

## ЕФЕКТИВНЕ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДОЇ БІОМАСИ

Єсіпов О.В., к.т.н., доц., Поляшенко С.О., к.т.н., доц.,  
Манойло В.М., к.т.н., доц., Пікалов А.В., студ.

*Харківський національний технічний університет сільського господарства  
імені Петра Василенка*

*В статті розглянуто питання ефективного і повного згорання твердої біомаси, що є необхідною умовою використання деревини, як екологічно прийняттого виду палива.*

**Постановка проблеми.** Наразі світова економіка та економіка нашої країни все більше відчуває потребу у збільшенні виробництва різних видів енергії. Подальше збільшення виготовлення різних видів енергії на основі традиційних технологій стикається з обмеженими природними ресурсами та значним негативним впливом на екологію всієї планети. Вирішення цієї проблеми полягає у використанні альтернативних джерел палива та енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемами оцінки ефективності використання альтернативних джерел палива та енергії займалися провідні науковці, такі як: Є. Бойко, Б. Данилишин, М. Долішній, С. Дорогунцов, М. Жовнір, Є. Крикавський, О. Кузьмін та ін.

Проведені дослідження показали, що кризові явища у паливно-енергетичному комплексі України, зумовлені стрімким зростанням цін на традиційні енергоресурси, негативно впливають на соціально-економічний розвиток регіонів, рівень життя населення та національну безпеку. Як відомо, на Землі існує багато джерел енергії, але більшість з них вже вичерпується. У той же час потреба у них збільшується — до 2025 року потреба у паливі буде у 3,5 рази більша, ніж у теперішній час, а ціна на них росте.

Енергетичні стратегії країн Євросоюзу передбачають два ключові моменти: економію енергії та збільшення частки відновлювальних джерел енергії в паливно-енергетичному комплексі (до 20 %). В Україні спостерігається протилежна тенденція: споживання енергоносіїв до 2030 р. збільшиться на 51 %, а частка «зеленої» енергетики становитиме 4 %.

Серед альтернативних джерел енергії виокремлюються чотири основні — це енергії вітру, води, біомаси та сонця.

В Україні існує достатня сировинна база для видобутку альтернативного виду палива, такого як деревна біомаса. Так, наприклад, загальні річні обсяги відновлювальних ресурсів біомаси складають 115,5 млн. т. Можливий енергетичний потенціал обсягу біомаси складає 22,0 млн. т у. п. (умовного палива), з яких технічно доступний енергопотенціал оцінюється у 13,2 млн. т у. п. на рік.

Найбільш поширеними і надійними способами отримання енергії є технологія спалювання її у котлах, вибір якої залежить від палива, яке

використовується. Біомаса володіє певними особливостями, які відрізняють її від традиційних енергоресурсів. Крім того, деякі з характеристик твердого біопалива, такі як щільність, розміри часток, вологість, за допомогою подрібнення та ущільнення можуть бути змінені. Тому в процесі експлуатації теплогенераторів з метою підвищення енергоефективності горіння твердого біопалива потрібно враховувати вказані характеристики.

У наукових працях вітчизняних і закордонних авторів [1, 2, 4] розкриті питання, пов'язані з принципом роботи теплогенераторів, обґрунтовано процес горіння палива, приділено значну увагу різним видам сировини, проте питання утворення енергоефективної паливної суміші авторами висвітлено недостатньо.

**Мета досліджень** – пошук чинників, що впливають на ефективне спалювання твердої біомаси з метою підвищення ККД теплогенераторів.

**Виклад основного матеріалу.** Ефективне і повне згорання є необхідною умовою використання деревини як екологічно прийняттого виду палива. Процес згорання повинен забезпечувати високий ступінь використання енергії і, отже, повне знищення деревини, і не повинен викликати утворення небажаних в екологічному відношенні з'єднань.

