

УДК 662.61+662.63

М.М.Жовмір, канд.техн.наук (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Кінетика термолізу та вигорання часток твердого біопалива. Частина 3. Швидкість вигорання коксозольного залишку деревних і солом'яних гранул

Наведено результати гравіметричних дослідів з вигорання вуглецю коксозольного залишку, що утворюється після термолізу деревних та солом'яних гранул, у муфельній печі при 700°C при вільному доступі повітря. Аналітично отримана залежність для визначення швидкості вигорання вуглецю коксозольного залишку з використанням експериментальних даних про розміри циліндричної частки, її маси та тривалості повного вигорання. Бібл. 4, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: тверде біопаливо, гранули, термоліз, коксозольний залишок, вуглець, вигорання, швидкість.

ORCID: 0000-0001-6514-7474

Вступ. У першій частині даної роботи [1] було показано, що для підвищення інтенсивності спалювання та зменшення емісії забруднюючих речовин актуальним завданням є дослідження стадій згорання твердого біопалива, зокрема солом'яних гранул, спалювання яких є проблематичним, описано методику досліджень та експериментальну термогравіметричну установку, методику підготовки зразків палива до проведення досліджень. Дослідження стадій згорання солом'яних гранул проводяться паралельно з дослідженнями спалювання деревних гранул для виявлення схожих та відмінних характеристик процесів.

Мета роботи. В даній статті наведено результати експериментальних та експериментально-аналітичних досліджень швидкості вигорання одиничних часток коксового залишку, утвореного при термолізі солом'яних та деревних гранул.

Характеристика зразків твердого біопалива, вибраних для досліджень швидкості вигорання коксозольного залишку. Для проведення досліджень використовували гранули з тих же партій, що і при дослідженні кінетики термолізу [2]. Додатково використовували гранули, виготовлені з деревини з корою, які характеризуються підвищеним вмістом золи. Для проведення досліджень із бездефектних гранул вирізали циліндрики правильної форми діаметром, рівним їх діаметру, а довжину визначали залежно від задачі дослідження. Підготовлені висушені

зразки зберігали у герметичній тарі. Гранули із заданим вмістом вологи готували повільним відволоженням сухих гранул над поверхнею води в ексикаторі. Перед дослідом проводили вимірювання фактичних геометричних розмірів досліджуваних часток гранул.

Умови проведення експерименту. Визначення швидкості вигорання коксозольного залишку, утвореного із деревних та солом'яних гранул, проводили на експериментальній термогравіметричній установці за методикою [1], при цьому температура розігріву муфельної печі становила 700°C. В результаті експериментів отримували відеофайли із записом зміни маси частки гранули при її швидкому нагріванні в окислювальній атмосфері печі, а також візуально відмічені моменти часу спалахування летких довкола частки, завершення їх виділення і горіння, завершення вигорання вуглецю з утвореної частки коксозольного залишку.

Отримані результати. Спостереження за вигоранням коксозольного залишку дозволили сформулювати уявлення про особливості цього процесу. Відразу ж після завершення виходу летких частка утвореного коксозольного залишку є темною на фоні розжарених стінок муфельної печі, тобто можна припустити, що її температура є невисокою. Після виходу летких кисень повітря починав проникати до поверхні коксозольного залишку, спричиняв окислення вуглецю та роз-

жарення частки до яскравого світіння на фоні стінок муфельної печі. Це дає підстави стверджувати, що температура палаючої частки коксозольного залишку значно перевищувала температуру в просторі муфельної печі.

З окисленням вуглецю в поверхневому шарі фронт реагування зміщувався всередину коксозольного залишку глибше під шар утвореної золи як від бічної, так і від торцевих поверхонь. При завершенні вигорання на осі частки спостерігали кілька окремих жаринок, які безпосередньо перед згасанням світилися яскравіше. Найдовше світилися жаринки, розташовані на осі частки посередині її осевого виміру.

