С.Г. Положай¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: s.polozhaj@mail.ru

С.В. Мазур², канд. техн. наук, директор, e-mail: mazur@optima.com.ua

С.В. Музичук³, технічний директор, e-mail: tov-lvsp@ukr.net

І.М. Райковський³, головний інженер, e-mail: tov-lvsp@ukr.net

¹Український державний хіміко-технологічний університет (Дніпро, Україна)

²ТОВ «Сігма-інвест» (Дніпро, Україна)

³ТОВ «Любомирське вапняно-силікатне підприємство» (село Нова Любомирка, Україна)

Підвищення ефективності випалу вапна в обертовій печі з використанням пило-деревного палива

Узагальнено матеріали публікацій, присвячених темі заміни природного газу на біопаливо при випалюванні в обертових печах вапна для металургійної, будівельної та інших галузей промисловості. Найбільш відомими і поширеними у промисловій практиці є науково-технічні рішення щодо використання в обертових печах при випалюванні вапна у якості палива замість природного газу подрібнених деревних пелет. Таку технологію застосовують в найбільших обсягах на підприємствах Швеції, Фінляндії. На основі аналізу результатів опублікованих досліджень показано, що обов'язковою умовою для факельного спалювання пелет в обертових печах є їх подрібнення до розмірів фракції менше 1 мм. Проаналізовано технічні рішення, які дозволяють при випалі вапна в обертових печах замінювати 50–70 % природного газу відходами виробництва сільськогосподарської продукції, зокрема лушпинням соняшнику. Теоретично і експериментально обґрунтовано можливість і ефективність заміщення природного газу в обертових печах для випалу вапна пило-деревним паливом, яке отримують із відходів деревообробної промисловості північно-західного регіону України. Наведено дані щодо складу обладнання і технології випалу вапна в обертовій печі для металургійної, будівельної та інших галузей промисловості на Любомирському вапняно-силікатному підприємстві, розташованому в Рівненській області. Викладено результати досліджень, виконаних на промисловому обладнанні Любомирського вапняно-силікатного заводу. Розглянуто основи технології виробництва вапна при використанні в обертових печах пило-деревного палива.

Показано, що деревинна паливна щепка потребує попередньої підготовки перед спалюванням. Визначено параметри пило-деревного палива, необхідні для його використання у обертових печах при випалюванні вапна. Придатність зазначеного палива оцінювали повнотою його згоряння, яку визначали кількістю залишкового вуглецю у вапні. Встановлено вимоги до палива щодо вологості та ступеня помелу відходів деревини. Досліджено ефективність використання пило-деревного палива залежно від його вологості. Показано, що висушування деревини до вологості не більше 10 % є достатнім для забезпечення температури факела 1400 °С. За результатами досліджень розроблено та впроваджено на практиці технологічну схему підготовки такого палива для використання у якості палива в обертових печах при випалюванні вапна. Наведено параметри побудованої та введеної в експлуатацію у 2018 р. на Любомирському вапняно-силікатному заводі технологічної лінії потужністю 2,4 т/год підготовки пило-деревного палива для обертової печі. Реалізоване рішення дозволило замінити 90–95 % природного газу при випалюванні вапна в обертовій печі № 1 Любомирського вапняно-силікатного підприємства на пило-деревне паливо. Досвід дворічної експлуатації обертової печі на пило-деревному паливі засвідчив, що підприємство стабільно виробляє вапно 1-го та 2-го сортів. Промислова практика підтвердила правильність науково-технічних рішень, розроблених під час дослідницьких робіт. Показано перспективність додаткових досліджень, спрямованих на реалізацію отриманих наукових рішень на інших промислових об'єктах відповідного призначення, для збільшення масштабів використання пило-деревного палива для заміни природного газу.

Ключові слова: вапно, виробництво, обертова піч, біопаливо, відходи лісопереробки, природний газ.

Постановка проблеми. Різниця у вартості теплової енергії, яка отримується при згорянні різного палива, визначає практичну зацікавленість заміщення газу, вугілля та мазуту, які традиційно використовуються у технології випалювання вапна, на біопаливо. Для Любомирського вапняно-силікатного підприємства (ЛВСП), розташованого у Рівненській області, найбільш дешевим і доступним джерелом тепла є відходи чисельних лісопереробних підприємств регіону. Тому роботи, спрямовані на їх використання у якості палива, є перспективними і економічно виправданими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі технічні рішення, які дозволяють при випалюванні вапна в обертових печах замінити 60–70 % природного газу відходами сільгоспвиробництва, зокрема лушпинням соняшнику. Подальше підвищення частки таких відходів для заміщення газу потребує реалізації ряду нових науково-технічних рішень. До відомих науково-технічних рішень можна віднести розробки фірм ANDRITZ AG (Швеція) і VALMET (Фінляндія) [1, 2] щодо використання подрібнених деревних пелет при випалюванні вапна у обертових печах. Зазначені підприємства практикують сезонне заміщення мазуту на подрібнені деревні пелети у той час, коли попит на них падає. Для спалювання використовуються мультипаливні пальники. Відомо також, що, наприклад, Криворізький гірничо-металургійний комбінат ПАТ «Арселор-Міттал Кривий Ріг» у співпраці з Інститутом газу НАН України дообладнав обертові вапновипальні печі № 4 та № 5 додатковими пальниками, розташованими над газовими, і системою подачі в них лушпиння соняшнику у якості палива. При цьому будь-яка спеціальна підготовка соняшникового лушпиння перед спалюванням не проводиться. Частка природного газу, заміщеного цим біопаливом, склала 50–70 % [3].