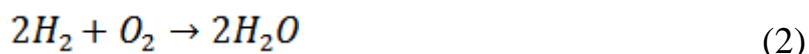
Важливою паливно-технологічною характеристикою біомаси є її теплотворна здатність, яка залежить від виду енергетичних рослин, впливу навколишнього середовища, умов зберігання, вологості тощо [3]. Основними технологіями термічної переробки твердого біопалива (рослинної біомаси та деревини) є їх пряме спалювання, газифікація і піроліз.

Горіння деревної тирси протікає в гетерогенному режимі. Процес горіння складається з наступних стадій: 1) підсушування палива і нагрівання до температури початку виходу летких речовин; 2) займання летючих речовин і їх вигорання; 3) нагрівання коксу до займання; 4) вигорання горючих речовин з коксу. На практиці ці стадії частково накладаються одна на іншу [5].

Специфічні особливості процесів горіння деревини пов'язані з її вологістю, яка створює проблеми при спробі досягнення високої ефективності спалювання. Приблизно половина маси свіжозрубаного дерева складається з води. Друга половина являє собою суху деревну речовину, що містить 84-88% летких речовин, 11,4-15,6% твердого вуглецю і 0,4-0,6% золи [6].

Процес горіння палива – це сукупність хімічних реакцій окислення його горючих елементів, що супроводжується значним виділенням тепла і світла. Для підтримки процесу горіння потрібен окислювач – кисень. Швидкість хімічної реакції зростає зі збільшенням температури. Тому у топках теплогенераторів забезпечують безперервну подачу повітря у достатній кількості для спалювання біомаси і підтримки високої температури. При повномуокисленні продукти, що утворилися не можуть більше з'єднуватися з окислювачем і виділяють теплоту. Продуктами повного окислення горючих елементів являються оксиди вуглеводню ( $\text{CO}_2$ , водню ( $\text{H}_2\text{O}$ ) і сірки ( $\text{SO}_2$  і в меншій мірі  $\text{SO}_3$ ). Реакціями повного окислення горючих елементів є:





Причинами неповного згорання палива можуть бути такі: не всі горючі елементи окисляються, при окисленні горючих елементів утворюються продукти, які б могли брати участь в процесі горіння. При неповному окисленні горючих елементів можуть утворитися з'єднання, наприкладі реакції (4):



Неповне окислення горючих елементів пов'язано з недостатньою подачею окислювача, невідповідній подачі палива і повітря по часу, недостатньому змішуванні палива і повітря. Найбільша кількість теплоти виділяється при повному окисленні горючих елементів.

Витрати палива на горіння визначають по повному згоранню палива в топці котла. Мінімальна кількість повітря  $V_O$ , достатнього для повного згорання одиниці маси палива, називають теоретично необхідною кількістю повітря. Величина  $V_O$  і кількісне співвідношення між масами або об'ємами взаємо реагуючих речовин визначають за реакціями (1) – (3) окислення горючих елементів [1].

Для реакції (1) на 1 кмоль (12,01 кг) вуглецю використовується 1 кмоль кисню, який має при нормальних умовах (температура 20 °С і тиску 0,1 МПа) об'єм 22,4 м<sup>3</sup>, або на 1 кг вуглецю необхідно використати 22,4 : 12,01 = 1,866 м<sup>3</sup> кисню. При цьому утворюється 1,866 м<sup>3</sup> СО<sub>2</sub>. На кількість вуглецю С/100 кг в 1 кг палива використовується  $V_{O_2}^C = 1,866 \text{ C}/100 \text{ м}^3$  кисню і утвориться 1,866 С/100 м<sup>3</sup> СО<sub>2</sub>. Аналогічним чином можуть бути розраховані відповідно за рівняннями (2) і (3). Розхід кисню на спалювання водню і сірки і, відповідно, утворених оксидів при спалюванні одиниці маси палива будуть наступними (м<sup>3</sup>/кг):