Виймаючи з печі залишки гранул відразу ж після завершення виходу летких речовин, встановили, що у корзині експериментальної установки залишалася частка коксозольного залишку, яка мала форму та розміри гранули. З вигоранням вуглецю утворюваний зольний залишок зберігав форму гранули, а розміри зазнавали усадки. При температурі печі 700°C із деревних гранул діаметром 6 мм та довжиною 14 мм утворювались частки золи діаметром 4,2 мм та довжиною 10,5 мм, що дозволяє визначити лінійне збігання в 1,33-1,43 рази; при цьому розраховане збігання зовнішньої поверхні становить 1,92 рази, а зменшення об'єму – в 2,72 рази. Частки золи, що утворюються з досліджених деревних гранул, мають пористу структуру, крихкі та легко руйнуються при дотику. Частки золи після згорання коксозольного залишку солом'яних гранул є більш щільними і їх руйнування відбувається лише при натискуванні з певним зусиллям.

На основі візуальних спостережень можна відмітити, що при температурі муфельної печі 700°C у початковий період вигорання коксозольного залишку формувався подвійний пограничний шар у вигляді палаючої плівки товщиною близько 1-1,5 мм довкола частки. З часом подвійний пограничний шар ставав непомітним, мож-

ливо, що він зміщувався у пористу матрицю вигорілого зольного залишку. Формування подвійного пограничного шару при нижчих температурах було менш помітним і більш вираженим при збільшенні температури в муфельній печі до 800°C.

Після завершення термогравіметричного експерименту уповільнено відтворювали відеофайл на персональному комп'ютері та отримували значення залишкової маси частки у час, що відрахований від моменту завершення виходу летких, тобто залежність $m_\tau = f(\tau)$ у вигляді сукупності експериментальних точок. Тут і далі будемо приймати, що після виходу летких у коксозольному залишку із горючих речовин міститься лише вуглець, а можливим залишковим вмістом інших горючих компонентів будемо нехтувати.

За отриманими первинними експериментальними даними визначали масу вуглецю в коксозольному залишку m_c як різницю поточної маси коксозольного залишку m_τ та маси золи m_a , отриманої після завершення його повного вигорання. На рис. 1 наведені отримані експериментальні дані про зміну в часі маси вуглецю в частці коксозольного залишку, що утворився після виходу летких із сухих деревних гранул діаметром 6 та 8 мм і масою в сухому стані 0,55 та 0,59 г відповідно, при окисленні в муфельній печі при температурі 700°C в умовах вільного доступу повітря. З наведених даних видно, що тривалість вигорання вуглецю з коксозольного залишку становить 335 с, що у 5 разів більше, ніж тривалість виходу летких. Слід відмітити, що швидкість зменшення маси вуглецю уповільнюється по мірі його вигорання зі зміщенням фронту горіння до центру. Подібний характер має вигорання вуглецю із коксозольного залишку солом'яних гранул (рис. 2), але при цьому зі збільшенням діаметра гранули чіткіше видно збільшення тривалості вигорання.

