

УДК 662.61+662.63

## КІНЕТИКА ТЕРМОЛІЗУ ТА ВИГОРАННЯ ЧАСТОК ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА. ЧАСТИНА 4. ВПЛИВ АНІЗОТРОПІЇ ГРАНУЛ НА ШВИДКІСТЬ ОКИСЛЕННЯ ВУГЛЕЦЮ З КОКСОЗОЛЬНОГО ЗАЛИШКУ В ОСЬОВОМУ ТА РАДІАЛЬНОМУ НАПРЯМКАХ

**М.М. Жовмір**, канд. техн. наук,

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, м.Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А,

тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: [renewable@ukr.net](mailto:renewable@ukr.net)

ORCID: 0000-0001-6514-7474

*Висунуто припущення про вплив анізотропії циліндричних гранул біопалива на швидкість окислення вуглецю в осьовому та радіальному напрямках. Аналітично отримана залежність для визначення швидкості вигорання вуглецю з коксозольного залишку гранул біопалива в осьовому напрямку з використанням експериментальних даних про розміри круглої пластини біопалива, її маси та тривалості повного вигорання. Експериментально визначена швидкість окислення вуглецю з коксозольного залишку в осьовому напрямку значно вища ніж у радіальному, що необхідно враховувати при розрахунку тривалості горіння гранул. Бібл. 9, табл. 2, рис. 3.*

**Ключові слова:** тверде біопаливо, гранули, коксозольний залишок, вуглець, вигорання, швидкість, анізотропія

## KINETICS OF THERMOLYSIS AND BURNING OF SOLID BIOFUEL PARTICLES. PART 4. INFLUENCE OF PELLETS ANISOTROPY ON OXIDATION RATE OF CARBON FROM COKEASH RESIDUE IN AXIAL AND RADIAL DIRECTIONS

**Zhovmir M.**,

Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Hnata Khotkevycha, 20A, 02094, Kyiv-94, Ukraine,

Phone/fax: +38-044-206-28-09, e-mail: [renewable@ukr.net](mailto:renewable@ukr.net)

ORCID: 0000-0001-6514-7474

*Influence of anisotropy of cylindrical biofuels pellets on carbon oxidation rate in axial and radial directions is assumed. Equation for determining carbon burning out rate from cokeash residue in axial direction based at dimensions of round plate, its mass and burnout duration is analytically derived. Experimentally found carbon burning out rate from cokeash residue of pellet in axial direction is higher than that in radial direction that should be taken into account at calculation of pellets burning duration. References 9, tables 2, figures 3.*

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



Жовмір М.М.,  
Zhovmir M.

**Відомості про автора:** старший науковий співробітник відділу відновлюваних органічних енергоносіїв Інституту відновлюваної енергетики НАН України; доцент кафедри відновлюваних джерел енергії НТУУ «Київський політехнічний інститут»

**Сфера наукових інтересів:** теплоенергетика, біоенергетика, спалювання та термохімічна переробка біомаси

**Публікації:** 132 статті та тези доповідей, 7 патентів

© М.М.Жовмір, 2017

**Скорочення та умовні позначення**

- $\delta_0$  – напівтовщина круглої пластини вирізаної з гранули у поперечному напрямку, м;  
 $\delta$  – координата фронту горіння відрахована від середини пластини, м;  
 $\rho_c$  – умовна густина вуглецю в коксозольному залишку,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\rho_d$  – середня густина круглої пластини вирізаної з гранули у сухому стані  $\text{кг/м}^3$   
 $\rho_{dp}$  – густина гранули у сухому стані,  $\text{кг/м}^3$   
 $\rho_{di}$  – початкова густина часток біомаси, що використана для пресування гранул,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\tau$  – час, с;  
 $\tau_{ba}$  – тривалість повного вигорання вуглецю з пластини коксозольного залишку, с;  
 $A_d$  – вміст золи на суху масу палива, частка за масою;  
 $d, R$  – діаметр та радіус гранули, м;  
 $h$  – товщина круглої пластини вирізаної з гранули у поперечному напрямку, м;  
 $k$  – коригувальний множник;  
 $m_c$  – маса вуглецю у частці коксозольного залишку, кг;  
 $m_d$  – маса пластини біопалива у сухому стані, кг;  
 $V$  – об'єм пластини,  $\text{м}^3$ ;  
 $V_{daf}$  – вихід летких речовин на суху беззолну масу палива, частка за масою;  
 $w_{cr}$  – швидкість окислення вуглецю з коксозольного залишку в радіальному напрямку,  $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ ;  
 $w_{ca}$  – швидкість окислення вуглецю з коксозольного залишку за осьовим напрямком,  $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ .

**Вступ.** В попередній частині роботи [1] було визначено швидкість окислення вуглецю коксозольного залишку з використанням довгих деревних та солом'яних гранул з ізольованими торцями. Вважаючи, що швидкість окислення вуглецю по всій поверхні коксозольного залишку є однаковою, на основі отриманих даних намагалися розрахувати тривалість вигорання коксозольного залишку гранул різної довжини. Отримали задовільний збіг розрахункових та експериментальних даних для довгих гранул – довжиною більше 20-25 мм, але для коротших гранул розрахункова тривалість вигорання вуглецю з коксозольного залишку значно перевищувала експериментально визначену. Зазначимо, що у промислових партіях деревних та солом'яних гранулах переважають частки довжиною менше 20 мм, а тому належний розрахунок тривалості їх вигорання є важливим при спалюванні поліфракційного палива.

Для виявлення можливих причин вказаних розбіжностей провели додаткові спостереження за ходом вигорання вуглецю з коксозольного залишку гранул. Спостереження показали наступні особливості цього процесу:

- візуально відмічено, що вигорання вуглецю з коксозольного залишку відбувається як по циліндричній бічній поверхні, так і з плоских торців гранул; при цьому майже плоскі фронти

окислення вуглецю від торців зміщуються до середини частки з швидкістю більшою, ніж циліндричний фронт окислення вуглецю зміщується по радіусу до осі частки;

- торці коксозольного залишку на фоні муфельної печі світяться яскравіше, ніж циліндрична поверхня залишку, що може свідчити про їх вищу температуру, і при майже однакових умовах теплообміну – про більше виділення енергії та більшу швидкість реагування вуглецю на торцях;

- візуально відмічено, що завершення окислення вуглецю відбувається у вигляді одиночної яскравої точки посередині довжини на осі частки коксозольного залишку.

Виявлені особливості дозволяють припустити, що швидкість окислення вуглецю коксозольного залишку циліндричних гранул залежить від напрямку – в осьовому напрямку є вищою, ніж у радіальному. У відомих основоположних роботах з горіння палив [2, 3] та дослідженнях швидкості вигорання вугілля, деревного вугілля, деревини та пресованих деревних гранул [4, 5] частки палива по замовчуванню вважаються ізотропними, а швидкість вигорання вуглецю вважається однаковою для всієї поверхні частки.

Зміну властивостей залежно від напрямку прийнято називати анізотропією. Висунуте припущення щодо відмінності швидкостей окислен-

ня вуглецю коксозольного залишку гранул в осьовому та радіальному напрямках можна пояснити анізотропією фізичних властивостей гранул твердого біопалива.

Паливні гранули виробляють із таких матеріалів, як деревина, солома та стебла сільськогосподарських культур, які є пористими матеріалами. Середня густина сухої соснової деревини становить 380-400 кг/м<sup>3</sup>. При виробництві гранул матеріал подрібнюють до часток розміром менше 1 мм та пресують із досягненням густини гранул 1050-1300 кг/м<sup>3</sup>.

Густина стінок сухої пшеничної соломи становить 395-480 кг/м<sup>3</sup>, а густина пресованих солом'яних гранул – 980-1300 кг/м<sup>3</sup>.

Відповідно до сучасних уявлень, у найбільш поширених пресах з круглою та циліндричною матрицею пресування гранул з подрібненої біомаси відбувається у три стадії [6]:

- при русі нажимного ролика на поверхні матриці утворюється тимчасовий стиснутий шар

матеріалу (стиснутий у напрямку поздовжньої осі утворюваної гранули – доповнення автора);

- стиснутий матеріал проштовхується в канали преса і тече в них;

- при течії матеріалу в каналах вникають сили тертя, що протидіють силам пресування і зумовлюють пресування стиснутого матеріалу.

При проходженні наступного ролика довжина гранули, яка формується в каналі преса, збільшується на величину, що визначається товщиною стиснутого шару на поверхні матриці. Можна допустити, що в осьовому (поздовжньому) напрямку ущільнення матеріалу є більш значним, ніж у поперечному (радіальному). Розглядаючи гранули, можна відмітити, що їх структура є шаруватою, внаслідок чого вони легко розламуються уперек на коротші лускоподібні частки (рис. 1). Як видно з рисунка, поперечний розлом гранули не є плоским, а має форму наближену до параболоїда. Гранулу можна розглядати як сукупність лускоподібних часток, впресованих одна в одну з формуванням циліндричного тіла (рис. 2).

