

Бойко М.М., Єфименко В.В., Махоркіна Т.А., Полякова Н.В., Журавльова С.В., Колеснікова Т.М.

Аналіз ефективності заміщення природного газу біомасою в процесі обпалу залізрудних окатишів

Boyko M.M., Yefimenko V.V., Makhorkina T.A., Polyakova N.V., Zhuravlova S.V., Kolesnikova T.M.

Analysis of the efficiency of replacing natural gas with biomass in the iron ore pellet firing process

Мета: Однією з найважливіших задач у металургійній галузі є зниження залежності від природного газу, який використовується в процесах випалювання залізрудних окатишів. Висока вартість і нестабільність поставок природного газу мають значний вплив на економіку та екологію, особливо в умовах прагнення до зменшення викидів CO₂ та інших шкідливих речовин. Заміщення природного газу біопаливом, таким як лігноцелюлозна біомаса, може стати ефективним рішенням, що дозволить знизити споживання викопного палива та поліпшити екологічні показники виробництва. Основною метою даного дослідження є розробка та оптимізація методу використання біопалива в процесі випалювання залізрудних окатишів, що дозволить досягти необхідного рівня температурного режиму, зберігаючи при цьому високу якість продукції та мінімізуючи негативний вплив на навколишнє середовище. **Методика:** Теоретичне та експериментальне обґрунтування можливості заміщення природного газу біопаливом в процесі обпалу залізрудних окатишів проведено за допомогою розрахункових формул, взятих з відповідної літератури, а також з використанням веб-додатку для моделювання та аналізу результатів. **Результати:** Застосування біопалива для заміщення природного газу в процесі обпалу залізрудних окатишів виявило кілька важливих аспектів. Введення частинок біомаси в потік газу дозволило частково замінити природний газ без суттєвого впливу на тепловий режим обпалювальної машини через те, що продукти згоряння біомаси, а також стехіометричний об'єм повітря, необхідного для повного згоряння біомаси мають менший об'єм порівняно з продуктами згоряння та стехіометричним об'ємом повітря для спалювання газу. Це дозволяє нівелювати низьку теплоту згоряння біомаси. За результатами розрахунків і враховуючи реальний досвід заміни природного газу лушпинням соняшника пропонується на кожні 10% об. заміщеного природного газу спалювати 0,2 кг лушпиння соняшника, 0,125 кг деревного вугілля, 0,22 кг тирси і 0,25 кг соломи. Також було розраховано час згоряння частинки палива рослинного походження залежно від її початкового діаметру. Вирішальний фактор, що визначає час згоряння частинки є вміст летючих речовин, що в свою чергу визначає кількість коксового залишку частинки. Горіння коксового залишку частинки є найдовшою стадією у загальному часі згоряння частинки. Отримані результати швидкості згоряння, від найвищої: солома, лушпиння соняшника, дерево, деревне вугілля. Це означає, що солома, як паливо що має найвищу швидкість згоряння, може мати найбільший розмір частинок, що будуть задовільняти технологічним вимогам використання такого виду палива у пальнику обпалювальної машини. Наукова новизна. Встановлено, що продукти згоряння біомаси мають менший об'єм, що дозволяє компенсувати її нижчу теплотворну здатність і мінімізувати вплив на тепловий режим обпалювальної машини. Запропоновано оптимальні співвідношення біомаси для заміщення кожних 10% об'єму природного газу, що включає лушпиння соняшника, деревне вугілля, тирсу і солому. Також, на основі розрахунків часу згоряння частинок біопалива, було встановлено, що солома має найвищу швидкість згоряння, що дозволяє використовувати її з більшим розміром частинок у пальнику обпалювальної машини, задовольняючи технологічні вимоги. Практична значущість. Проведені в роботі розрахунки дозволяють замінити від 40 до 60 об.% природного газу різними типами палива рослинного походження, а також дозволяють оцінити необхідний гранулометричний склад палива для використання в процесі обпалу окатишів.

Ключові слова: залізрудні окатиші, обпал, паливо рослинного походження, спалювання біомаси, швидкість згоряння частинки твердого палива, солома, лушпиння соняшника, дерево, деревне вугілля.