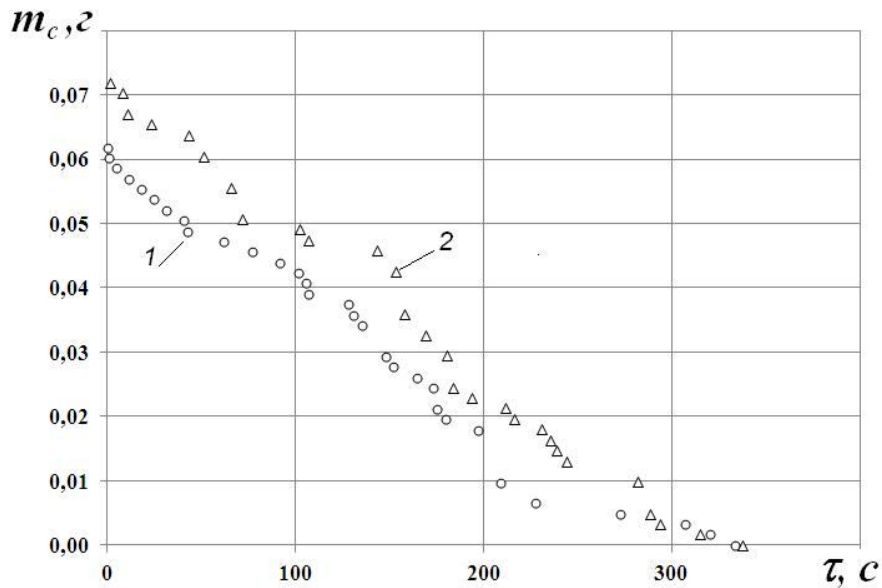


Рис. 1. Зміна маси вуглецю m_c в частці коксозольного залишку, що утворився після виходу летких із сухих деревних гранул: 1 – діаметр гранули 6 мм, маса 0,55 г; 2 – діаметр гранули 8 мм, маса 0,59 г.

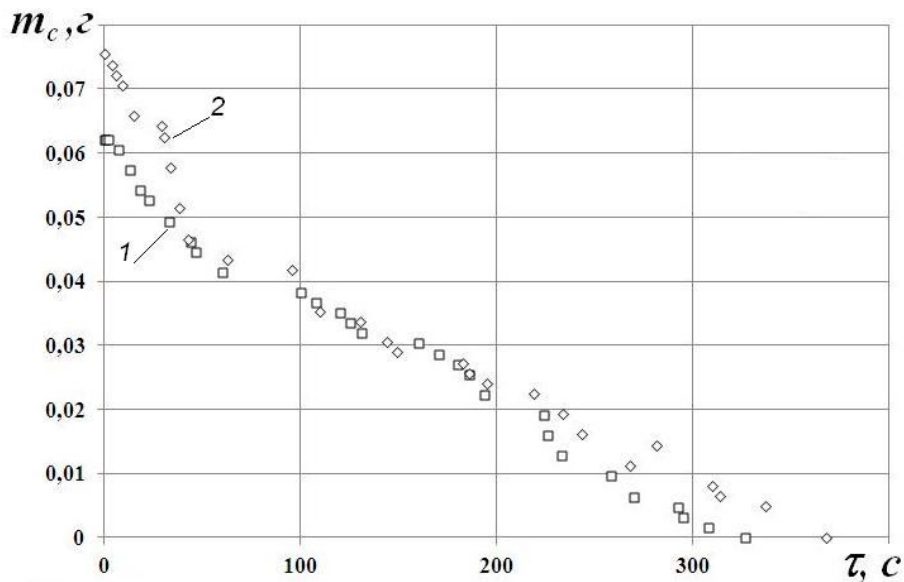


Рис. 2. Зміна маси вуглецю m_c в частці коксозольного залишку, що утворився після виходу летких із сухих солом'яних гранул: 1 – діаметр гранули 6 мм, маса 0,50 г; 2 – діаметр гранули 8 мм, маса 0,56 г.

Визначення швидкості вигорання коксозольного залишку за даними гравіметричних дослідів. У літературі, присвяченій кінетиці горіння, швидкість вигорання палива визначають як убуток маси частки палива за одиницю часу, віднесений до одиниці площі реагуючої поверхні [3]. Враховуючи прийняте припущення, що в коксозольному залишку реагує лише вуглець, при дискретних вимірюваннях убутку маси вуглецю Δm_c за проміжки часу $\Delta \tau$ для частки з площею реагуючої поверхні f швидкість вигорання вугле-

цю з коксозольного залишку w_c можна визначати за залежністю:

$$w_c = \frac{\Delta m_c}{f \Delta \tau} \tag{1}$$

За експериментальними даними, що наведені на рис. 1 та рис. 2, визначена швидкість вигорання вуглецю в початковий період w_c відносно початкової площі поверхні коксозольного залишку; отримані результати наведено в таблиці 1. Слід відмітити, що вимірювання досить малої зміни

маси коксозольного залишку навіть за значні проміжки часу $\Delta t = 10...20$ с при застосуванні ваг із дискретністю відліку маси 0,01 г призводить до

значної похибки визначання швидкості вигорання вуглецю. Отриманий результат скоріше є кількісною оцінкою швидкості процесу.

