

УДК 662.612.5

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

### Температура деревних та солом'яних гранул при вигорянні вуглецю

Наведено результати експериментальних досліджень зміни температури циліндричних часток деревини, деревних та солом'яних гранул при їх термолізі та окисленні вуглецю утвореного коксозольного залишку в умовах вільного доступу повітря в муфельній печі. Максимальна температура коксозольного залишку досягається на його осі безпосередньо перед завершенням вигоряння вуглецю. Залежність максимальної температури коксозольного залишку від температури печі має складний сідловидний характер із локальним мінімумом при температурі печі 500-550°C. Встановлено, що зі збільшенням вмісту золи в паливі перегрів часток палаючого коксозольного залишку зростає. Бібл. 10, рис. 6.

**Ключові слова:** тверде біопаливо, гранули, вуглець, вигоряння, перегрів частки.

ORCID: 0000-0001-6514-7474

**Вступ.** В Україні створюється мережа заводів із виробництва деревних та солом'яних гранул. Створення котелень зі спалюванням гранул є передумовою розвитку внутрішнього ринку гранул і позитивно вплине на розвиток машинобудування, лісового та сільського господарства.

Тверде біопаливо у вигляді гранул (пелет) переважно використовують в опалювальних котлах потужністю до 500 кВт, що мають відповідати вимогам [1]. Для спалювання гранул опалювальні котли потужністю до 100 кВт оснащують пальниковими пристроями за [2], причому пальники за цим стандартом випробовують із використанням гранул, що виготовлені з "хімічно необробленої деревини без кори", для яких температура спікання золи повинна становити не менше 1400°C. Стандартом також передбачена перевірка працездатності та технічних показників пальників, призначених для використання гранул з іншою температурою спікання золи.

Стандартами на деревні [3] та солом'яні гранули [4] передбачена вимога до виробників вказувати всі характерні температури плавкості золи: початку усадки/спікання (SST), деформації (DT), напівсфери (HT), розтікання (FT). Обстеження магазинів торгівельних мереж України показало, що гранули реалізуються без надання інформації про характеристики плавкості золи, які передбачені стандартами.

Ряд виробників у своїх пальниках встановлюють механічні пристрої, які забезпечують видалення золи, що розширює експлуатаційні можливості обладнання щодо допустимого її вмісту в гранулах. Однак у документації на котли не наводять вимоги до характеристик золи використовуваного палива.

Основними технологічними проблемами спалювання твердих біопалив є спікання золи та емісія субмікронних твердих часток, особливо при використанні соломи та солом'яних гранул, що характеризуються підвищеним вмістом легкоплавкої золи.

Значний вміст сполук калію у соломі злаків спричиняє низьку температуру спікання та плавлення золи [5]. При спалюванні соломи у зольному залишку при температурах більше 800°C відбуваються реакції з утворенням вторинних оксидів та силікатів [6], які можуть утворювати легкоплавкі сполуки та евтектики. Це може блокувати подальше пересування та вигоряння палива.

Легкоплавкі солі мінеральної частини твердого біопалива при температурах понад 900°C починають інтенсивно випаровуватися і конденсуються при зниженні температури димових газів [7]. В результаті димові гази можуть містити частки середнім розміром 0,3 мкм в кількості 3-500 мг/м<sup>3</sup> [8], що створює екологічні проблеми використання біопалив.

Відомо, що спікання та розм'якшення золи палива визначається як характеристиками золи палива, так і термохімічними умовами, що створюються в топці при його спалюванні. В топках котельних установок, впливаючи на режими горіння та теплообміну часток палива, створюють температурні умови, сприятливі для отримання золи в твердому або рідкому стані залежно від поставленої задачі.

В роботі [9] досліджено швидкість горіння деревної тріски в умовах вільної конвекції при відносно низьких температурах печі (400-900°C), при цьому було визначено перегрів палаючих часток понад температуру середовища муфельної печі, який становив від 250°C до 60°C. Питання щодо перегріву палаючих часток деревних та солом'яних гранул в літературі не висвітлене. Авторам роботи [9] не вдалося виявити вплив вмісту золи на перегрів часток палива.

Очевидно, що перегрів палаючих часток може призводити до інтенсифікації вказаних негативних процесів навіть при температурах середовища топки менших, ніж температура спікання золи чи температура початку випаровування легкоплавких компонентів.

**Метою роботи** є експериментальні дослідження зміни температури в одиничних гранулах під час їх термолізу з виходом і згорянням летких речовин та наступним окисленням утвореного коксозольного залишку при вільному доступі повітря в муфельній печі, а також виявлення впливу підвищеного вмісту золи на перегрів частки па-

лаючого коксозольного залишку деревини, деревних та солом'яних гранул.