$$V_{O_2}^H = 5.55 \frac{H}{100} \quad (5)$$

$$V_{O_2}^S = 0.7 \frac{S}{100} = 0.375 \cdot 1.866 \frac{S}{100} \quad (6)$$

$$V_{H_2O}^H = 11.1 \frac{H}{100} \quad (7)$$

$$V_{SO_2}^S = 0.7 \frac{S}{100} \quad (8)$$

Зі співвідношень (5) – (8) з врахуванням об'ємного вмісту кисню у повітрі (21%) і паливі  $O/(100 \rho_{O_2})$ , отримуємо кількість повітря, теоретично необхідного для повного окислення горючих елементів,

$$V^O = \frac{V_{O_2}^O}{0} \cdot 21 = 0.0476 \left[ 1.866 (C + 0.375S) + 0.265H - \frac{O}{\rho_{O_2}} \right] \quad (9)$$

або

$$V^o = 0.0889 (C + 0.375S) + 0.265H - 0.0333O \quad (10)$$

де С, S, H і O – масові частки (%) горючих елементів і кисню у даному паливі. Переважно  $V^o$  розраховують для робочої маси палива. Для запобігання неповного згорання палива у топку подають кількість повітря  $V_{II}$  більше теоретично необхідного [2].

При проектуванні котлів і аналізі їх роботи користуються коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha$ , який дорівнює відношенню фактично поданого кількості повітря до теоретично необхідного,

$$\alpha = V_{II} / V^o \quad (11)$$

Для покращення умов перебігу процесу згорання і зниження емісії частинок у продуктах згорання витрата повітряного дуття регулюється, поступово змінюючись від верхніх до нижніх секцій котла. Для забезпечення старанного перемішування продуктів згорання повітря повинно подаватися в напрямі, протилежному виходу димових газів із топки котла.

Втрати теплоти у процесі спалювання біомаси визначаються шляхом газового аналізу складу димових газів сучасними приладами [1]. Результатами аналізу є температура димових газів, вміст  $CO_2$ ,  $O_2$  і  $CO$ , на основі яких може бути визначена основна частина втрат. Втрати теплоти визначаються температурою відпрацьованих газів і коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha$ , який визначається зі співвідношення між дійсною кількістю повітря, поданого у топку, і кількістю повітря, теоретично необхідною для повного згорання [4]:

$$\alpha = CO_{2,max} / CO_{2,вим} \quad (12)$$

де  $CO_{2,max}$  – максимально можливий вміст вуглекислого газу для певного виду палива.

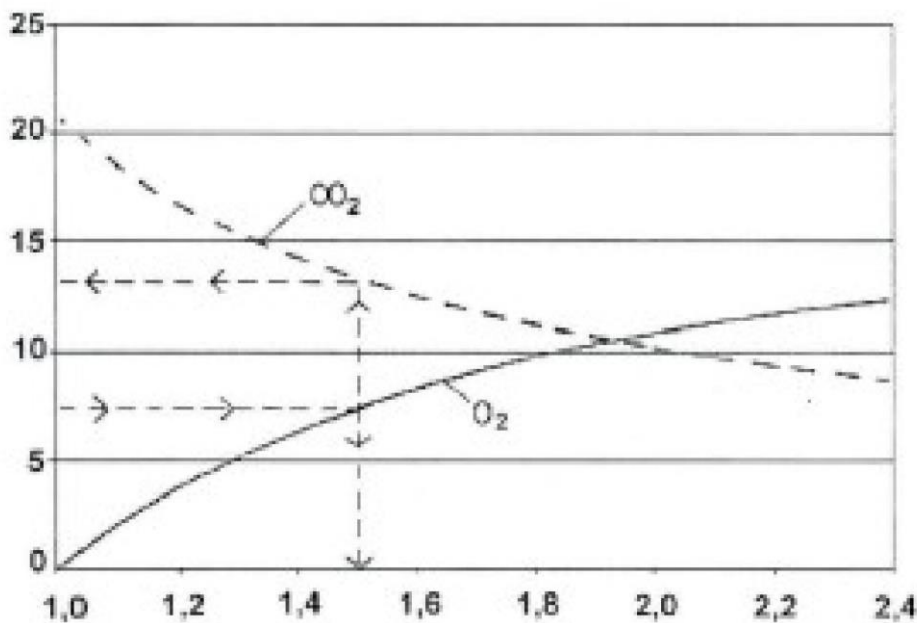
Сучасні газоаналізатори не виміряють безпосередньо вміст вуглекислого газу, а визначають його за вмістом кисню з рівняння:

$$CO_{2,вим} = CO_{2,max} \cdot (1 - O_2/20.94) \quad (13)$$

Оптимальне значення коефіцієнта надлишку кисню завжди повинен бути  $\alpha > 1$  і залежить від технології спалювання і виду палива. Для повного спалювання деревини складно забезпечити рівномірний розподіл повітря по всій зоні горіння, тому коефіцієнт надлишку повітря наближається до  $\alpha = 1,4$ .

Для ефективного протікання процесу горіння деревини значення коефіцієнта  $\alpha$  повинні лежати в межах 1,4-1,6 (рис. 1). Тоді у димових газах буде біля 7,5%  $O_2$  і 13%  $CO_2$ .

З рисунка 1 видно, що оптимальні значення коефіцієнта надлишку повітря знаходяться в межах 1,5 – 2,0. Максимальне значення  $\alpha = 2,0$  можливе у разі спалювання полін, середні значення (1,4 – 1,6) бажані для колотої деревини, а найнижчі (1,2 – 1,3) – для тирси, брикетів, гранул [1]. Тому з метою ефективного спалювання біомаси необхідно регулювати подачу повітря у камеру згорання [2].



Коефіцієнт надлишку повітря,  $\alpha$

Рис. 1 – Рациональний коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  для ефективного спалювання біомаси

Забезпечити оптимальні співвідношення паливо-повітря можливо шляхом застосування автоматичного регулювання процесу горіння в топці, яке здійснюється за рахунок регульованої подачі палива і повітря. Вхідним регулюючим впливом служить подача повітря в топку, а вихідною регульованою величиною – зміст кисню в димових газах.

Розглянута проблема вирішується тим, що ефективність спалювання забезпечується за рахунок інтелектуальної системи дозування повітря в камеру згорання атмосферного котла на основі аналізу відсоткового складу O<sub>2</sub> в димових газах.

Інша проблема, що виникає при спалюванні деревної біомаси, пов'язана з великою кількістю золи (також шлаків).

Плавлення золи залежить від її мінерального складу, і навіть невеликі відмінності в складі можуть істотно змінювати плавкісні характеристики. По складу палива і золи практично неможливо достовірно передбачити плавкість золи.

Для визначення плавкісних характеристик золи існує ряд стандартів: ASTM D тисячі вісімсот п'ятьдесят сім, ISO 540 і DIN 51730.

Вологість свіжоспиляної деревини становить близько 50%, а такої, що провела тривалий час на відкритому повітрі 13-17% (сухі дрова). Вологість пелет складає 5-7%. Хоча пелети досить активно вбирають вологість з навколишнього повітря.

Щільність деревинної речовини однакова для всіх сортів деревини і становить 1,53 г/см<sup>3</sup>. Не плутати з щільністю деревини, вона коливається від 455 кг/м<sup>3</sup> (верба) до 800 кг/м<sup>3</sup> (граб, акація). Щільність пелет однозначно більша 1 г/см<sup>3</sup> (все залежить від виробника, вірніше від стиснення на прес

грануляторі), тому пелети тонуть у воді.

Паливні гранули — екологічно чисте паливо із вмістом золи не більш 3%. При спалюванні гранул в атмосферу викидається рівно стільки CO<sub>2</sub>, скільки було поглинено рослиною під час зростання.