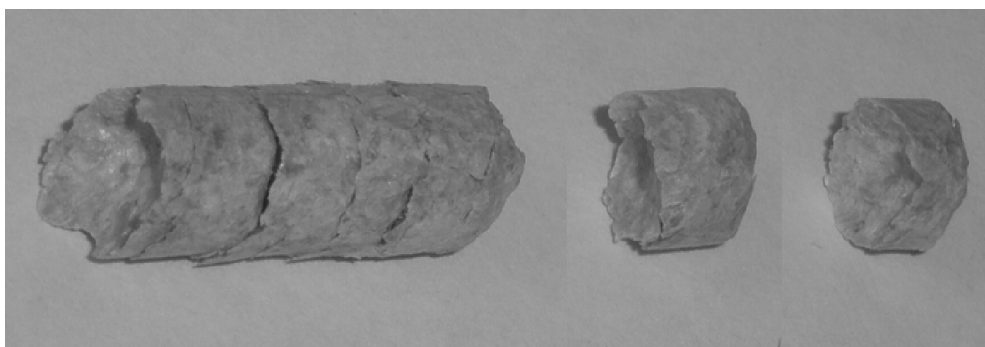


Рис. 1. Вигляд гранули та лускоподібних часток.  
Fig.1. View of pellet and scalelike particles.

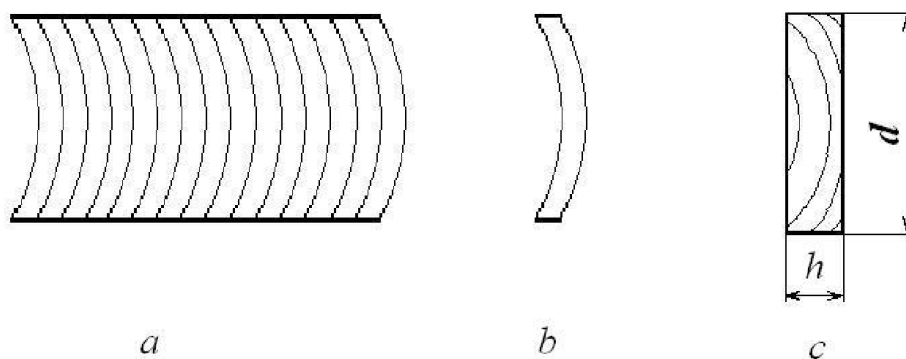


Рис. 2. Структура пресованої гранули біопалива: *a* – поздовжній переріз гранули; *b* – окрема луска; *c* – структура тонкого зразка при поперечному розрізанні гранули.

Fig. 2. Structure of pressed pellet of biofuel: *a* – longitudinal section of pellet; *b* – separate scale; *c* – structure of thin plate at cross section of pellet.

На анізотропність гранул звертають увагу, але визначення теплопровідності гранул здійснюють вимірюванням теплопровідності їх засипки та розрахунку середньої теплопровідності часток без врахування відмінності за напрямками [7]. Відомо, що теплопровідність пористих тіл зростає зі зростанням їх густини [8]. У зв'язку з переважаючим ущільненням матеріалу гранули в осьовому напрямку можна припустити, що густина та теплопровідність гранули в осьовому напрямку повинні бути вищими, ніж у радіальному, тобто гранула пресованого біопалива та утворений з неї коксозольний залишок є анізотропними. Теплопровідність в анізотропних тілах, переважно кристалах та шаруватих тілах, розглядається в [9]. Інтенсифікація явищ переносу (зокрема теплопровідності) за напрямком з більшою густиною матеріалу в підсумку може обумовлювати збільшення швидкості окислення вуглецю з коксозольного залишку пресованого біопалива в осьовому (поздовжньому) напрямку. В попередній частині роботи [1] фактично здійснили вимірювання швидкості окислення вуглецю з коксозольного залишку в радіальному напрямку  $w_{cr}$  з використанням довгих гранул з ізольованими торцями.

**Мета роботи.** В даній статті наведено результати експериментальних вимірювань швидкості

окислення вуглецю з коксозольного залишку гранул в осьовому (поздовжньому) напрямку  $w_{ca}$ .