**Методика проведення експериментів.** Дослідження проводилися методом спалювання індивідуальної частки палива в муфельній печі, розігрітій до заданої температури. У роботах [9, 10] температуру палаючих часток палива вимірювали пірометричним методом, тобто здійснювали вимірювання температури поверхні частки. В даній роботі при термолізі та вигорянні часток температуру вимірювали всередині часток за допомогою термопар.

Термопари типу К виготовляли дуговим зварюванням хромелевих та алюмелевих ізолюваних проводів діаметром 0,1 мм з утворенням королька діаметром 0,5 мм. Скрутку та корольок термопари покривали захисною плівкою високо-температурного клею та запікали при температурі 550°C. Захисну плівку наносили у кілька шарів з досягненням діаметра вістря термопари 0,8 мм. Для подальших експериментів відбирали термопари, що пройшли перевірку при температурах до 900°C.

Дослідження проводили з використанням сухої деревини вербових пагонів без кори, діаметром 8 мм та довжиною 40 мм (маса частки у сухому стані 0,82 г, вміст золи  $A_d = 0,9\%$  мас.). В частці палива паралельно її осі з протилежних кінців просвердлювали отвори діаметром 1 мм на глибину 15 мм з їх розміщенням по центру та на середині радіуса частки. У ці отвори вставляли підготовлених термопар (рис. 1).

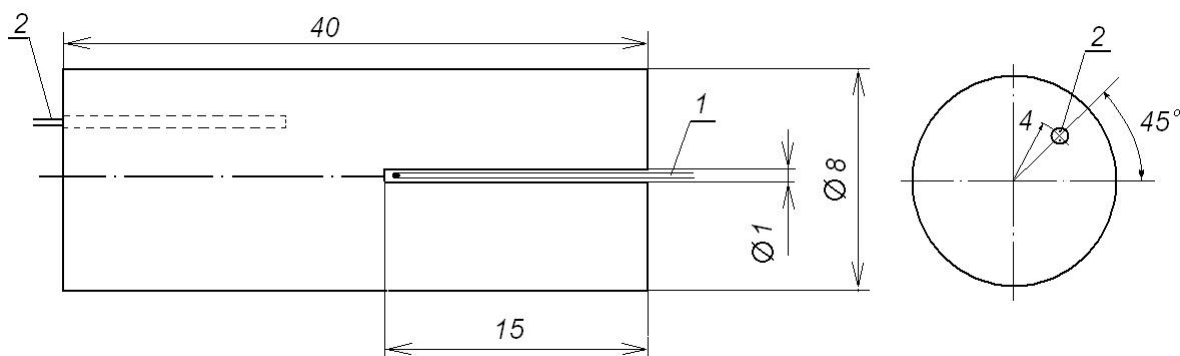


Рис. 1. Розміщення термопар у частці біопалива: 1 – центральна термопара; 2 – радіальна термопара.

Також досліди проводили з використанням трьох видів сухих гранул діаметром 8 мм з різним вмістом золи:

- з вербової деревини (довжина часток 23 мм, маса часток 1,26 г, вміст золи  $A_d = 1,4\%$  мас.);
- з соснової деревини (довжина часток 24 мм, маса часток 1,42 г, вміст золи  $A_d = 0,4\%$  мас.);
- з соломи (довжина часток 25 мм, маса часток 1,47 г, вміст золи  $A_d = 9,0\%$  мас.).

При дослідженні температурного поля в ґранулах використовували одну термопару з її розташуванням в отворі діаметром 1 мм по центру ґранули із заглибленням на 15 мм.

Для проведення експериментів використовували штатив із жаростійкого дроту, на якому влаштована горизонтальна полицка з нержавіючої сітки з чарункою 1 мм. Підготовлену частку біопалива клали горизонтально на сітчастий штатив, при цьому отвір з термопарою, що розміщена на середині радіуса, розташовували під кутом  $45^\circ$  від вертикалі в першому або другому квадранті. Для вимірювання температури пічного середовища поряд із часткою палива встановлювали додаткову термопару. Для зменшення впливу прогріву дротів термопар та часток палива з торців кінці часток палива ізолювали шаром муллітокремнеземної вати шаром біля 10 мм.

Проводи термопар прикріплювали до ручки штатива і підключали до цифрового мікропроцесорного 8-канального регулятора-вимірювача температури ПКРТ-0102-8 із записом результатів вимірювання у пам'яті приладу та одночасним графічним відображенням у режимі реального часу на моніторі персонального комп'ютера.