Таблиця 1. Швидкість вигорання вуглецю коксозольного залишку деревних та солом'яних гранул у початковий період

Шифр зразка гранул	Фактичний діаметр гранул, d	Вміст золи за сухою масою, A_d	Швидкість вигорання вуглецю коксозольного залишку за прямими вимірюваннями в початковий період, w_s
	d , мм	% мас.	г/(м ² с)
Деревні гранули			
ДГЧ-6	6	0,4	1,79...0,90
ДГЧ-8	8	0,4	1,50...0,90
Солом'яні гранули			
СГВ-6	6	10,1	1,38...1,13
СГВ-8 (партія №1)	8	11,4	2,08...1,05

За залежністю (1) можна визначати швидкість вигорання вуглецю лише у початковий період, коли площа реагуючої поверхні близька до площі зовнішньої поверхні коксозольного залишку. З вигоранням коксозольного залишку необхідно враховувати зменшення площі реагуючої поверхні, але безпосередні вимірювання на палаючій частці або опосередковані вимірювання по зображенню палаючої частки практично неможливі.

Визначення швидкості вигорання вуглецю коксозольного залишку експериментально-аналітичним методом. Розглянемо математичну модель процесу окислення коксозольного залишку, що утворився з циліндричної гранули радіусом R_0 та довжиною l з початковим об'ємом $V = \pi R_0^2 l$ та масою у сухому стані m_d .

Після виходу летких речовин маса вуглецю m_c у коксозольному залишку становить:

$$m_c = m_d(1 - A_d)(1 - V_{daf}), \quad (2)$$

де V_{daf} – вихід летких речовин на суху беззолну масу палива; A_d – вміст золи на суху масу палива, частка за масою.

На основі описаних спостережень приймаємо, що розміри утвореної частки коксозольного залишку рівні початковим розмірам гранули, а вуглець у ньому розподілений рівномірно по всьому його об'єму. Умовну густину вуглецю в коксозольному залишку ρ_c будемо визначати як відношення маси вуглецю m_c до початкового об'єму гранули V :

$$\rho_c = \frac{m_c}{V} = \rho_d(1 - A_d)(1 - V_{daf}), \quad (3)$$

де ρ_d – густина гранули у сухому стані, кг/м³.

Приймаємо, що бічна поверхня гранули є значно більшою від площі торців: $2\pi R_0 l \gg 2\pi R_0^2$, з цього випливає, що $l \gg R_0$. При такому припущенні реагуванням вуглецю на торцевих поверхнях можна знехтувати і вважати їх такими, що не реагують, тобто коксозольний залишок розглядається як безкінечний циліндр.

Як відмічено вище, при вигоранні вуглецю коксозольного залишку утворена зола не осипається і зберігає первісну форму гранули з певним збіганням геометричних розмірів, поверхні та об'єму, а фронт окислення поступово переміщується від периферії до центру. Очевидно, що площа реагуючої поверхні зменшується. Враховуючи, що швидкість зміни маси коксозольного залишку також зменшується по мірі вигорання (див. рис. 1 і рис. 2), тоді можна прийняти, що швидкість вигорання вуглецю з коксозольного залишку w_c , віднесена до площі циліндричної реагуючої поверхні, залишається однаковою при зміщенні фронту гетерофазної реакції до осі гранули. За безкінечно малий проміжок часу $d\tau$ маса вуглецю, окисленого у фронті реакції dm_c , буде становити:

$$dm_c = -2\pi R l w_c d\tau. \quad (4)$$

В результаті вигорання вуглецю фронт реакції переміститься від циліндричної поверхні з