**Методика визначення швидкості вигорання вуглецю за осьовим (поздовжнім) напрямком коксозольного залишку гранули.**

Розглядаємо вигорання вуглецю з коксозольного залишку, що утворився після виходу летких із круглої пластини, що вирізана з гранули біопалива перпендикулярно її поздовжній осі (рис. 2, с). Приймаємо, що розміри утвореної частки коксозольного залишку рівні початковим розмірам круглої пластинки, вирізаної з гранули біопалива.

Утворений коксозольний залишок також можна вважати круглою пластиною, що має товщину  $h = 2\delta_0$ , де  $\delta_0$  – напівтовщина пластини, використовується як її характерний розмір (рис. 3). Пластина обмежена циліндром з радіусом, що дорівнює радіусу гранули  $R$ . Початковий об'єм пластини становить  $V = \pi R^2 2\delta_0$ , а маса в сухому стані  $m_d$ . Після виходу летких речовин маса вуглецю  $m_c$  у коксозольному залишку становить:

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

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

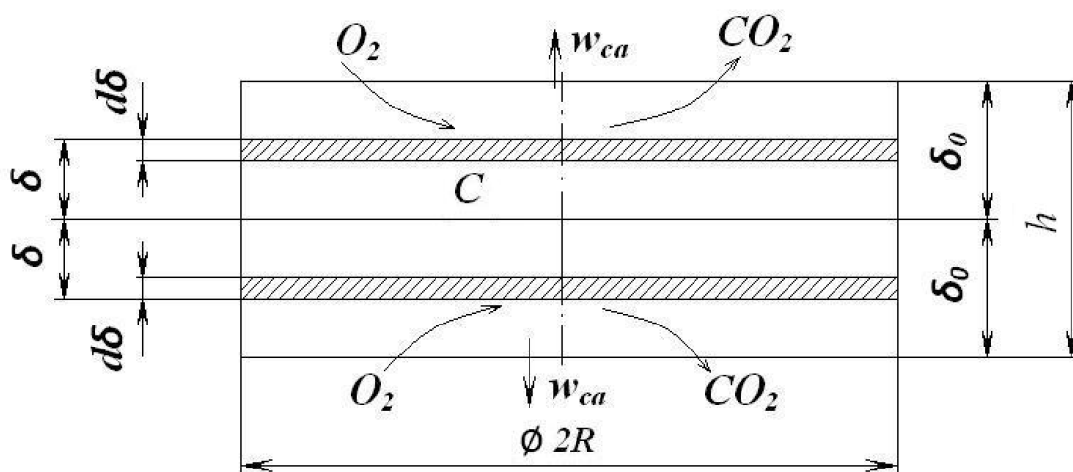


Рис. 3. Схема до математичної моделі вигорання круглої пластини коксозольного залишку гранули в осьовому напрямку.

Fig. 3. Scheme to mathematical model of carbon burning out in axial direction from round plate of cokeash residue of pellet.

Середню умовну густину вуглецю в коксозольному залишку  $\rho_c$  будемо визначати як відношення маси вуглецю  $m_c$  до початкового об'єму пластини  $V$ :

$$\rho_c = \frac{m_c}{V} = \rho_d(1 - A_d)(1 - V_{daf}), \quad (2)$$

де  $\rho_d$  – середня густина круглої пластини, вирізаної з гранули у сухому стані, кг/м<sup>3</sup>.

Приймаємо, що бічна поверхня круглої пластини є значно меншою від площі торців  $2\pi R \cdot 2\delta_0 < 2 \cdot \pi R^2$ , тобто товщина пластини менша від радіуса гранули:  $2\delta_0 < R$ . При такому припущенні реагуванням вуглецю на бічній поверхні будемо нехтувати і вважати їх такими, що не реагують, тобто кругла пластинка коксозольного залишку розглядається як тонка безкінечна пластинка.