Муфельна піч має внутрішній простір шириною 200 мм, висотою 120 мм, довжиною 300 мм. Для зменшення теплових втрат всередині печі перед дверцятами встановлено перегородку з перлітової цегли товщиною 40 мм, в якій влаштовано канал розміром  $60 \times 70$  мм для введення вказаного штативу з досліджуваним зразком палива. Вимірювання температури в печі та її підтримання здійснювали за допомогою термоелектричного перетворювача типу К з цифровим мікропроцесорним регулятором температури РТ-0102 та безконтактним силовим блоком в колі живлення нагрівача печі. Налаштування ПД регулятора забезпечувало підтримання встановленої темпе-

ратури печі з відхиленням  $\pm 10^\circ\text{C}$ . Досліди проводили при температурах муфельної печі 400, 500, 550, 600, 700 та  $800^\circ\text{C}$ .

Штатив із часткою біопалива переносили в муфельну піч, рівномірно розігріту до заданої температури при відкритому доступі повітря. При цьому вимірювали зміну температур у часі, а також відлік часу за допомогою секундоміра від моменту посадки частки палива в піч до наступних подій:

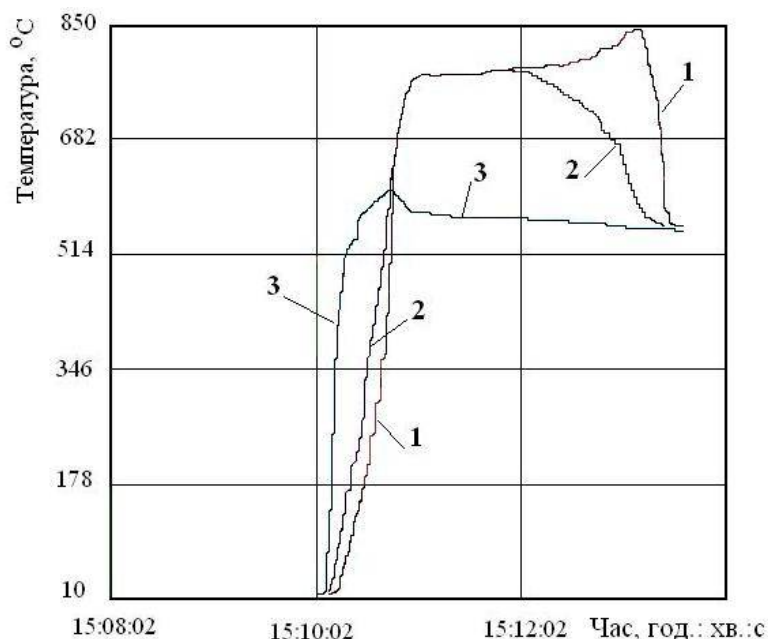
- початку видимого виділення летких у вигляді диму;
- спалахування летких;
- завершення виходу летких та їх полум'яного горіння з переходом до безполум'яного окислення вуглецю утвореного коксозольного залишку;
- завершення окислення вуглецю коксозольного залишку, що фіксувалося за згасанням світіння всередині утвореної частки золи.

**Отримані результати.** При внесенні частки палива в пічний простір відбувався її прогрів, виділення летких, полум'яне вигорання летких, утворення коксозольного залишку, безполум'яне окислення вуглецю з коксозольного залишку, утворення зольного залишку.

Слід відмітити, що при низьких температурах печі ( $400\text{-}500^\circ\text{C}$ ) виділення летких речовин у вигляді диму починалося при температурі частки близько  $270^\circ\text{C}$ , але спалахування летких не відбувалося і після завершення їх виходу частка утвореного коксозольного залишку мала темний колір. Вуглець утвореного коксозольного залишку є високореакційним, проявляє пірофорні властивості і при контакті з повітрям розжарюється, починаючи з кутиків торців і поширенням окислення по всій поверхні частки за 5-15 секунд.

При температурах муфельної печі  $550^\circ\text{C}$  і вище спостерігалося спалахування летких речовин довкола частки з локальним підвищенням температури довкола частки.

На рис. 2 наведено характер зміни температури на осі циліндричної частки вербової деревини та на відстані  $0,5 R$  від осі частки при температурі в пічному просторі  $600^\circ\text{C}$ . Спалахування летких відбувалося на 23 с, а завершення їх вигорання на 45 с, завершення окислення вуглецю з коксозольного залишку відбувалося на 200 с.



**Рис. 2.** Характер зміни температури у циліндричній частці вербової деревини при температурі в муфельній печі 600°C: 1 – на осі частки; 2 – на відстані 0,5 R від осі частки; 3 – довкола частки.

У період виходу та вигорання летких температура по центру частки була меншою, ніж у проміжній точці між центром та поверхнею. При завершенні вигорання летких температура по перерізу частки ставала рівномірною і становила близько 550°C.