поточним радіусом R до поверхні з радіусом $(R - dR)$. При цьому фронт горіння вуглецю пройде через об'єм коксозольного залишку dV :

$$dV = \pi R^2 l - \pi (R - dR)^2 l. \quad (5)$$

При проходженні фронту горіння вуглецю через об'єм коксозольного залишку dV в реакцію вступить маса вуглецю:

$$\begin{aligned} dm_c &= \rho_c dV = \rho_c l [\pi R^2 - \pi (R - dR)^2] = \\ &= \pi \rho_c l [2R dR - (dR)^2]. \end{aligned} \quad (6)$$

Відповідно до відомих методів математичного аналізу при розкритті виразу (6) складовою $(dR)^2$ можна знехтувати як величиною другого порядку малості. Прирівнявши вирази (4) та (6), після перетворень отримаємо диференціальне рівняння:

$$d\tau = -\frac{\rho_c}{w_c} dR. \quad (7)$$

Після інтегрування з урахуванням, що в початковий момент часу $\tau = 0$ поточне значення $R = R_0$, отримаємо залежність, яка визначає тривалість вигорання вуглецю у шарі від поверхні частки радіусом R_0 до внутрішньої поверхні з радіусом R :

$$\tau = \frac{\rho_c}{w_c} (R_0 - R). \quad (8)$$

Тривалість повного вигорання вуглецю τ_b із частки коксозольного залишку відповідає досягненню фронтом реакції поточного радіуса $R = 0$, тоді:

$$\tau_b = \frac{\rho_c}{w_c} R_0. \quad (9)$$

Час повного вигорання вуглецю з коксозольного залишку τ_b можна визначити експериментально, а швидкість вигорання вуглецю знайти за залежністю, яка випливає з виразу (9):

$$w_c = \frac{\rho_c}{\tau_b} R_0. \quad (10)$$

На рис. 3 наведено експериментальні дані про тривалість вигорання коксозольного залишку залежно від довжини часток соснових гранул ДГЧ-6 діаметром 6 мм при температурі в муфельній печі 700°C. Тривалість вигорання коксозольного залишку збільшується зі зростанням довжини гранул і при максимально можливих довжинах близько 40 мм досягає максимального значення 393 с. Як видно з наведених даних, допустимий стандартами вміст вологи в деревних гранулах до 10% мас. не має істотного впливу на тривалість вигорання утворюваного коксозольного залишку.

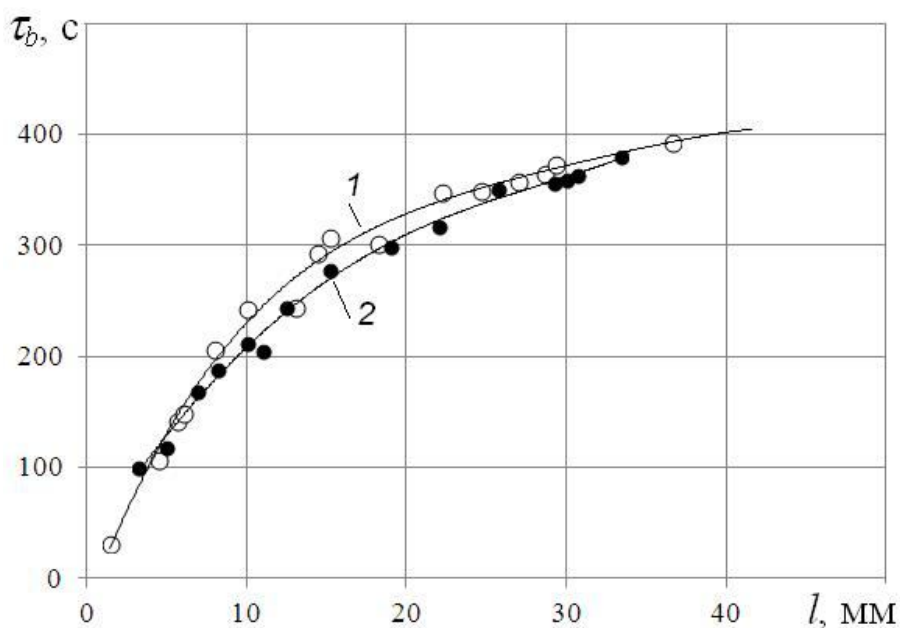


Рис. 3. Тривалість вигорання коксозольного залишку залежно від довжини часток деревних гранул ДГЧ-6 діаметром 6 мм: 1 – частки сухих гранул; 2 – частки гранул із вмістом вологи 10,1% мас.