Під дією окислювача у пластині формується два плоскі фронти окислення вуглецю, які поступово переміщуються від торців до середини. Можна прийняти, що швидкість вигорання вуглецю з коксозольного залишку в осьовому напрямку  $w_{ca}$ , віднесена до площі торцевої реагуючої поверхні, залишається однаковою при зміщенні фронту гетерофазної реакції до середини пластини. За безкінечно малий проміжок часу  $d\tau$  маса вуглецю  $dm_c$ , що окислений у двох фронтах, буде становити:

$$dm_c = -2\pi R^2 w_{ca} d\tau. \quad (3)$$

За проміжок часу  $d\tau$  в результаті вигорання вуглецю фронти реакції зміщуються від положення  $\delta$  на  $d\delta$  та займають положення  $\delta - d\delta$ . При цьому два фронти горіння вуглецю пройдуть через об'єм коксозольного залишку  $dV$ :

$$dV = \pi R^2 2d\delta - \pi R^2 2(\delta - d\delta) = 2\pi R^2 d\delta. \quad (4)$$

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

$$dm_c = \rho_c dV = \rho_c 2\pi R^2 d\delta. \quad (5)$$

Прирівнявши вирази (3) та (5), після перетворень отримаємо диференціальне рівняння:

$$d\tau = -\frac{\rho_c}{w_{ca}} d\delta. \quad (6)$$

Після інтегрування з урахуванням, що у початковий момент часу  $\tau = 0$  поточне значення  $\delta = \delta_0$ , отримаємо залежність, яка визначає тривалість вигорання вуглецю в шарі від торцевої поверхні частки  $\delta_0$  до внутрішньої поверхні на відстані  $\delta$  від середини пластини:

$$\tau = \frac{\rho_c}{w_{ca}} (\delta_0 - \delta). \quad (7)$$

Тривалість повного вигорання вуглецю  $\tau_{ba}$  із пластини коксозольного залишку відповідає досягненню фронтами реакції до середини пластини  $\delta = 0$ , тоді:

$$\tau_{ba} = \frac{\rho_c}{w_{ca}} \delta_0. \quad (8)$$

Для тонкої круглої пластини, вирізаної з гранули, експериментально можна визначити її початковий характерний розмір  $\delta_0$ , тривалість повного вигорання вуглецю з утвореного з неї коксозольного залишку  $\tau_{ba}$ , а швидкість вигорання вуглецю в осьовому напрямку  $w_{ca}$  знайти за залежністю, яка слідує з виразу (8):

$$w_{ca} = \frac{\rho_c}{\tau_b} \delta_0. \quad (9)$$

**Експериментальні вимірювання швидкості окислення вуглецю з коксозольного залишку гранули за осьовим напрямком.** Для проведення дослідів використовували висушені деревні гранули діаметром 6 мм (шифр зразка ДГЧ-6 із середньою густиною часток 1220 кг/м<sup>3</sup>), для яких раніше були виміряні: вміст золи  $A_d = 0,4\%$ , вихід летких речовин  $V_{daf} = 82\%$ , швидкість окислення вуглецю в радіальному напрямку  $w_{cr} = (1,62 \pm 0,09)$  г/(м<sup>2</sup>·с) [1]. З цих гранул вирізали круглі пластини правильної форми товщиною до 5 мм. Для зменшення впливу вигорання

вуг-лецю в радіальному напрямку твірну поверхню зразків ізолювали муллітокремнеземистою ватою шаром товщиною 5-6 мм. Для посадки в муфельну піч підготовлений зразок розміщували на дротяному штативі під кутом 60° від горизонталі, що має забезпечити близькі умови омивання повітрям обох реагуючих поверхонь. Досліди з визначення тривалості повного вигорання вуглецю з коксозольного залишку (як проміжок часу від моменту завершення виходу летких до повного вигорання частки) проводили при температурі

в муфельній печі 700°C при вільному доступі повітря за методикою, викладеною у роботі [1].

**Отримані результати.** Розраховані за експериментальними даними за залежністю (9) значення  $w_{ca}$  наведено у табл. 1. За отриманими даними середнє значення швидкості вигорання вуглецю з коксозольного залишку деревних гранул в осьовому напрямку становить  $w_{ca} = 3,23$  г/(м<sup>2</sup>·с), що в 1,7-2,0 рази більше, порівняно з швидкістю вигорання у радіальному напрямку для гранул цієї ж партії.

