (б), Г (в) від температури у вигляді $\ln(W_m) = f(1/T_q)$: 1, 3 — внутрішньокінетичний та внутрішньодифузійний режими за [5]; 2, 4 — отримані авторами відповідно до цих режимів.

Залежність питомої швидкості вигорання від температури подана у вигляді $\ln(W_m) = f(1/T_q)$ для кінетичних характеристик зразків, наведених у таблиці та отриманих О.Ю.Майстренком [5].

З рис.5,а видно, що для коксу вугілля марки АШ швидкість конверсії вуглецю, розрахованої за кінетичними константами, взятими з [5], для внутрішньокінетичної та внутрішньо- дифузійної областей вугілля з середнім розміром $d = 145$ мкм практично співпадає із значеннями швидкості конверсії, отриманими в експериментах.

Для коксу вугілля марки П швидкість, розрахована за кінетичними константами [5], вища за отриману в експерименті (рис.5,б), що пояснюється відмінностями у ступені метаморфізму зразків у рамках однієї марки. Так, у [5] досліджувалося вугілля з виходом летких $V^{daf} = 10-12\%$, а досліджуваний в експериментах зразок має більший ступінь метаморфізму ($V^{daf} = 8\%$).

На рис.5,в швидкість у внутрішньокінетичній області горіння коксу газового вугілля, отримана в експериментах, дещо нижча за швидкість, розраховану з використанням кінетичних констант О.Ю.Майстренка, а у внутрішньодифузійній — практично співпадає з нею. Температура переходу з внутрішньокінетичного до внутрішньодифузійного режиму для газового та пісного вугілля на 10 К вища за температуру, розраховану за [5]. Такі відмінності можна пояснити різними зольністю та середнім розміром досліджуваних частинок коксу порівняно з [5].

Таким чином, попри певні відмінності в значеннях кінетичних констант, пов'язані з розкидом реакційної здатності вугілля в межах кожної марки, встановлені тенденції температурної залежності питомої швидкості горіння та точки переходу між внутрішньокінетичним та внутрішньодифузійним режимами реагування підтверджують висновки роботи [5]. Для сумішей, зокрема коксів АШ та П, визначення кінетичних констант не має сенсу з огляду на відсутність квазістаціонарної ділянки реагування.

Висновки

Дослідження кінетики та динаміки вигорання сумішей коксів антрациту, пісного та газового вугілля показало, що в ізотермічних умовах взаємовплив між частинками коксу різних марок вугілля відсутній, тобто компоненти суміші вигоряють незалежно. Вплив більш реакційно-здатної компоненти на умови займання полягає не тільки у збільшенні виходу летких речовин суміші, а ще й у збільшенні тепловиділення на початковій ділянці факелу за рахунок більш швидкого горіння коксу. При розрахунку процесів спалювання вугільних сумішей у паливні котла необхідно враховувати швидкості горіння та динаміку вигорання кожної складової суміші при однакових для суміші температурі середовища та вмісті кисню.

Список літератури

1. Безценний І.В., Дунаєвська Н.І., Євтухов В.Я. Спалювання сумішей вугілля при роботі пило-вугільних котлоагрегатів // Новини енергетики. — 2009. — № 7. — С. 32–39.
2. Дєдов В.Г., Коземко О.М., Чернявський М.В. та ін. Досвід експериментального спалювання вугілля Г/А на Трипільській ТЕС // Енергетика та електрифікація. — 2010. — № 6. — С. 21–25.
3. Майстренко А.Ю., Соболев В.С., Голенко І.Л. Установа для исследования кинетики взаимодействия угольных коксов с кислородом и диоксидом углерода в кипящем слое // Высокотемпературное преобразование энергии. — Киев : Ин-т проблем энергосбережения АН УССР, 1989. — С. 102–106.
4. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения. — Л. : Энергоатомиздат, 1986. — 312 с.
5. Майстренко О.Ю. Основні закономірності горіння та газифікації високозольного вугілля в різних модифікаціях киплячого шару : Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Київ, 1999. — 38 с.