Purpose. One of the most critical challenges in the metallurgical industry is reducing dependence on natural gas used in the iron ore pellet firing process. The high cost and supply instability of natural gas have a significant impact on both the economy and the environment, particularly in the context of efforts to reduce CO₂ emissions and other harmful substances. Replacing natural gas with biofuels, such as lignocellulosic biomass, could provide an effective solution to decrease fossil fuel consumption and improve the environmental performance of production. The primary objective of this study is to develop and optimize a method for using biofuels in the iron ore pellet firing process, aiming to achieve the required temperature regime while maintaining high product quality and minimizing the negative environmental impact. **Methodology.** Theoretical and experimental justification for the replacement of natural gas with biofuels in the iron ore pellet firing process was carried out using calculation formulas from relevant literature, as well as utilizing a web application for modeling and analyzing the results. **Findings.** The application of biofuels to replace natural gas in the iron ore pellet firing process revealed several important aspects. The introduction of biomass particles into the gas stream allowed for

© Бойко М.М. – к.т.н., доц. УДУНТ
Єфименко В.В. – УДУНТ
Махоркіна Т.А. – УДУНТ
Полякова Н.В. – к.т.н., доц. УДУНТ
Журавльова С.В. – к.т.н., доц. УДУНТ
Колеснікова Т.М. – к.соц.н. УДУНТ

Boyko M. – c.t.s., docent USUST
Yefimenko V. – USUST
Makhorkina T. – USUST
Polyakova N. – c.t.s., docent USUST
Zhuravlova S. – c.t.s., docent USUST
Kolesnikova T. – c.s.s. USUST



Ця стаття відкритої доступу за ліцензією CC BY 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>

the partial replacement of natural gas without significantly affecting the thermal regime of the firing machine. This is because the combustion products of biomass, as well as the stoichiometric air volume required for complete biomass combustion, have a smaller volume compared to the combustion products and stoichiometric air volume required for natural gas. This helps to offset the lower calorific value of biomass. Based on the calculations and considering real-world experience with replacing natural gas with sunflower husks, it is proposed to burn 0.2 kg of sunflower husks, 0.125 kg of wood charcoal, 0.22 kg of sawdust, and 0.25 kg of straw for every 10% of replaced natural gas volume. Additionally, the combustion time of biomass particles was calculated depending on their initial diameter. The critical factor determining the combustion time of a particle is the volatile matter content, which in turn determines the amount of the particle's coke residue. The combustion of the coke residue is the longest stage in the overall particle combustion time. The obtained combustion rates, from the highest to the lowest, are as follows: straw, sunflower husks, wood, and wood charcoal. This indicates that straw, as the fuel with the highest combustion rate, can have the largest particle size that meets the technological requirements for use in the firing machine burner. Originality. The combustion products of biomass have a smaller volume, which compensates for its lower calorific value and minimizes the impact on the thermal regime of the firing machine. Optimal biomass ratios have been proposed for replacing every 10% of the natural gas volume, including sunflower husks, wood charcoal, sawdust, and wheat straw. Additionally, based on the calculations of the combustion time of biofuel particles, it was found that straw has the highest combustion rate, allowing for the use of larger particle sizes in the firing machine burner, thus meeting technological requirements. Practical value. The calculations carried out in this work enable the replacement of 40 to 60 vol.% of natural gas with various types of plant-based fuels. Additionally, these calculations provide the means to assess the required granulometric composition of the fuel for use in the iron ore pellet firing process.

Keywords: iron ore pellets, firing, plant-based fuel, biomass combustion, solid fuel particle combustion rate, wheat straw, sunflower husks, wood, charcoal.