Спостереження показали, що окислення коксозольного залишку, утвореного з деревних та солом'яних гранул, відбувається пошарово зі зміщенням фронту реагування всередину коксозольного залишку глибше під шар утвореної золи. При цьому шар золи не осипається і може впливати на перебіг окислення вуглецю, створюючи дифузійний опір для кисню та продуктів горіння, зменшуючи швидкість окислення вуглецю та виділення теплоти хімічних реакцій. З іншої сторони, зі збільшенням товщини шару золи зростає термічний опір для променевого та конвективного теплообміну реагуючої поверхні з пічним простором. Питання про результуючий ефект цих двох різнонаправлених впливів не досліджене.

В період окислення вуглецю з коксозольного залишку температура зростала, але по перерізу частки залишалася рівномірною. При досягненні фронту окислення вуглецю точки на середині

радіуса частки температура в ній досягала 806°C і в подальшому знижувалась, а температура на осі частки продовжувала зростати і безпосередньо перед згасанням досягала максимального значення 846°C.

З наведених даних слідує, що максимальна температура частки палива досягається при окисленні коксозольного залишку і спостерігається на її осі перед завершенням окислення вуглецю, коли товщина шару утвореної золи над реагуючою поверхнею є максимальною. Можна стверджувати, що зростання термічного опору шару золи має переважаючий вплив на енергетичний баланс палаючої частки і приводить до підвищення її температури.

Подібний характер має зміна температур і при окисленні деревних і солом'яних гранул. У зв'язку з цим у подальшому досліджували вплив температурних умов у печі та вмісту золи на максимальну температуру на осі частки коксозольного залишку.

На рис. 3 наведено дані про температуру, що досягається при окисленні коксозольного залишку вербової деревини на осі частки, залежно від температури в муфельній печі.

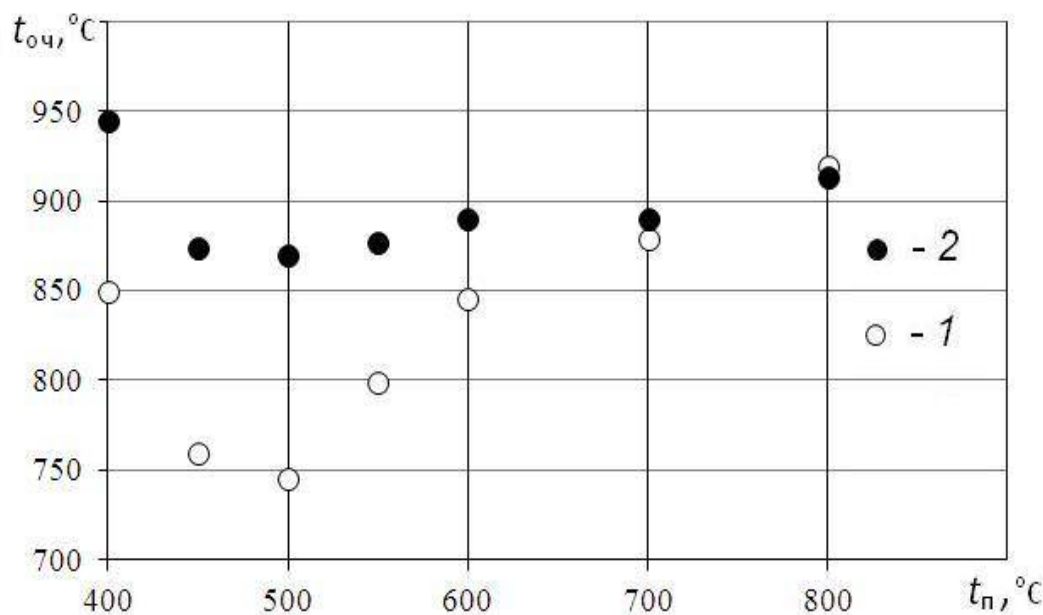


Рис. 3. Максимальна температура на осі частки коксозольного залишку  $t_{оч}$  залежно від температури в муфельній печі  $t_p$ : 1 – коксозольний залишок частки вербової деревини; 2 – коксозольний залишок гранули з вербової деревини.