В лабораторних умовах була визначена динаміка зміни температури при горінні деревних гранул на приладі ОТМ по ГОСТ 12.1.044-89, починаючи від 200 °С до максимального значення, а потім назад до 200°С[9].

Для дослідів були підготовлені проби деревних гранул з відносною вологістю 12%. Відібраний матеріал поміщали в мішечки з скло тканини масою 4,1 г, зшиті металічними скріпками, маса випробовуваних зразків по 50 г. Зважування проводили на лабораторних вагах з похибкою вимірювання ±0,1г.

Перед випробуванням внутрішню поверхню реакційної камери приладу ОТМ покрили двома шарами алюмінієвої фольги, товщиною не більше 0,2 мм, яку в міру прогорання або забруднення продуктами горіння замінювали на нову.

Задана температура (200 ± 5°С) газоподібних продуктів горіння в реакційній камері підтримується газовим пальником протягом трьох хвилин.

Зразок закріплювали в тримачі вертикально металевим дротом, вводили за 3-5 с в реакційну камеру, і відчували до досягнення максимальної температури відведених газоподібних продуктів, реєструючи час її досягнення. Попередніми випробуваннями були визначені зразкові межі максимуму температури. Під час основних випробувань досягається максимум визначали витримкою протягом 15-30 с. Тому тривалість випробування на етапі зростання температури від 200 °С визначалася часом досягнення інтуїтивного (на основі минулого досвіду попередніх випробувань) очікуваного максимуму, а потім пальник вимикали. Для реєстрації температури використовували прилад КСП-4 з діапазоном від 0 до 600 ° С, а для відліку часу - секундомір. Відліки проводили через кожні 50 °С при зростанні температури від 200 °С до максимального значення, далі при зниженні температури до 200 °С. Зразок витримували в камері до повного остигання 20 °С, витягували і зважували, визначаючи зольний залишок.

**Результати та їх обговорення.** Дані таблиці піддавали статистичній обробці в програмному середовищі CurveExpert1.3 для отримання стійких закономірностей [7].

Спалювання зразка з деревними гранулами № 1 представлено на рис. 2, залишки – рис. 3.

Модель динаміки температури горіння деревних гранул № 1 у часі з використанням стійкого закону має вигляд

$$T = 254,84033 \exp(-1,57499t^{1,64785}) + 9,55228t^{16,98817} \exp(-0,0076768t^{1,30188})$$

Маса отриманої золи становить 0,3 г або 0,65% первинної маси зразка. Спалювання зразка з деревними гранулами № 2 представлено на рис. 4.

Таблиця 1 – Результати вимірювань температури горіння в часі

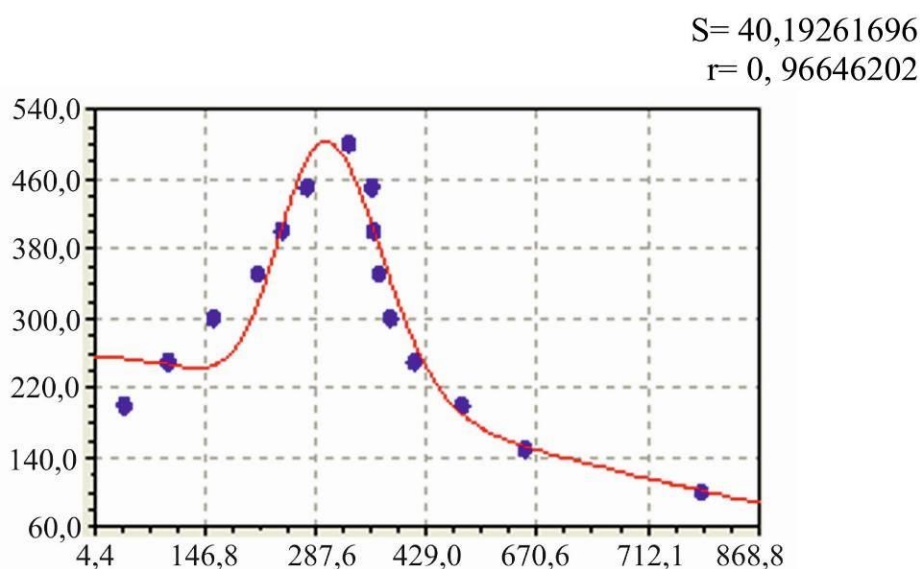
Деревні гранули № 1 (береза)		Деревні гранули № 2 (сосна)	
Час, с	Температура, °С	Час, с	Температура, °С
44	200	37	200
100	250	55	250
157	300	70	300
215	350	92	350
245	400	167	400
276	450	300	450
330	500	325	350
360	450	342	300
363	400	385	250
370	350	465	200
385	300	-	-
415	250	-	-
475	200	-	-