Вступ

Основним паливом обпалювальних машин є природний газ. Скорочення споживання природного газу є однією з найважливіших проблем для України. Постійні коливання цін на природний газ створюють залежність у багатьох галузях економіки, особливо в металургії. Також через використання викопного палива збільшуються викиди CO₂ і шкідливих речовин, що негативно впливає на навколишнє середовище. У зв'язку з цим актуальним є вивчення використання біомаси для виробництва залізорудних окатишів. Лігноцелюлозна біомаса є відновлюваним і стійким джерелом тепла та енергії, яке може пом'якшити зміну клімату. Одним з можливих шляхів скорочення споживання природного газу при обпалі окатишів є додавання частинок біомаси у потік газу таким чином заміщуючи деякий об'єм природного газу.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [1] була розглянута можливість заміни деякого об'єму природного газу лушпинням соняшника. За рахунок низької витрати природного газу та мінімальних температур обпалу було досягнуто 60 об.% заміни природного газу, зі збільшенням загального споживання газу вдалося замінити мінімум 40 об.%. Це пояснюється тим, що при великій витраті природного газу утворюється великий тепловий потік. Оскільки швидкість згоряння лушпиння соняшнику в пальнику обмежена, при великій її кількості, що подається в пальник, вона не встигає повністю згоріти в зоні факела, а тепловий потік змінює міцність залізорудних окатишів. Загалом вугілля, біомаса чи інше тверде паливо містить різну кількість вуглецю, кисню, водню, азоту, сірки, води та золи. Частина палива, яка фактично бере участь у процесі горіння, називається горючою масою, частина, яка не бере участі в горінні, називається баластом, наприклад як зола/шлак. Серед цих елементів небажана присутність сірки, оскільки вона реагує з вологою димового газу утворюючи

сірчану кислоту, яка є надзвичайно корозійною для металевих елементів обпалювальної машини [2,3].

Лімітуючим фактором при заміні природного газу паливом рослинного походження є обмежений час що необхідний для повного згорання частинок твердого палива. При великій витраті природного газу утворюється великий тепловий потік. Оскільки швидкість згоряння лушпиння соняшнику в пальнику обмежена, при великій її кількості, що подається в пальник, вона не встигає повністю згоріти в зоні факела, а тепловий потік змінює міцність залізорудних окатишів. Ефективність вигорання частинок палива також впливає на відкладення на вогнетривкій футеровці і на перехід лужноземельних металів у газову фазу [1]. Тому необхідно розрахувати такий розмір частинок, який забезпечить повне згорання палива і не завдасть впливу на технологічний процес обпалу окатишів.

Згоряння частинки передбачає складні фізичні і хімічні взаємодії. Частинка, що потрапила в гарячий газовий потік, нагрівається за рахунок теплообміну $Q_{\text{ср}}$ і випромінювання $Q_{\text{гр}}$ від потоку гарячого газу і від навколишнього середовища. Далі при контакті з киснем відбувається видалення летючих і горіння коксового залишку [2, 4].

Швидкість нагріву вугільних частинок у період займання становить близько 10^3 — 10^4 К/с. Отримані експериментальні дані показують, що час вигорання великих фракцій антрацитового пилу в досліджених умовах пропорційно квадрату вихідного розміру вугільних частинок і слабо залежить від температури газового середовища. Це характерно для дифузійного режиму горіння. Цікаво відзначити, що великі частки антрациту (≥ 150 мкм) і за порівняно низьких температур ($T_g = 1200 \div 1400$ К) вигоряють у дифузійному режимі до дуже малих розмірів - 20 мкм і нижче [5].

За результатами досліджень [5], процес горіння вуглецевого палива складається з чотирьох стадій. Перша стадія - прогрів частки до початку займання летких речовин. Для частки розміром 750 мкм, ця стадія тривала 1,125 с. Друга стадія - горіння летких

у газовій фазі. Тривалість її становить 0,312 с. Фронт полум'я газоподібних летких має форму сфери, дещо витягнуту у вертикальному напрямку. Усередині сфери полум'я чітко видно ще темна вугільна порошок, що не світиться. На фотографіях у цей період спостерігаються також гарячі струмені, що проникають за межі сфери полум'я, - це можуть бути викиди рідких продуктів термічного розкладання вугілля. Третя стадія - розігрів коксового залишку - настає після завершення полум'яного горіння летких. Подальший розігрів коксового залишку відбувається внаслідок хімічного реагування його з киснем. Четверта стадія - вигорання коксового залишку - завершальна стадія процесу. Для частки, що розглядалася, ця стадія тривала 6,3 с [7].

Відносна частка часу вигорання летких становить лише 5–3%. В інтервалі $V_L = 12 \div 60\%$, час горіння летких практично не змінюється, це ж можна сказати і про тривалість займання коксового залишку [7].

Тож для аналізу можливості заміщення природного газу паливом рослинного походження в процесі обпалу залізрудних окатишів, необхідно розрахувати час згорання частинки в залежності від її діаметру та оцінити кількість палива рослинного походження для заміщення об'єму природного газу.