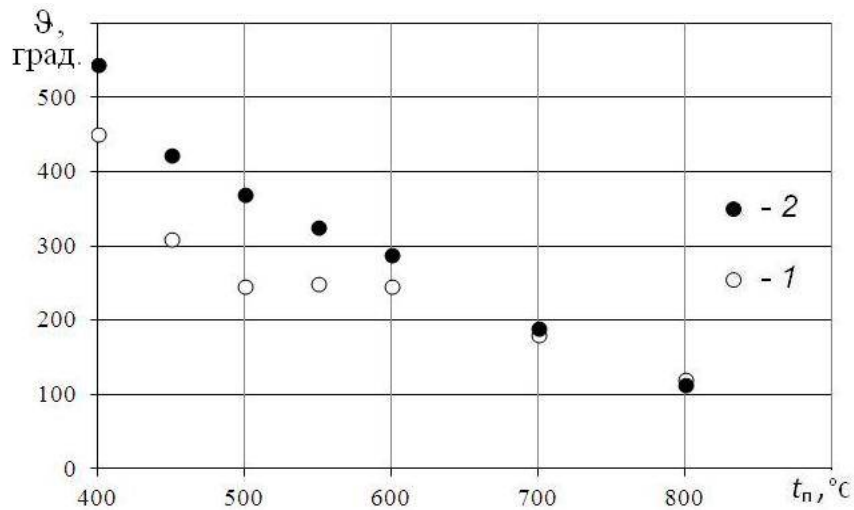
З отриманих даних слідує, що залежність максимальної температури, що досягається на осі частки коксозольного залишку вербової деревини ( $A_d = 0,9\%$  мас.), від температури печі має складний сідловидний характер. При низькій температурі в муфельній печі ( $400^\circ\text{C}$ ) при окисленні вуглецю утвореного коксозольного залишку на осі частки досягається найвища температура  $850^\circ\text{C}$ , тоді як при температурах печі в діапазоні від  $450$  до  $600^\circ\text{C}$  найвища температура на осі частки коксозольного залишку є меншою і знаходиться в діапазоні  $750$ - $850^\circ\text{C}$  з локальним мінімумом  $750^\circ\text{C}$  при температурі печі  $500^\circ\text{C}$ . З ростом температури печі понад  $600^\circ\text{C}$  спостерігається помірний ріст максимальної температури на осі частки до  $920^\circ\text{C}$  при температурі печі  $800^\circ\text{C}$ .

На рис. 3 також наведено дані про максимальну температуру, що досягається на осі частки коксозольного залишку гранули, виготовленої з вербової деревини ( $A_d = 1,4\%$  мас.). Характер залежності максимальної температури, що досягається на осі частки коксозольного залишку вербової гранули, подібний до характеру залежності для коксозольного залишку частки вербової деревини, але рівень температур є вищим. Особли-

вість полягає в тому, що окислення коксозольного залишку вербових гранул при низькій температурі печі ( $400^\circ\text{C}$ ) відбувається з досягненням вищої температури на осі частки, ніж окислення при вищих температурах печі.

В обох випадках – вербових часток і вербових гранул – надлишкова температура як різниця максимальної температури на осі частки коксозольного залишку та температури печі  $\vartheta = (t_{оч} - t_p)$  монотонно зменшується зі зростанням температури печі  $t_p$  (рис. 4). При цьому надлишкова температура при окисленні коксозольного залишку є істотно вищою при низьких температурах печі, становить  $450^\circ\text{C}$  та  $530^\circ\text{C}$  і є значно більшою від максимальної надлишкової температури на поверхні коксозольного залишку деревної частки, визначеної в [9].

У порівнянні з коксозольним залишком вербової деревини ( $A_d = 0,9\%$  мас.) при окисленні коксозольного залишку вербових гранул ( $A_d = 1,4\%$  мас.) на осі частки досягається вища температура, що вказує на зростання температури зі збільшенням вмісту золи в паливі. Ця різниця температур досягає  $125$  градусів при температурі в печі  $500$ - $600^\circ\text{C}$ , а при високих температурах печі є неістотною.



**Рис. 4.** Максимальна надлишкова температура  $\theta$  на осі частки коксозольного залишку залежно від температури в муфельній печі  $t_n$ : 1 – коксозольний залишок частки вербової деревини; 2 – коксозольний залишок гранули з вербової деревини.

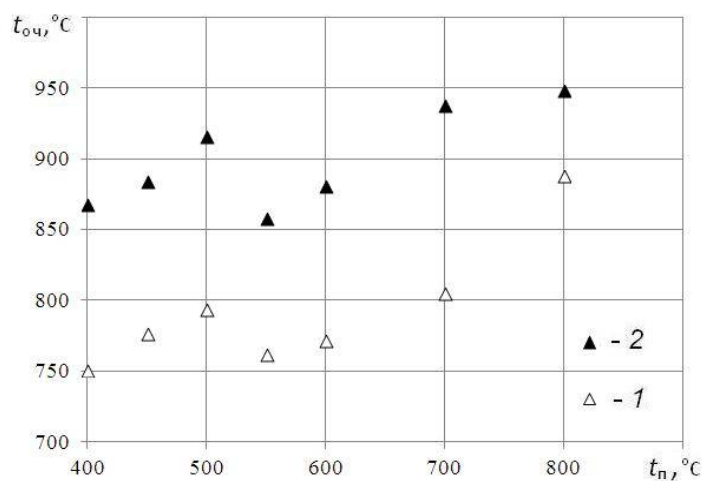
На рис. 5 наведено залежність максимальної температури на осі коксозольного залишку деревних (соснових) та солом'яних гранул від температури муфельної печі. Залежність має більш складний характер, ніж у випадку палив із вербової деревини. Для коксозольного залишку соснових та солом'яних гранул залежність  $t_{оч} = f(t_n)$  не є монотонною функцією – в області температур муфельної печі від 500 до 550°C відбувається зміна характеру залежності.