Модель динаміки температури горіння деревних гранул № 2 у часі з використанням стійкого закону має вигляд.

$$T = 162,19912 \exp(-0,0011609t^{1,000002}) + 0,18307t^{1,61242} \exp(-0,00056954t^{1,42414})$$

Процес горіння деревних гранул в 1,3-1,4 рази довше за часом, ніж горіння деревної тріски або тирси. Це пов'язано з високою питомою щільністю гранул 1300-1400 кг/м<sup>3</sup>, в порівнянні з щільністю тріски або тирси [8].

На рис. 6 представлені графіки, які показують динаміку температури горіння випробовуваних зразків.



S – сума квадратів відхилень  
r – коефіцієнт кореляції

Рис. 2 – Зміна температури горіння деревних гранул № 1

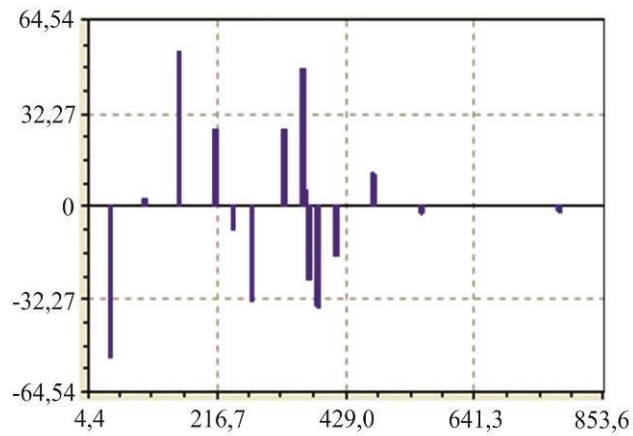


Рис. 3 – Моделювання даних температури горіння залишків деревних гранул

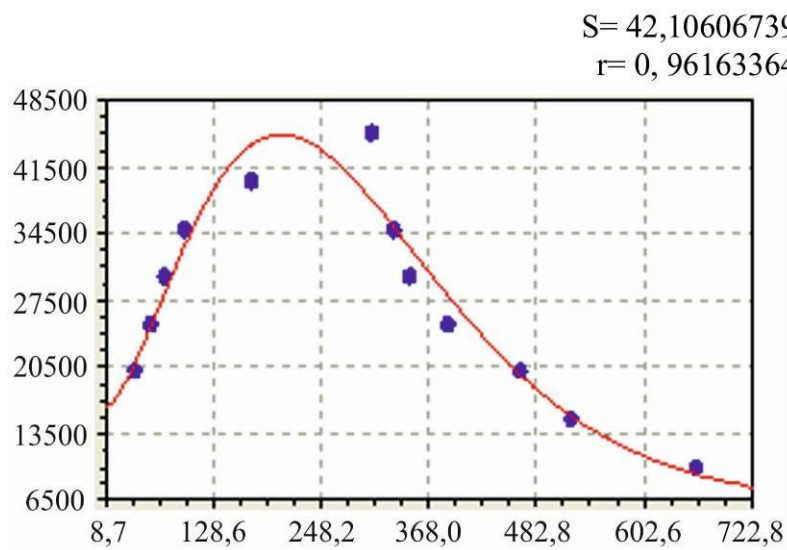


Рис. 4 – Зміна температури горіння деревних гранул № 2

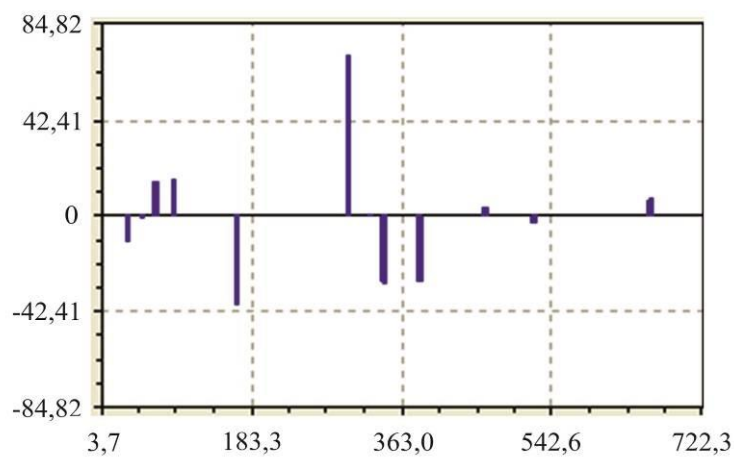