Мета і завдання досліджень

Метою даного дослідження є визначення кількості палива рослинного походження різного типу, яке можна використовувати для заміщення частини витрати природного газу при обпалі залізрудних окатишів, а також розрахунок часу згорання частинки палива різного типу в залежності від її діаметру для визначення максимальної крупності часток палива в умовах спалювання його в пальниках обпалювальної машини.

Матеріали та методи дослідження

Розрізняють три види температур горіння палива: калориметричну (t_k), теоретичну (t_r) та дійсну (t_d). Калориметрична температура – це температура, до якої нагрілися б продукти повного горіння, якби все тепло палива та повітря пішло на нагрівання газів. Теоретична температура враховує ендотермічні реакції дисоціації діоксиду вуглецю та водяної пари, що йдуть зі збільшенням об'єму продуктів згорання. Температура у зоні обпалу максимально сягає 1350°C , за цих температур вище вказані ендотермічні реакції не відбуваються. Дійсна температура враховує тепловіддачу від факела до матеріалу, що нагрівається, і кладки печі. Для визначення дійсної температури горіння палива вводиться поняття пірометричного коефіцієнта, що буде дорівнювати 0,9 [1].

Залежно від типу згорання (коефіцієнт надлишку повітря) газу згорання можуть містити:

– для неповного згорання (коефіцієнт надлишку повітря < 1): CO , CO_2 , SO_2 , H_2O , N_2 .

– для теоретичного або стехіометричного згорання (коефіцієнт надлишку повітря $= 1$): CO_2 , SO_2 , H_2O , N_2 .

– при коефіцієнті надлишку повітря > 1 : CO_2 ,

SO_2 , H_2O , N_2 , O_2 [6].

Для визначення калориметричної температури використовують рівняння теплового балансу:

$$\text{LHV} + q_T + q_B = V_{\text{ПГ}} \cdot C_{\text{ПГ}} \quad (1)$$

де LHV – нижча теплотворна здатність палива, кДж/кг . Для метану - 35880; q_T – фізичне тепло палива, кДж/кг ; q_B – фізичне тепло повітря, кДж/кг ; $V_{\text{ПГ}}$ – обсяг продуктів горіння, $\text{м}^3/\text{кг}$; $C_{\text{ПГ}}$ – середня теплоємність продуктів горіння в інтервалі температур $0 - t_k$, кДж/м^3 . Фізичне тепло повітря та палива відраховується від 0°C .

Фізичне тепло палива та повітря розраховується за формулою:

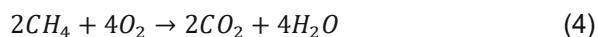
$$q = C \cdot t \cdot V \quad (2)$$

де C – теплоємність за температури підігріву, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; t_r – температура підігріву, $^\circ\text{C}$; V – об'єм, м^3 .

Калориметрична температура розраховується за рівнянням:

$$t_k = \frac{Q_p + q_T + q_B}{V_{\text{ПГ}} \cdot C_{\text{ПГ}}} \quad (3)$$

Згорання природного газу відбувається за реакцією:



Для визначення продуктів згорання палив рослинного походження було використано веб застосунок, який було розроблено за результатами роботи [4]. Для отримання результатів, веб застосунок використовує наступні рівняння.

Стехіометричний об'єм кисню на кілограм сухого палива:

$$V_{\text{O}_2}^0 = \frac{22,41}{100} \left(\frac{C^i}{12} + \frac{H^i}{4} + \frac{S^i - O^i}{32} \right) \quad (5)$$

Стехіометричний об'єм сухого повітря на кілограм сухого палива:

$$V_{\text{a}}^0 = \frac{V_{\text{O}_2}^0}{0,21} \quad (6)$$

Об'єм вуглекислого газу на кілограм сухого палива:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,41}{12} \cdot \frac{C^i}{100} \quad (7)$$

Об'єм водяної пари на кілограм сухого палива:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = \frac{22,41}{100} \left(\frac{H^i}{2} + \frac{W^i}{18} \right) \quad (8)$$

Об'єм діоксиду сірки на кілограм сухого палива:

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,41}{32} \cdot \frac{S^i}{100} \quad (9)$$

Об'єм продуктів згорання:

$$V_{\text{oga}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (10)$$

де C^i , H^i , S^i – доля вуглецю, водню та сірки у паливі, W^i – вологість палива [4].