Таблиця 1. Швидкість вигорання вуглецю в осьовому напрямку з коксозольного залишку тонких поперечних зрізів деревних гранул діаметром 6 мм

Table 1. Rate of carbon burning out in axial direction from thin cross cuts off of 6mm wood pellets

Товщина пластини	Маса сухої частки	Густина частки гранули	Тривалість вигорання вуглецю	Швидкість окислення вуглецю в осьовому напрямку	Відношення $w_{ca}/w_{cr}$
$h$ , мм	$m$ , г	$\rho_d$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tau_b$ , с	$w_{ca}$ , г/(м <sup>2</sup> ·с)	–
2	0,06	1061,6	70	2,72	1,68
2,4	0,08	1179,5	74	3,43	2,12
3,2	0,1	1105,8	98	3,24	2,00
3,8	0,12	1117,4	108	3,52	2,18
4,2	0,13	1095,3	134	3,08	1,90
5,2	0,16	1088,8	157	3,23	2,00
Середнє значення				3,23	2,00

Для вимірювань швидкості окислення вуглецю з коксозольного залишку солом'яних гранул в осьовому напрямку використовували гранули діаметром 6 мм (шифр партії СГУ-6 із середньою густиною часток 1175 кг/м<sup>3</sup>), для яких раніше були виміряні: вміст золи  $A_d = 5,45\%$ , вихід летких речовин  $V_{daf} = 81\%$ , швидкість окислення вуглецю в радіальному напрямку

$w_{cr} = (1,68 \pm 0,21)$  г/(м<sup>2</sup>·с) [1]. З цих гранул вирізали круглі пластини правильної форми товщиною до 3 мм.

Визначена швидкість вигорання вуглецю з коксозольного залишку солом'яних гранул в осьовому напрямку становить  $w_{ca} = 2,31$  г/(м<sup>2</sup>·с) (табл. 2), що в 1,4-1,5 разів більше, порівняно з показником для радіального напрямку.

Таблиця 2. Швидкість вигорання вуглецю в осьовому напрямку з коксозольного залишку тонких поперечних зрізів солом'яних гранул діаметром 6 мм

Table 2. Rate of carbon burning out in axial direction from thin cross cuts off of 6mm straw pellets

Товщина пластини	Маса сухої частки	Густина частки гранули	Тривалість вигорання вуглецю	Швидкість окислення вуглецю в осьовому напрямку	Відношення $w_{ca}/w_{cr}$
$h$ , мм	$m_d$ , г	$\rho_d$ , кг/м <sup>3</sup>	$\tau_b$ , с	$w_{ca}$ , г/(м <sup>2</sup> ·с)	–
1,7	0,056	1167	86	2,07	1,23
1,8	0,056	1102	76	2,35	1,40
1,8	0,061	1197	90	2,15	1,28
2,3	0,066	1010	87	2,40	1,43
2,6	0,085	1155	109	2,48	1,47
2,9	0,080	977	106	2,40	1,43
Середнє значення				2,31	1,37

Вимірювання швидкості окислення вуглецю з коксозольного залишку гранул з урахуванням анізотропії властивостей потребує значних витрат зусиль та часу. Гранули біопалив мають нерівномірну густину вздовж частки, а тому вирізані тонкі круглі пластини можуть відрізнятись за густиною та швидкістю окислення. Більш того, гранули є реологічною системою, яка після пресування знаходиться в нерівноважному стані і має внутрішні напруження. Вирізання зразка призводить до його вивільнення від дії сусідніх шарів гранули, релаксації напружень зі зміною густини частки. У зв'язку з цим вирізання з гранул тонких поперечних зразків, які мають властивості цілої гранули, та точне визначення для них швидкості окислення вуглецю коксового залишку в осьовому напрямку є проблематичним.

Для виконання інженерних розрахунків доцільно виконати узагальнення отриманих даних та отримати спрощені залежності між швидкістю окислення вуглецю з коксозольного залишку в осьовому та радіальному напрямках. Базуючись на викладеному, висунуто припущення, що швидкість окислення вуглецю в осьовому напрямку вища, ніж у радіальному напрямку, пропорційно збільшенню густини гранули у порівнянні з густиною матеріалу, використаного для її пресування.

$$w_{ca} = w_{cr} k \frac{\rho_{dp}}{\rho_{di}}, \quad (10)$$

де  $w_{cr}$  – швидкість окислення вуглецю коксозольного залишку гранули по радіальному напрямку,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $w_{ca}$  – швидкість окислення вуглецю коксозольного залишку гранули по осьовому (поздовжньому) напрямку,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $\rho_{dp}$  – густина гранули в сухому стані,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{di}$  – початкова густина часток біомаси, що використана для пресування гранул,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $k$  – коригувальний множник, який враховує вид біомаси, використаної для пресування гранул, та відмінність властивостей вирізаних досліджених зразків від цілої гранули. На основі узагальнення наведених експериментальних даних можна рекомендувати  $k = 0,7$  для деревних гранул та  $k = 0,6$  для солом'яних гранул. При виконанні оціночних розрахунків можна приймати  $k = 1$  для всіх гранул.