В діапазоні температур печі від 400 до 500°C спостерігалось монотонне збільшення максимальної температури на осі коксозольного залишку з досягненням значень 794 та 916°C для коксозольного залишку деревних та солом'яних гранул відповідно.

При температурі печі 550°C спостерігається локальний мінімум максимальної температури коксозольного залишку 760°C для деревних гранул та 855°C для солом'яних гранул.

Зі зростанням температури печі від 550 до 800°C спостерігалось збільшення максимальних температур коксозольного залишку.

В усьому дослідженому діапазоні температур печі на осі коксозольного залишку солом'яних гранул ( $A_d = 9,0\%$  мас.) максимальна температура була вищою на 130-60 градусів у порівнянні з коксозольним залишком деревних гранул ( $A_d = 0,4\%$  мас.), що також вказує на зростання максимальної температури палаючого коксозольного залишку зі збільшенням вмісту золи в паливі.



**Рис. 5.** Максимальна температура на осі частки коксозольного залишку  $t_{оч}$  залежно від температури в муфельній печі  $t_n$ : 1 – коксозольний залишок деревної (соснової) гранули  $A_d=0,4\%$  мас; 2 – коксозольний залишок солом'яної гранули  $A_d=9,0\%$  мас.

На рис. 6 наведено дані про максимальну надлишкову температуру  $\vartheta$  на осі частки коксозольного залишку деревних (соснових) та солом'яних гранул, яка для цих видів гранул монотонно зменшується зі зростанням температури

печі. При цьому надлишкова температура при окисленні коксозольного залишку солом'яних гранул із вищим вмістом золи є вищою на 130 градусів при температурах печі до 700°C та 60 градусів при температурі печі 800°C.

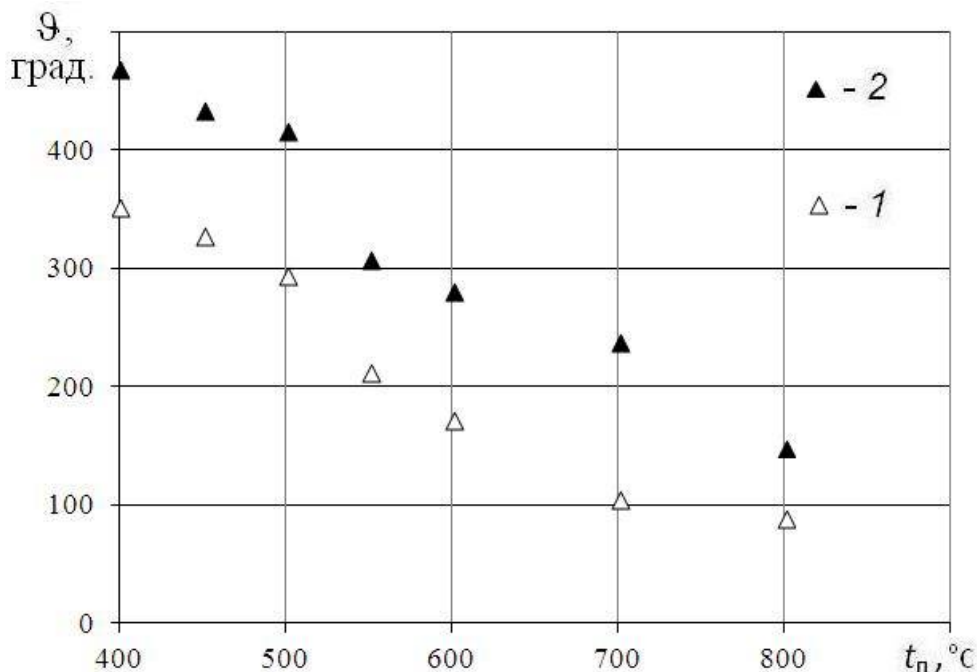


Рис. 6. Максимальна надлишкова температура  $\vartheta$  на осі частки коксозольного залишку залежно від температури в муфельній печі  $t_{п}$ : 1 – коксозольний залишок деревної (соснової) гранули; 2 – коксозольний залишок солом'яної гранули.