Необхідні дані для розрахунків видів біопалива, що розглядаються, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Властивості палив рослинного походження

Матеріал	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	O a) [%]	A d [%]	HHV b) [MJ/kg]	LHV c) [MJ/kg]	Джерела
Лушпиння соняшнику	45.82	6.32	2.61	0.14	38.31	6.81	19.31	17.6	[114]
Деревне вугілля	84.18	2.405	0.8025	0.015	9,1525	3.445	30.0865	29.4	[113]
Тирса	44.75	6.31	1.68	0.05	42.94	0.34	18.3	16.6	[115]
Пшенична солома	46.06	5.00	0.53	0.11	48.30	5	17.60	16.2	[111, 120]

Розраховується за різницею,

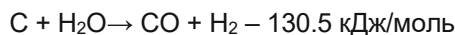
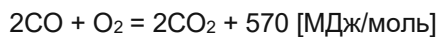
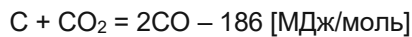
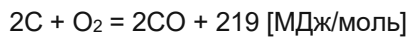
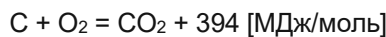
$$O [\%] = 100 - C - H - N - S - Ad$$

$$HHV = 0,3491 \cdot C + 1,1783 \cdot H + 0,1005 \cdot S - 0,0151 \cdot N - 0,1034 \cdot O - 0,0211 \cdot Зола$$

$$LHV = HHV - 2514((9H + W)/100)$$

Аналіз експериментальних даних про тривалість вигорання коксового залишку частинок пилу основних видів енергетичного вугілля, що використовуються на вітчизняних електростанціях показав, що за концентрацій кисню і температур, характерних для пиловугільного факела в топках котлів, горіння вугільних частинок, як правило, відбувається в дифузійному режимі. Виняток становлять лише дрібні фракції антрацитового пилу ($\delta < 100$ мкм), які за низьких концентрацій кисню (менше 5%) і температур газового середовища $T_g < 1750$ K вигоряють в кінетичній області [7].

Набір реакцій що визначає процес вигорання частинки:



При визначенні часу згорання частинок у пальнику робиться ряд припущень:

Час згорання частинки визначається часом згорання коксового залишку.

Збільшення вмісту водяної пари при незмінній температурі сприятиме прискоренню догорання чадного газу. Це призведе до того, що умовний розмір області вигорання СО біля частинки, зменшиться, що не істотно впливає на доступ кисню до поверхні коксу. Це пояснюється тим, що додатковий механізм газифікації вуглецю по реакції 5 нівелюється зменшенням швидкостей гетерогенних реакцій 1-3 через зниження температури. Тому приймається що водяний пар не впливає на час згорання коксової частинки і не береться до уваги при розрахунках швидкості згорання частинки палива [8, 9].

Приймається що частинки палива що згоряють мають сферичну форму.

Час вигорання частинок коксу твердого палива в дифузійному режимі може бути знайдено за емпіричною залежністю:

$$\tau_c = k_c \cdot 2.21 \cdot 10^8 \cdot \frac{\rho_c \delta^2}{T_g^{0.9} [O_2]} \quad (11)$$

де τ_c - тривалість горіння коксового залишку, с; k_c - експериментальний коефіцієнт, що характеризує специфіку вигорання частинок палива даного виду; O_2 - об'ємна концентрація кисню, %; δ - діаметр частинки, м; ρ_c - уявна густина коксового залишку, кг/м³; T_g - температура газу.

За результатами досліджень експериментальний коефіцієнт K_c дорівнював від 0,5 до 2,5. Загалом цей коефіцієнт характеризує відхилення дійсного часу вигорання частинки від розрахункового, через різний вихід летючих речовин що пов'язується з різними швидкостями нагрівання в порівнянні зі стандартним аналізом. Тому припустимо що цей коефіцієнт буде дорівнювати 1 для всіх видів біопалива що розглядаються.

Уявна густина коксового залишку розраховується за рівнянням:

$$\rho_c = \rho_p \cdot \frac{100 - W_p - V_p}{100} \quad (12)$$

де W_p і V_p — вологість і вихід летких речовин на робочу масу, %; ρ_p - дійсна густина палива.