**Висновки.** 1. Висунуто припущення, що при пресуванні гранул у пресах із циліндричними чи

дисковими матрицями і нажимними роликками ущільнення матеріалу в осьовому (поздовжньому) напрямку є більш значним, ніж у поперечному (радіальному), що обумовлює анізотропію властивостей гранули, і внаслідок цього швидкість окислення вуглецю коксозольного залишку циліндричних гранул залежить від напрямку – в осьовому напрямку є вищою, ніж у радіальному.

2. Запропоновано математичну модель вигорання вуглецю з коксозольного залишку круглої пластини, вирізаної з гранули, і на її основі отримано залежність для визначення швидкості окислення вуглецю в осьовому напрямку з використанням експериментальних даних – напівтовщини пластини, її маси та тривалості повного вигорання.

3. Експериментально встановлено, що швидкість окислення вуглецю з коксозольного залишку деревних гранул в осьовому напрямку становить  $w_{ca} = 3,23 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , що у 1,7-2,0 рази більше, порівняно з швидкістю вигорання у радіальному напрямку для гранул цієї ж партії. Швидкість вигорання вуглецю з коксозольного залишку солом'яних гранул в осьовому напрямку становить:  $w_{ca} = 2,31-2,52 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , що в 1,4-1,5 разів більше, порівняно з показником для радіального напрямку.

1. Жовмір М.М. Кінетика термолізу та вигорання часток твердого біопалива. Частина 3. Швидкість вигорання коксозольного залишку деревних і солом'яних гранул. // Відновлювана енергетика. – 2016, №4 – С.86–93.

2. Франк-Каменецький Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.

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

4. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

5. Силин В.Е., Рыжков А.Ф., Надир С.М.Ш. Низкотемпературное сжигание биомассы // Экологические и ресурсосбережение. – 2008, №5. – С. 9–15.

6. Nielsen N.P.K., Gardner D.J., Poulsen T., Felby C. Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets // Wood and Fiber Science. – 2009, 41(4). – P. 414–425.

7. Thermal conductivity of wood pellets [Electronic resource] / Wendi Guo, C.J.Lim, S. Sokhansanj, X. Bi, S. Melin. – 2016. – 7p. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/266412546\\_THERMAL\\_CONDUCTIVITY\\_of\\_WOOD\\_PELLETS](https://www.researchgate.net/publication/266412546_THERMAL_CONDUCTIVITY_of_WOOD_PELLETS) – Last access: 7.09.2017.

8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.



9. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел./Перевод со второго английского издания под редакцией проф. А. А. Померанцева. – М.: Наука, 1964. – 488 с.

**КИНЕТИКА ТЕРМОЛИЗА И ВЫГОРАНИЯ ЧАСТИЦ  
ТВЕРДОГО БИОТОПЛИВА. ЧАСТЬ 4. ВЛИЯНИЕ  
АНИЗОТРОПИИ ПЕЛЛЕТ НА СКОРОСТЬ ОКИСЛЕНИЯ  
УГЛЕРОДА ИЗ КОКСОЗОЛЬНОГО ОСТАТКА В  
ОСЕВОМ И РАДИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ**

**Н.М. Жовмир**, канд. техн. наук,

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094,  
г.Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А,

тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: [renewable@ukr.net](mailto:renewable@ukr.net)

ORCID: 0000-0001-6514-7474

*Видвинуто предположение о влиянии анизотропии цилиндрических пеллет биотоплива на скорость окисления углерода в осевом и радиальном направлениях. Аналитически получена зависимость для определения скорости выгорания углерода из коксозольного остатка пеллет биотоплива в осевом направлении с использованием экспериментальных данных о размере круглой пластины, ее массы и продолжительность полного выгорания. Экспериментально определенная скорость окисления углерода из коксозольного остатка в осевом направлении выше, чем в радиальном, что необходимо учитывать при расчете продолжительности горения пеллет. Библ. 9, табл. 2, рис. 3.*

**Ключевые слова:** твердое биотопливо, гранулы, коксозольный остаток, углерод, выгорание, скорость, анизотропия

1. Zhovmir M. Kinetics of thermolysis and burning of solid biofuels particles. Part 3. Burning out rate of cokeash residue of wood and straw pellets // Vidnovliuvana energytyka. – 2016. – № 4. – P. 86–93. (Ukr)

2. Frank-Kamjenjetskij D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics. – М.: Nauka, 1987. – 502 p. (Rus)

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

4. Babij V.I., Kuvajev Ju.F. Burning of coal dust and coal dust torch calculation. – М.: Energoatomizdat, 1986. – 208p. (Rus)

5. Silin V.E., Ryzhkov A.F., Nadir S.M.Sh. Low temperature biomass combustion // Ekotehnologii i resursoberezhennje. – 2008, №5. – P. 9-15. (Rus)

6. Nielsen N.P.K., Gardner D.J., Poulsen T., Felby C. Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets // Wood and Fiber Science. – 2009, 41(4). – P. 414-425.