Рис. 5 – Моделювання даних горіння залишків деревних гранул № 2

Максимальна температура відхідних газоподібних продуктів горіння першого зразка становить 500 °С, а другого 450 °С.



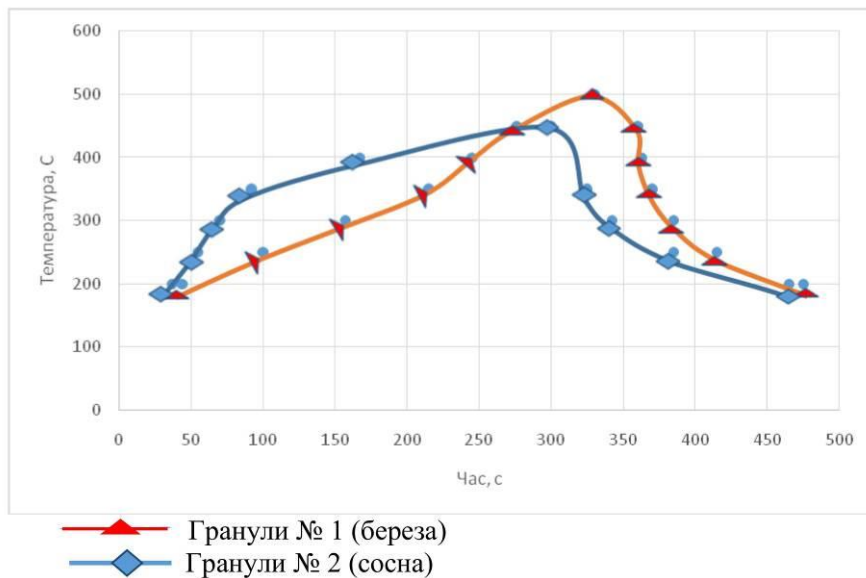


Рис. 6 – Зміна температури горіння деревних гранул № 1 і № 2

**Висновки.** Проведені дослідження свідчать, що у процесі конструювання котлів для спалювання твердої біомаси необхідно враховувати її основні фізико-хімічні характеристики. Процес спалювання твердої біомаси також потребує регулювання подачі повітря, відповідно до вологості та фізико-хімічних властивостей сировини, тобто врахування значення коефіцієнта надлишку повітря. Оптимальне значення коефіцієнта надлишку кисню завжди повинен бути  $\alpha > 1$  і залежить від технології спалювання і виду палива. Ефективність процесу горіння палива забезпечує економічність роботи котла і сприяє захисту навколишнього середовища від забруднення.