Через те що частинки лушпиння соняшнику, соломки та тирси мають форму що сильно відрізняються від сферичної розрахуємо для них діаметр еквівалентного шару, за формулою:

$$\delta_{ек} = \sqrt[3]{\frac{6abc}{\pi}} \quad (13)$$

Також необхідно врахувати що через більшу поверхню контакту з газом теплоносієм частинки лушпиння соняшнику, соломки та тирси матимуть менший час згорання. Тому можна ввести додатковий коефіцієнт сферичності який буде враховувати цю особливість даних видів палива.

Сферичність Крумбейна [9] розраховується за формулою:

$$\Psi_K = \sqrt[3]{\frac{S \cdot l}{L^2}} \quad (14)$$

де Ψ_K - сферичність Крумбейна, S - мінімальна довжина частинки палива, l - проміжна довжина частинки палива, L - максимальна довжина частинки палива.

Розраховані значення сферичності для лушпиння соняшнику, дерева та соломки відповідно дорівнюють 0,32, 0,43, 0,24.

Результати дослідження

Розраховані об'єми продуктів згорання різних видів біопалива наведені у таблиці 2.

Для розрахунку часу згорання частинки палива

рослинного походження, необхідно визначити уявного стану коксового залишку за рівнянням 12. Результати розрахунку наведені у таблиці 3.

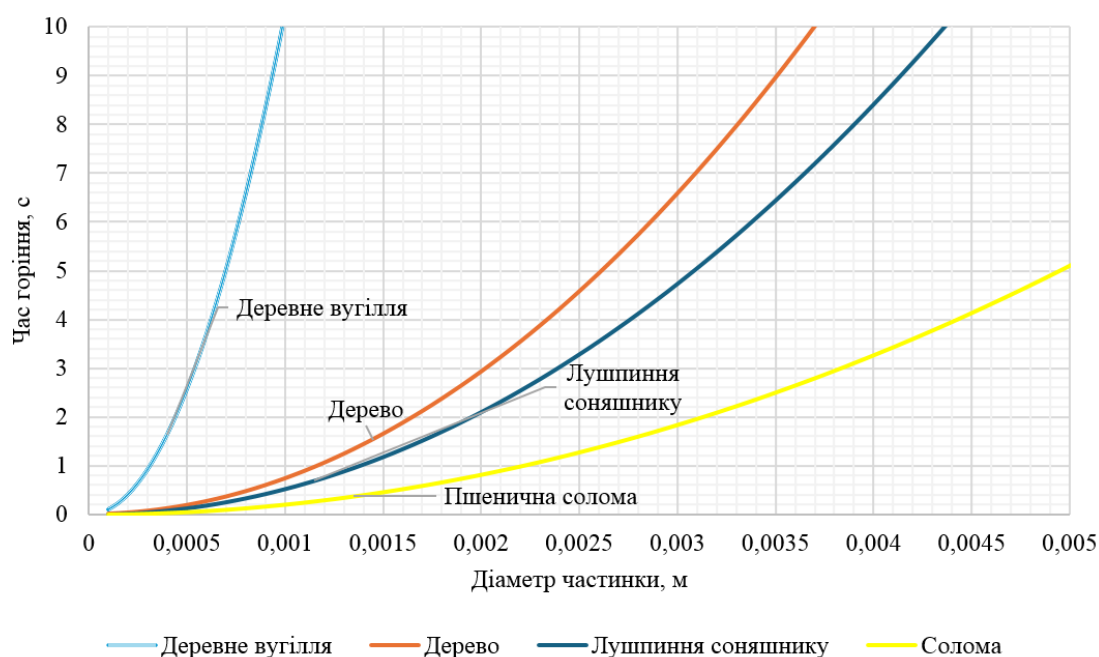
Таблиця 2 – Об'єми продуктів згорання для 1 кілограму твердого палива рослинного походження, м³.