7. Wendi Guo, Lim C.J., Sokhansanj S., Bi X., Melin S. Thermal conductivity of wood pellets [Electronic resource] / 2016. - 7p. – Mode of access:

[\[https://www.researchgate.net/publication/266412546\\_THERMAL\\_CONDUCTIVITY\\_OF\\_WOOD\\_PELLETS\]](https://www.researchgate.net/publication/266412546_THERMAL_CONDUCTIVITY_OF_WOOD_PELLETS) – Last access: 7.09.2017.

8. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat

transfer: tutorial. – М.: Energoizdat, 1981. – 416 p. (Rus).

9. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of heat in solids / Translation from second English edition under Professor A.A. Pomerantsev redacting. – М.: Nauka, 1964. – 448 p. (Rus)

SYNOPSIS

In the previous part of paper research on rate of carbon oxidation from cokeash residue of long wood and straw pellets with insulated ends were presented. Assuming the rate of carbon oxidation is the same across surface of cokeash particle durations of carbon full burnout were calculated for residue of different length pellets. It was a satisfactory matching of the calculated and experimental data for long pellets (above 20-25 mm), but for a shorter ones calculations gave data significantly exceeding experimental.

Observations on progress of carbon burnout from pellet's cokeash residue allowed assume anisotropy on carbon oxidation rate in axial and radial directions.

Based on analysis of pellet production features in presses with ring or flat shaped die with rolls it can be supposed more significant biomass compacting in axial (longitudinal) direction of pellet than that in transversal (radial) direction.

It is known that the thermal conductivity of porous solids grows with increase of their density. Due to predominant biomass compressing in axial direction, one can assume that the density and thermal conductivity of wood pellets in the axial direction should be higher than in the radial, i.e. biofuel pellet and cokeash residue formed out of it are anisotropic. Intensification of the transfer phenomena in direction of greater material density can stipulate the increase of carbon oxidization rate in axial (longitudinal) direction of pellets.

This paper provides results of experimental and analytical-experimental research on carbon burning out rate from cokeash residue of wood and straw pellets in axial (longitudinal) direction.

Mathematical model of carbon burning out from cokeash residue formed from thin round plate cut from cylindrical pellet is proposed. Dependence for determining rate of carbon burning out in axial direction  $w_{ca}$  is based on experimental data about dimensions of round plate, its mass and duration of complete burnout:

$$w_{ca} = \rho_c \delta_0 / \tau_b$$

here:  $\rho_c$  – average carbon density in particle of cokeash residue;  $\delta_0$  – semithickness of round plate cut from pellet;  $\tau_b$  – duration of carbon complete burnout from round plate of cokeash residue.

Experiments were carried out at temperature in muffle furnace 700°C and free air access with same lots of pellets as in previous paper. It was found carbon burning out rate from cokeash residue of 6 mm wood pellets in axial direction is  $w_{ca} = 3.2 \text{ g/(m}^2\text{s)}$  and is 1.7...2.0 times higher than that in radial direction, and for cokeash residue of 6mm straw pellets  $w_{ca} = 2.3...2.5 \text{ g/(m}^2\text{s)}$  is 1.4...1.5 times higher than that in radial direction. That should be taken into account at calculation of pellets burning duration.

Стаття надійшла до редакції 16.11.17

Остаточна версія 08.12.17

Друкується згідно з рекомендацією Вченої ради Інституту відновлюваної енергетики НАНУ, протокол № 20 від 11.12.17.

Підписано до друку 14.12.2017. Формат 84Ч108/16. Друк – різнографія. Умовн.друк.арк. 10,5. Тираж 300 прим.

Зареєстровано 01.09.2004, свідоцтво: серія КВ, № 9115. Ціна договірна.

Віддруковано ТОВ "НВП "ІНТЕРСЕРВІС", м. Київ, вул. Бориспільська, 9.