Надійшла до редакції 15.10.15

**Бесценный И.В., Дунаевская Н.И., канд. техн. наук,
Чернявский Н.В., канд. техн. наук**

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: mchernyavski@yandex.com

Определение кинетических характеристик взаимодействия коксов углей марок АШ, Т и Г с кислородом воздуха и особенности горения их смесей

Показана актуальность сжигания угольных смесей в пылеугольных котлоагрегатах ТЭС Украины, сжигающих антрацит. Исследовано взаимодействие коксов антрацита, тощего и газового углей с кислородом воздуха. Определены кинетические константы

скорости горения в приближении Аррениуса для внутрикинетического и внутридиффузионного режимов реагирования для частиц размером 90–200 мкм. Полученные результаты сопоставлены с результатами, полученными другими авторами. Показаны особенности взаимодействия смесей кокса антрацита с коксами тощего и газового углей с кислородом воздуха. Построены зависимости скорости реакции от степени конверсии при постоянной температуре, а также от температуры для коксов отдельных марок и смесей. Подтверждено предположение о независимости выгорания компонентов смеси в изотермических условиях. *Бібл. 5, рис. 5, табл. 1.*

Ключевые слова: угольные смеси, кокс, скорость горения, антрацит.

*Beztsennyj I.V., Dunayevska N.I., Candidate of Technical Sciences,
Cherniavsky N.V., Candidate of Technical Sciences*

*Coal Energy Technology Institute of National of Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: mchernyavski@yandex.com*

Determination of the Kinetic Characteristics of the Interaction of Anthracite, Lean Coal and Gas Coal Chars with Oxygen and Combustion Characteristics of their Blends

The article shows the urgency of coal blends burning in a anthracite boilers of Ukrainian TPPs. Studied the interaction of anthracite char, lean coal char and gas coal char with oxygen in the air and determine the kinetic constants of the burning rate in close to the Arrhenius for intrakinetic and intradiffusion reaction conditions for the particle size of 90–200 microns. The results are compared with results obtained by other authors. The article shows the features of the interaction of anthracite char with lean coal and gas coal char blends with oxygen in the air. The dependences of reaction rates of the conversion degree at a constant reaction temperature and the reaction rate of temperature for the single char and blends are constructed. The assumption of burnout independence between the blend components under isothermal conditions has been confirmed. *Bibl. 5, Fig. 5, Table 1.*

Key words: coal blends, char, burning rate, anthracite.

References

1. Beztsennyj I.V., Dunayevska N.I., Evtuhov V.Ya. [Combustion of coal in pulverized coal boilers], *Novyny energetyky [Energy news]*, 2009, (7), pp. 32–39. (Ukr.)
2. Dedov V.G., Kozemko O.M., Cherniavsky N.V., Sklyar P.T., Hut P.O. [Experience of experimental G/A coal combustion for Tripol'ska TPP], *Energetyka ta elektryfikacij [Energy and Electrification]*, 2010, (6), pp. 21–25. (Ukr.)
3. Maystrenko A.Yu., Sobolev V.S., Golenko I.L. [Apparatus for studying the kinetics of the interaction of coal with oxygen gas and carbon dioxide in a fluidized bed]. – Kiev : Institute for Energy Saving Problems AN USSR, 1989, pp. 102–106. (Rus.)
4. Pomerancev V.V., Arefev K.M., Ahmedov D.B., Konovich M.N., Korchunov Ju.N., Rundygina Ju.A., Shagalova S.L., Shestakov S.M. [Fundamentals of practical combustion theory], Leningrad : Energoatomizdat, 1986, 312 p. (Rus.)
5. Maystrenko O.Yu. [Basic laws of combustion and gasification of high-ash coal in various versions fluidized bed], *Avtoref. dys. ... dokt. tekhn. nauk.*, Kiev, 1999, 31 p. (Ukr.)

Received October 15, 2015