Матеріал	VCO ₂	VH ₂ O	VSO ₂	VN ₂	V повітря стехіометричний	Σ V
Лушпиння соняшника	0,85	0,8	0,00098	3,56	4,48	5,23
Деревне вугілля	1,57	0,29	0,0001	6,19	7,82	8,05
Тирса	0,83	0,83	0,00035	3,35	4,23	5,03
Солома	0,86	0,67	0,00077	3,02	3,82	4,55
Природний газ	1	2		7,52	9,52	10,52

Таблиця 3 – Властивості палив рослинного походження і розрахована уявна густина коксового залишку

Матеріал	Дійсна густина, кг/м ³	Вологість, %	Вміст летких речовин, %	Уявна густина коксового залишку, кг/м ³	Джерела
Лушпиння соняшнику	644,4	8,4	72,2	125	[1, 8]
Деревне вугілля	1200	5	30	780	[1, 9]
Тирса	1360	10,5	80	129,2	[1, 8]
Пшенична солома	613	9,62	79,82	64	[8, 9]

На рисунку 3 зображено графік за результатами розрахунків за рівнянням 11.



Рисunek 3. - Залежність часу вигорання частинки палива від діаметру

Обговорення результатів

Аналізуючи результати розрахунків об'ємів димових газів різних видів біопалива, що наведені в таблиці 2 можна помітити, що згорання твердого палива в результаті дає менший сумарний об'єм димових газів, а також потребує менший стехіометричний об'єм повітря в порівнянні зі згоранням природного газу. Це дозволяє спалювати необхідну

кількість твердого палива для збереження теплового ефекту заміщеного об'єму природного газу. В результаті додавання палива рослинного походження у пальник не буде значним чином змінювати тепловий режим обпалювальної машини. За результатами розрахунків і враховуючи реальний досвід заміни природного газу лушпинням соняшника

пропонується на кожні 10% об. заміщеного природного газу спалювати 0,2 кг лушпиння соняшника, 0,125 кг деревного вугілля, 0,22 кг тирси і 0,25 кг соломи.

В таблиці 3 наведено результати розрахунків уявної густини коксового залишку. Показник уявної густини коксового залишку має лінійний вплив на швидкість вигорання частинки палива. Сира біомаса має меншу уявну густину коксового залишку, аніж оброблена біомаса, в даному випадку деревина, що отримана в результаті піролізу. Вирішальний вплив на густину коксового залишку має вміст летких речовин біомаси. Це підтверджується рядом експериментальних даних.

Так стверджується що вуглецевий залишок частинки біомаси відрізняється від вуглецевого залишку вугілля через меншу щільність частинок, неправильну форму та високу пористість. У роботі [9] досліджували реакційну здатність горіння вуглецевого залишку, отриманого з деревини сосни та проса. Вони повідомили, що обидва вугілля біомаси мають високу реакційну здатність — в порівнянні з реакційною здатністю високолеткого

бітумінозного вугілля. Реакційна здатність вуглецевого залишку дещо знижується під час горіння, оскільки неорганічні компоненти зазнають фізичного та хімічного перетворення, а також тому, що більше реакційноздатного вуглецю окислюється на ранній стадії. У роботі [10] вивчали реакційну здатність вугілля сирі та торрефірованої біомаси, і виявили, що торрефікована біомаса менш реакційноздатна, ніж сира біомаса.

Аналізуючи рисунок 3 можна зробити висновок, що деревне вугілля має найбільшу тривалість вигорання через менший вміст летких речовин у порівнянні з іншими видами біомаси. Через це утворюється коксовий залишок з високою уявною густиною, який потребує значний час для вигорання. На основі побудованого графіку можна визначити необхідний гранулометричний склад палива для використання у пальнику опалювальних машин. Залежності від часу перебування частинки в зоні горіння, можна визначити рекомендований гранулометричний склад палива рослинного походження що додається у пальник опалювальної машини.

Таблиця 4 – Рекомендований гранулометричний склад для різних видів палива рослинного походження що додається у пальник в залежності від часу перебування частинок в зоні згорання.

Час перебування, с	1	2	3	4	5
Деревне вугілля, мм	0,25	0,4	0,52	0,65	0,7
Тирса, мм	1,2	1,7	2	2,3	2,7
Лушпиння соняшнику, мм	1,4	2	2,4	2,7	3,1
Пшенична солома, мм	2,1	3	3,7	4,5	5

Висновки

Проведено розрахунки кількості палива рослинного походження, що може бути спалено в зоні обпалу в якості заміни об'єму природного газу. Розраховано об'єм димових газів палива рослинного походження. Запропоновано оптимальні пропорції лушпиння соняшника, деревного вугілля, тирси і соломи для заміщення кожних 10% об'єму природного газу - 0,2 кг лушпиння соняшника, 0,125 кг деревного вугілля, 0,22 кг деревини і 0,25 кг соломи.