Залежність (10) отримана з припущенням, що гранула має форму безкінечного циліндра – тобто задача розглядалася як одновимірною в циліндричній системі координат. Довжина часток у партії гранул обмежується вимогами стандарту [4]. В отриманих партіях гранул частки довжиною 40 мм і більше або відсутні, або їх вміст є незначним. З досліджуваних партій гранул відбирали найдовші гранули і з них вирізали 5-7 циліндрів правильної форми максимальною довжиною від 18 до 48 мм. Після висушування до постійної маси при 105°C зразки зважували та вимірювали фактичні геометричні розміри, що дозволяє визначити необхідні для розрахунків величини для кожної частки.

Вигорання реальних циліндричних часток коксозольного залишку, що мають скінченну довжину, відбувається не тільки по циліндричній поверхні, але й із торців, що спричиняє зменшення тривалості вигорання коротших часток у порівнянні з довгими (див. рис. 3). З метою усунення чи зменшення впливу торцевого вигорання часток на торці підготовлених гранул наносили тепло- та газоізолюючі шари шляхом приклеювання пластинок з мулітокремнеземистої вати товщиною 3 мм (теплоізолюючий шар) за допомогою вогнетривкого клею (виробник GEB, Франція) шаром близько 0,5 мм (газоізолюючий шар). Після цього підготовлені зразки з ізольованими торцями висушувалися в сушильній шафі при температурі 105°C до постійної маси.

З використанням підготовлених зразків визначали тривалість вигорання вуглецю з коксозольного залишку як період часу від завершення виходу летких до завершення повного вигорання косоного залишку в муфельній печі при температурі 700°C при вільному доступі повітря. Отримані значення тривалості вигорання вуглецю для часток одного діаметра, але різної довжини, були близькими з відхиленням від середнього значення

на 5-12% для гранул діаметром 6 мм та до 20% для гранул діаметром 8 мм. З використанням отриманих даних за залежністю (10) визначали швидкість вигорання коксозольного залишку для кожної з досліджених часток. Максимальна відносна похибка одиничних вимірювань швидкості вигорання оцінюється величиною $\pm 7,0\%$, але ряд отриманих значень відрізнялися між собою на величину більше 14%.

Це вказує на те, що на тривалість вигорання коксозольного залишку впливають невраховані чинники, зокрема скінченна довжина гранул та неоднорідність їх внутрішньої структури. Коефіцієнт кореляції між часом вигорання та довжиною досліджуваних зразків гранул, виготовлених із чистої деревини або соломи, становив від $-0,37$ до $+0,33$, що свідчить про досягнення практичної відсутності функціональної залежності між ними. Разом з тим для зразків гранул із деревини з корою коефіцієнт кореляції мав високе значення $0,6-0,7$. На стадії завершення вигорання коксозольного залишку в ньому спостерігалися окремі часточки, які продовжували "світитися" після завершення вигорання в зонах, розташованих поряд на осі частки, що свідчить про неоднорідність їх структури і обумовлює збільшення загальної тривалості процесу. На основі статистичної обробки результатів багатократного повторення вимірювань визначено середню швидкість вигорання коксозольного залишку для досліджених зразків деревних та солом'яних гранул, а також довірчий інтервал при довірчій імовірності $\alpha = 0,90$; отримані дані наведено в таблиці 2.

З порівняння даних таблиць 1 та 2 видно, що для відповідних зразків гранул швидкість вигорання коксозольного залишку, що визначена експериментально-аналітичним методом, за порядком величини є близькою до значень, отриманих на основі прямих гравіметричних вимірювань у початковий період вигорання.