Таким чином, процес горіння залежить від різних характеристик палива, в основному, від складу палива, вологості, вмісту летких компонентів, вугілля, щільності, пористості, розмірів часток і площі активної поверхні.

Різні види паливної біомаси в значній мірі відрізняються по щільності паливного матеріалу; також є значні відмінності між твердими і м'якими породами дерев. Деревина твердих порід, наприклад берези, має більш високу щільність, що впливає на значення відношення об'єму камери до споживаної енергії і характеристик горіння палива.

Підвищення вологості деревних відходів призводить до зменшення теплоти згорання палива, збільшення обсягу продуктів згорання, до зниження температури горіння і впливає на вибір технології спалювання.

Для забезпечення оптимального процесу горіння з мінімальними викидами від неповного згорання палива необхідно забезпечити підтримку високої температури горіння, достатньо тривалого часу перебування і оптимального змішування паливних газів з повітрям.

### Список використаних джерел

1. Двойнишников В.А. Конструкция и расчет котлов и котельных установок: Учебник для техникумов по специальности «Котлостроение» /

- В.А. Двойнишников, Л.В. Деев, М.А. Изюмов. – М. : Машиностроение, 1999. – 264 с.
2. Дубровін В.О. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло та ін. – К. : ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с.
  3. Кузнецова А. Використання соломи в Україні – можливості та перспективи. Інститут економічних досліджень та політичних консультацій /А. Кузнецова. – Київ – [Електронний ресурс] Режим доступу: [http://www.ier.com.ua/files/publications/Policy\\_papers/Agriculture\\_dialogue/2010/A\\_gPP\\_31\\_ukr.pdf](http://www.ier.com.ua/files/publications/Policy_papers/Agriculture_dialogue/2010/A_gPP_31_ukr.pdf)
  4. Справочник потребителя биотоплива [под. ред. Виллу Вареса]: Таллиннский технический университет / Виллу Варес, ЮлоКаск, ПеэтерМуйсте, Тыну Пиху, СулевСоосаар. – Таллинн, 2005. – 184 с.
  5. Скрябин В.И. Теплотехника. – М.:ВНТИЦ,2002.- №50200200706
  6. Джон Вос. Использование энергии биомассы для отопления и горячего водоснабжения в республике Беларусь. Методические рекомендации по применению передовой практики. Часть А: Сжигание биомассы [Електронний ресурс]/Джон Вос. – Режим доступа: <http://www.bioenergy.by/practa.htm>. Свободно
  7. Мазуркин П.М. Математическое моделирование. Идентификация однофакторных статистических закономерностей: Учебное пособие/ П.М. Мазуркин, А.С. Филонов. – Йошкар-Ола: МарГТУ,2006. – 292 с.
  8. Головков. С.И. Энергетическое использование древесных отходов/С.И. Головков, И.Ф. Коперин, В.И. Найденов. – М.: Лесная промышленность. 1987. - 224с.
  9. ГОСТ 12.1.044-89. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 52 с.

## **Аннотация**

### **ЭФФЕКТИВНОЕ СЖИГАНИЕ ТВЕРДОЙ БИОМАССЫ**

Есипов А.В., Поляшенко С.А., Манойло В.М., Пикалов А.В.

*В статье рассмотрены вопросы эффективного и полного сгорания твердой биомассы, что есть необходимым условием использования древесины, как экологически приемлемого вида топлива.*

## **Abstract**

### **EFFECTIVE COALING OF SOLID BIOMASS**

A. Iesipov, S. Polyashenko, V. Manoylo, A. Pikalov

*The article deals with the issues of efficient and complete combustion of solid biomass, which is a necessary condition for the use of wood as an environmentally acceptable type of fuel.*