Проведено розрахунки уявної густини коксового залишку різних видів палива рослинного походження. На основі отриманих даних визначено час згорання частинки палива в залежності від її діаметру. На основі розрахунків часу горіння частинок було визначено, що солома має найвищу швидкість згорання. Це дозволяє використовувати її у пальнику опалювальної машини з більшим розміром частинок: 5 мм при часі перебування в зоні горіння 5 секунд, задовольняючи при цьому технологічні вимоги.

Перелік посилань

1. Kieush L. et al. Research paper production of iron ore pellets by utilization of sunflower husks //Acta Metallurgica Slovaca. – 2021. – Т. 27. – №. 4. – С. 167-171.
2. Paraschiv, L. S., Serban, A., & Paraschiv, S. (2020). Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal/biomass/solid waste) and analysis of flue gas composition. *Energy Reports*, 6, 36-45.
3. Choi, S. and C. H. Kruger (1985). "Modeling coal particle behavior under simultaneous devolatilization and combustion." *Combustion and Flame* 61(2): 131-144.
4. Toporov, D. D. (2014). Chapter 4 - Mathematical Modelling and Model Validations. *Combustion of Pulverised Coal in a Mixture of Oxygen and Recycled Flue Gas*. Boston, Elsevier: 51-97.
5. Spliethoff H., Spliethoff H. *Combustion Systems for Solid Fossil Fuels* //Power Generation from Solid Fuels. – 2010. – С. 221-359.
6. Wornat, M. J., R. H. Hurt, K. A. Davis and N. Y. Yang (1996). Single-particle combustion of two biomass chars. *Symposium (international) on Combustion*, Elsevier.
7. Li, J., M. C. Paul, P. L. Younger, I. Watson, M. Hossain and S. Welch (2015). "Characterization of biomass combustion at high temperatures based on an upgraded single particle model." *Applied Energy* 156: 749-755.
8. Grotkjær, T., Dam-Johansen, K., Jensen, A. D., & Glarborg, P. (2003). An experimental study of biomass ignition☆. *Fuel*, 82(7), 825-833.

9. Blott S. J., Pye K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification // *Sedimentology*. – 2008. – Т. 55. – №. 1. – С. 31-63.

References

1. Kieush, L. et al. (2021). Research paper production of iron ore pellets by utilization of sunflower husks. *Acta Metallurgica Slovaca*, 27(4), 167-171. <https://doi.org/10.36547/ams.27.4.1052>
2. Paraschiv, L. S., Serban, A., & Paraschiv, S. (2020). Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal/biomass/solid waste) and analysis of flue gas composition. *Energy Reports*, 6, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.016>
3. Choi, S. & Kruger, C. H. (1985). Modeling coal particle behavior under simultaneous devolatilization and combustion. *Combustion and Flame*, 61(2), 131-144. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(85\)90159-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(85)90159-2)
4. Toporov, D. D. (2014). Chapter 4 - Mathematical Modelling and Model Validations. In *Combustion of Pulverised Coal in a Mixture of Oxygen and Recycled Flue Gas*. (pp. 51-97). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099998-2.00004-7>
5. Spliethoff, H. (2010). Combustion systems for solid fossil fuels. In *Power Generation from Solid Fuels*. Part of the book series: Power Systems. (pp. 221-359). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02856-4_5
6. Wornat, M. J., Hurt, R. H., Davis, K. A. and Yang, N. Y. (1996). Single-particle combustion of two biomass chars. *Symposium (International) on Combustion*, 26(2), 3075-3083. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(96\)80151-2](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(96)80151-2)
7. Li, J., Paul, M. C., Younger, P. L., Watson, I., Hossain, M. & Welch, S. (2015). "Characterization of biomass combustion at high temperatures based on an upgraded single particle model. *Applied Energy*, 156, 749-755.
8. Grotkjær, T., Dam-Johansen, K., Jensen, A. D., & Glarborg, P. (2003). An experimental study of biomass ignition. *Fuel*, 82(7), 825-833. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00369-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00369-1)
9. Blott, S. J., & Pye, K. (2008). Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*, 55(1), 31-63. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00892.x>

Надійшла до редакції / Received by the editorial board: 13.12.2023

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.02.2024