Таблиця 2. Швидкість вигорання вуглецю з коксозольного залишку довгих гранул, визначена експериментально-аналітичним методом

Шифр гранул	Фактичний діаметр гранул	Вміст золи на суху масу	Густина часток у сухому стані	Середня швидкість вигорання	Довірчий інтервал швидкості вигорання
	d , мм	A_d , %мас.	ρ_d , кг/м ³	w_{cs} , г/(м ² с)	ϵw_{cs} , г/(м ² с)
Гранули деревні					
ДГЧ-6 (соснова деревина)	6,0	0,40	1135...1305	1,62	±0,09
ДГП-6 (деревина з корою)	5,8...6,8	1,15	1047...1240	1,28	±0,24
ДГЧ-8 (соснова деревина)	8,0	0,40	1120...1175	1,25	±0,12
ДГБ-8 (дубова деревина з корою)	7,8	1,44	1177...1300	1,11	±0,20
ДГК-8 (деревина з корою)	8,0	7,01	1144...1190	1,29	±0,23
Гранули солом'яні					
СГУ-6	5,8...6,0	5,45	1102...1248	1,68	±0,21
СГК-8Е	8,1	7,65	987...1033	0,95	±0,06
СГВ-8 (партія 2)	8,0	9,0	1109...1146	0,90	±0,06
СГВ-8 (партія 1)	8,0	11,4	1227...1304	1,06	±0,27

З даних таблиці 2 можна зробити висновок, що швидкість вигорання коксозольного залишку солом'яних та деревних гранул діаметром 6 мм близька за значенням. Швидкість вигорання зменшується зі збільшенням діаметра гранули, з якої утворився коксозольний залишок, що для солом'яних гранул проявляється більшою мірою. Це може вказувати на те, що на швидкість вигорання при вільному доступі повітря впливають явища масообміну.

Висновки. 1. Експериментально встановлено, що вигорання коксозольного залишку, утвореного з деревних та солом'яних гранул, відбувається пошарово зі зміщенням фронту реагування всередину коксозольного залишку глибше під шар утвореної золи. З вигоранням вуглецю утворений зольний залишок зберігав форму гранули, а розміри зазнавали усадки.

2. Запропоновано математичну модель вигорання вуглецю з коксозольного залишку і на її основі отримано залежність для визначання швидкості вигорання вуглецю коксозольного залишку з використанням експериментальних даних про розміри циліндричної частки, її маси та тривалентності повного вигорання довгих часток.

3. Швидкість вигорання вуглецю з коксозольного залишку, що утворився з деревних та со-

лом'яних гранул діаметром 6 мм, при температурі муфельної печі 700°C та вільному доступі повітря становить 1,6 г/(м²с), а зі збільшенням діаметра гранул до 8 мм зменшується в 1,3-1,8 рази.

1. Жовмір М.М. Кінетика термолізу та вигорання часток твердого біопалива. Частина 1. Експериментальна установка та методика проведення досліджень // Відновлювана енергетика. – 2016, №2 – С. 73-78.

2. Жовмір М.М. Кінетика термолізу та вигорання часток твердого біопалива. Частина 2. Швидкість термолізу сухих та вологих деревних і солом'яних гранул // Відновлювана енергетика. – 2016, №3 – С. 65-72.

3. Основы практической теории горения. Под ред. В.В. Померанцева. Учебное пособие. – Л. : Энергия, 1973. – 264 с.

4. *Биотопливо* твердое. Технические характеристики и классы топлива. Часть 1. Общие требования: ГОСТ Р 54220-2010 (ЕН 14961-1:2010) / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М. : Стандартинформ, 2012.