Отримані дані про максимальні температури на осі коксозольного залишку гранул вказують на те, що при спалюванні солом'яних гранул розвиваються більш високі температури і виникають сприятливі умови для протікання пірохімічних реакцій мінералоутворення з оксидів, наявних у золі. Зважаючи на присутність у солом'яній золі ряду легкоплавких оксидів лужного характеру та кислих оксидів, це може вести до прискорення утворення як легкоплавких сполук, так і їх легкоплавких евтектик. Таким чином, негативні особливості температурних умов окислення коксозольного залишку солом'яних гранул та хімічного складу їх золи, накладаючись, можуть створювати умови, несприятливі для збереження сипучого та твердого стану золи, спричиняти підвищене випаровування компонентів золи та значну емісію твердих часток.

**Висновки.** 1. Максимальна температура коксозольного залишку циліндричних гранул досягається на їх осі безпосередньо перед згасанням і може досягати 750-950 °C при температурах у

печі 400-800°C. Залежність температури на осі частки від температури печі не є монотонною, а має складний сідловидний характер із локальним мінімумом при температурі в печі 500°C для вербових часток та гранул і при 550°C для соснових та солом'яних гранул.

2. Встановлено, що при спалюванні часток деревини, деревних та солом'яних гранул зі збільшенням вмісту золи коксозольний залишок розігрівається до вищих температур.

3. Надлишкова температура на осі часток коксозольного залишку деревних гранул із вмістом золи 0,4% та солом'яних гранул із вмістом золи 9% монотонно зменшується зі зростанням температури печі. При цьому надлишкова температура при окисленні коксозольного залишку солом'яних гранул є вищою на величину до 130 градусів у дослідженому діапазоні температур в муфельній печі.

4. В пальникових пристроях для спалювання солом'яних гранул з метою запобігання спікання та розм'якшення золи, а також зменшення емісії твер-

дих часток доцільними можуть бути режими роботи з підтриманням у зоні випалювання коксозольного залишку температур до 400°C або в діапазоні від 550 до 600°C, коли максимальна температура на осі часток коксозольного залишку є нижчою.

1. *Котлы отопительные* для твердого топлива с ручной и автоматической загрузкой номинальной тепловой мощностью до 500 кВт. Терминология, требования, методы испытаний и маркировка: ГОСТ 33016-2014 (EN 303-5:2012) / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Стандартинформ, 2015. – 43 с.

2. *Горелки пеллетные* для котлов отопительных тепловой мощностью до 100 кВт. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ 32452-2013 (EN 15270:2007) / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.

3. *Биотопливо твердое*. Технические характеристики и классы топлива. Часть 2. Древесные пеллеты для промышленного использования. ГОСТ Р 55114-2012 (EN 14961-2:2011) / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Стандартинформ, 2014. – 10 с.

4. *Биотопливо твердое*. Технические характеристики и классы топлива. Часть 6. Недревесные пеллеты для промышленного использования: ГОСТ Р 55868-2013 (EN 14961-6:2012) / М.: Стандартинформ, 2014. – 14 с.

5. *Straw for energy production*. Technology-Environment-Economy / The Centre for Biomass Technology. L. Nikolaisen (Editor) // Danish Energy Agency, 1998. – 53p. – www.ens.dk.

6. *Steenary B.M., Lindqvist O.* High-temperature reactions of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite // Biomass and bioenergy. – 1998, vol. 14, N 1. – P.67–76.

7. *Jimener S., Ballester J.* Particulate matter formation and emission in the combustion of different pulverized biomass fuels // Combustion science and technology. – 2006, vol. 176, N 4. – P. 655–683.

8. *Chistensen K.A., Livbjerg H.* A field study of submicron particles from the combustion of straw // Aerosol science and technology. – 1996, vol. 25, N 2. – P. 185–199.

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

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

#### REFERENCES

1. *Heating boilers* for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW. Terminology, requirements, test methods and marking: GOST 33016-2014 (EN 303-5:2012) / Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. – М.: Standartinform, 2015. – 43p. (Rus)

2. *Pellet burners* for heating boilers the output up to 100 kW. General technical requirements and test methods:

GOST 32452-2013 (EN 15270:2007) / Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. – М.: Standartinform, 2014. – 56 p. (Rus)

3. *Solid biofuels*. Technical specification and fuel classes. Part 2. Wood pellets for nonindustrial use. GOST R 55114-2012 (EN 14961-2:2011) / Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. – М.: Standartinform, 2014.– 10p. (Rus)

4. *Solid biofuels*. Fuel specifications and classes. Part 6. Non-woody pellets for non-industrial use. GOST R 55868-2013 (EN 14961-6:2012) / М.: Standartinform, 2014.(Rus)

5. *Straw for energy production*. Technology-Environment-Economy / The Centre for Biomass Technology. L. Nikolaisen (Editor) // Danish Energy Agency, 1998. – 53p. – www.ens.dk

6. *Steenary B.M., Lindqvist O.* High-temperature reactions of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite // Biomass and bioenergy. – 1998, vol. 14, N 1. – P.67–76.