REFERENCES

1. Zhovmir M. Kinetics of thermolysis and burning of solid biofuels particles. Part 1. Experimental installation and research procedure // Vidnovliuvana energetyka. – 2016. – № 2. – P. 73–78. (Ukr)

2. Zhovmir M. Kinetics of thermolysis and burning of solid biofuels particles. Part 2. Thermolysis rate of dry and wet wood and straw pellets // Vidnovliuvana energetyka. – 2016. – № 3. – P. 65–72. (Ukr)

3. *Basics of practical combustion theory*. Edited by V/V/ Pomerantsev. Tutorial. – L. : Energiya, 1973. – 264 p. (Rus)

4. *Solid biofuel*. Fuel specifications and classes. Part 1. General requirements: GOST R 54220–2012 (EN 14961–1:2010) / Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. – M. : Standartinform, 2012. (Rus)

Н.М.Жовмир, канд.техн. наук (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

Кинетика термолитиза и выгорания частиц твердого биотоплива. Часть 3. Скорость выгорания коксозольного остатка древесных и соломенных гранул

Приведены результаты гравиметрических экспериментов по выгоранию углерода из коксозольного остатка, образующегося после термолитиза древесных и соломенных гранул, в муфельной печи при 700°C при свободном доступе воздуха. Аналитически получена зависимость для определения скорости выгорания углерода коксозольного остатка с использованием экспериментальных данных о размерах цилиндрической частицы, ее массы и длительности полного выгорания. Библ. 4, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: твердое биотопливо, гранулы, термолитиз, коксозольный остаток, углерод, выгорание, скорость.

Zhovmir M. (Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv)

Kinetics of thermolysis and burning of solid biofuel particles. Part 3. Burning out rate of cokeash residue of wood and straw pellets

Results of gravimetric experiments on carbon burning out from cokeash residue formed after thermolysis of wood and straw pellets in a muffle furnace at 700°C at free access of air are presented. Equation for determining rate of carbon burning out from cokeash residue based at dimensions of cylindrical particle, its mass and burnout duration is analytically derived. References 4, tables 2, figures 3.

Keywords: solid biofuels, pellets, thermolysis, cokeash residue, carbon, burning out, rate

SYNOPSIS

Early in the first part of this work it was shown that to enhance combustion intensity and reduce pollutants emission the

researches stages of solid biofuels combustion are relevant, described experimental thermogravimetric installation, procedures of fuel samples preparation and experiments.

This paper provides results of experimental and analytical-experimental research on burning out rate of single particles of cokeash residue formed after straw and wood pellets thermolysis. The study was carried out at temperature in muffle furnace 700°C with free air access. As a result of experiments video recordings of particles mass change at volatiles release and carbon burning out in oxidative atmosphere of furnace were obtained, as well as visually marked time moments of volatile ignition around the particle and that at completion of volatile release and burning, and moment of carbon complete burning out from formed cokeash particle.

After completing of the volatile release the formed particle of cokeash residue has shape and size of pellet. With carbon burning out particle of cokeash residue retained the shape of pellet, but its dimensions got shrinkage.

Formed cokeash particle is dark against the glowing furnace walls, and then oxygen started penetrate the surface of cokeash residue resulting in the carbon oxidation and particle heating up to bright glowing. With carbon oxidation in surface layer the reaction front shifts inside the cokeash residue deeper under the layer of formed ash, with corresponding decrease of reacting surface.

Proposed mathematical model of carbon burning out from endless long cylindrical particles of cokeash residue takes into account reduction of reaction surface area. Dependence for determining rate of carbon burning out w_c is based on experimental data about dimensions of long cylindrical particle, its mass and duration of complete burnout:

$$w_c = \frac{\rho_c}{\tau_b} R_0$$

here ρ_c – carbon density in cokeash residue; R_0 – initial radius of cylindrical pellet; τ_b – duration of carbon complete burnout from cokeash residue.

Rate of carbon burning out from cokeash residue formed from 6 mm wood and straw pellets at furnace temperature 700°C and free air access is near 1.6 g/(m²s), and at pellets diameter increase to 8 mm it decreases in 1.3–1.8 time.

Стаття надійшла до редакції 07.11.16

Остаточна версія 05.12.16