7. *Jimener S., Ballester J.* Particulate matter formation and emission in the combustion of different pulverized biomass fuels // Combustion science and technology. – 2006, vol. 176, N 4. – P. 655–683.

8. *Chistensen K.A., Livbjerg H.* A field study of submicron particles from the combustion of straw // Aerosol science and technology. – 1996, vol. 25, N 2. – P. 185–199.

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

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

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

#### Температура древесных и соломенных пеллет при выгорании углерода

*Приведены результаты экспериментальных исследований температуры цилиндрических частиц древесины, древесных и соломенных гранул при их термоллизе и окислении углерода образовавшегося коксозольного остатка в условиях свободного доступа воздуха в муфельной печи. Максимальная температура коксозольного остатка достигается на его оси непосредственно перед завершением выгорания углерода. Зависимость максимальной температуры коксозольного остатка от температуры печи имеет сложный седловидный характер с локальным минимумом при температуре печи 500-550°C. Установлено, что с увеличением содержания золы в топливе перегрев частиц пылающего коксозольного остатка возрастает. Библ. 10, рис. 6.*

**Ключевые слова:** твердое биотопливо, пеллеты, углерод, выгорание, перегрев частицы.

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

#### Temperature of wood and straw pellets at carbon burning out

*Here are described experimental results of temperature in cylindrical particles of wood, straw and wood pellets at their thermolysis and carbon oxidation of formed cokeash residue in condi-*



tions of free air access in a muffle furnace. Maximum temperature of cokeash particle is achieved on its axis just before completion of carbon burnout. Dependence of maximum temperature of cokeash particle from furnace temperature has a complex saddle character with local minimum at furnace temperature 500...550°C. It has been found that with increase in fuel ash content the overheating of burning particle increases. References 10, figures 6.

**Keywords:** solid biofuels, pellets, carbon, burning out, particle overheating.

#### SYNOPSIS

Main technological problems at solid biofuels burning are ash sintering and submicron solid particles emission, especially at straw and straw pellets combustion.

A significant content of potassium compounds in the cereal straw causes low temperatures of ash sintering and melting. At straw burning in ash residue at temperatures above 800°C reactions with formation of secondary oxides and silicates occurs, which can form a fusible compounds blocking movement and burning out of fuel.

Low melting salts of solid biofuels ash at temperatures over 900°C start to rapidly evaporate and condense with lowering of the flue gases temperature, which cause a significant content of submicronic solid particles, creating environmental problems of biofuels usage.

According to literary data at solid biofuels burning it was observed the overheating of blazing particles above muffle temperature. Overheating of blazing fractions of wood and straw

pellets and its dependence on process conditions are not covered in literature. Obviously, the overheating of blazing particles can lead to intensification of the mentioned negative processes even at furnace temperatures lower than that for ash sintering and its atomization.

In this paper experimentally investigated change in temperature of individual parts of the wood, wood and straw pellets during their thermolysis with volatile burning and subsequent oxidation of formed cokeash residue with free air access in a muffle furnace, discovered the impact of high ash content on a particles overheat. Research conducted by the method of an individual particle burning in a muffle furnace preheated to 400...800°C, at that the temperature inside of cylindrical particles of wood, straw and wood pellets was measured by means of thin thermocouples.

Maximum temperature of cokeash particle is achieved on its axis just before completion of carbon burnout. Dependence of maximum temperature of cokeash particle from furnace temperature has a complex saddle character with local minimum at furnace temperature 500...550°C.

It has been found that with increase in fuel ash content the overheating of burning particle increases: for willow particle with ash content 0.9% it was up to 450°C; for willow pellets with ash content 1.4% it was up to 530°C; for pine pellets with ash content 0.4% it was up to 350°C; and for straw pellets with ash content 9% it was up to 470°C.

For investigated muffle temperature range the maximal overheating for the cokeash residue of straw pellets were higher by 130... 60 degrees in comparison to that for wood pellets.

Стаття надійшла до редакції 24.06.17

Остаточна версія 04.09.17

**Х МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА**  
**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА - 2017**  
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

**7-9**  
**ЛИСТОПАДА**

**IEC**

**МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**  
Україна, Київ, Броварський пр-т, 15  
М "Лівобережна"  
☎ +38 044 201-11-66, 206-87-86  
e-mail: [energo@iec-expo.com.ua](mailto:energo@iec-expo.com.ua)  
[www.iec-expo.com.ua](http://www.iec-expo.com.ua), [www.мвц.укр](http://www.мвц.укр)  
[www.tech-expo.com.ua](http://www.tech-expo.com.ua)

ОРГАНІЗАТОР:  
Міжнародний виставковий центр

ЗА ПІДТРИМКИ:  
Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України  
Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України

Технічний партнер: **RandMedia**