Мета роботи. Основним видом енергетичних відходів у північно-західному регіоні України, де розташоване ЛВСП, є деревинна паливна щепка хвойних порід, переважно сосни. Щепка, як і всі інші види твердого палива, вимагає попередньої підготовки перед спалюванням. Таким чином, основною метою досліджень та практичних робіт було: визначення па-

раметрів палива, необхідних для його використання у обертовій печі, розробка оптимальної технологічної схеми паливopідготовки; будівництво ділянки паливopідготовки і переведення вапновипальної печі № 1 ЛВСП на зазначене, альтернативне газу паливо.

Об'єкт і результати досліджень. Науково-дослідні роботи виконували на промисловій базі Любомирського вапняно-силікатного підприємства. Завдання передбачало заміщення природного газу пило-деревним паливом, яке отримується із відходів лісопереробної промисловості північно-західного регіону України. Під час дослідницьких робіт теоретично оцінили технічні і економічні можливості використання даного палива. При проведенні експериментів безпосередньо на промисловому обладнанні визначили вимоги до палива по вологості і ступеню подрібнення. Придатність палива оцінювали повнотою його згорання, яка визначалася за кількістю залишкового вуглецю у вапні.

Випал вапна на Любомирському вапняно-силікатному підприємстві здійснюють в обертовій печі діаметром 2,5 і довжиною 57 м. До виконання цього дослідження у якості палива використовували природний газ. Особливістю підприємства є використання у якості сировини крейди однойменного родовища. Його розвідані запаси становлять понад 25 млн т. Вміст карбонату кальцію по всьому родовищу не нижче 90 % (табл. 1), а 88 % запасів придатні для виготовлення вапна першого ґатунку.

Варто підкреслити, що 70 % розвіданих запасів Любомирського родовища відносяться до класу «А» карбонатних порід і містять менше 2 % домішок силікатів. У крейді зміст SO_3^{2-} менше 0,05 %, а P_2O_5 – менше 0,1 %, що робить це родовище перспективним для виробництва вапна різного призначення, в тому числі для використання в чорній металургії.

Для подачі і спалювання твердого палива на обертовій печі встановили твердопаливний пальник розробки Інституту газу НАН України. Подрібнене деревне паливо подається на спалювання спеціальною пневмотрасою. Витрати транспортного повітря становлять 0,5–1,0 $\text{м}^3/\text{кг}$ палива.

Деревинну щепу вирішили використовувати у якості палива, альтернативного природному газу, ви-

Таблиця 1

Хімічний склад крейди Любомирського родовища

Компоненти	CaCO_3	MgCO_3	$\text{RO}_2 + \text{R}_2\text{O}_3$	R_2O	SO_3^{2-}	P_2O_5	в.п.п.*
Вміст, %мас.	90,71–99,05	0,21–2,09	0,24–7,41	0,05–0,20	0,00–0,16	0,05–0,11	41,50–43,76

* - витрати при прожарюванні

Таблиця 2

Склад і властивості паливної щепи, яка постачається на ЛВСП

Хімічний склад горючої частини щепи, %				Зола, %	Волога, %	Пісок, %	Розміри щепи, мм	Теплотворна здатність, $Q_{\text{p}}^{\text{н}}$, МДж/кг
С	Н	О	Н					
49,3–49,5	6,0–6,3	44,0–44,4	0,1	0,7–1,6	25–50	0,5–3,0	15–50	7,1–13,0

Рис. 1. Залежність температури горіння і теплоти згоряння щепи від її вологості: 1 – температура згоряння при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,2$; 2 – теплота згоряння

ходячи з наступних міркувань. Паливна деревинна щепка є продуктом переробки відходів розпилювання ділової деревини, так званого «обапола», який на спеціальних машинах «щепобойках» різної конструкції подрібнюється на щепу. Крім того, на щепу переробляються гілки та інші неділові відходи деревини. Склад і властивості щепи, яка надходить на ЛВСП, наведено у табл. 2. Результати аналізів засвідчили (див. табл. 2), що при постійному хімічному складі горючої частини щепи її вологість, записоченість та розміри можуть значно змінюватися. Розміри щепи залежать від типу і налаштування подрібнюючого обладнання. Приблизно 2–5 % обсягу щепи припадає на так звані «хвости» – не подрібнені фрагменти деревини розміром 100–300 мм.

При використанні щепи у якості палива для факельного пальника обертової печі потрібна її додаткова сушка та подрібнення. Сушка дозволяє значно збільшити калорійність палива, яке подається на спалювання і підвищити температуру його горіння (рис. 1) і тим самим збільшити коефіцієнт корисної дії процесу випалу (η), оскільки обертову піч можна розглядати як теплову машину. У першому наближенні цей коефіцієнт визначається співвідношенням $\eta = (T_n - T_k)/T_n$, де T_n – температура горіння палива; T_k – температура вихідних газів із печі. Підвищення температури горіння твердого палива також прискорює процес його займання і згоряння [3–5]. Останнє особливо важливо для формування необхідної довжини палаючого факела.

Розрахунки залежності температури горіння пило-деревного палива від його вологості (крива 1, рис. 1) призводять до висновку про недоцільність висушування деревини до вологості менше 10 %, оскільки при такій вологості досягається достатня для ефективного випалювання вапна температура факела 1400 °C. При зазначеній температурі швидкість декарбонізації вапняних порід перевищує 1 мм/хв. Це дозволяє випалювати вапно першого ґатунку у відносно коротких печах із співвідношенням довжина/діаметр менше, ніж 30/1 [6, 7].

Рис. 2. Залежність вмісту залишкового вуглецю незгорілого палива у вапні (х) та кількості фракції розмірами більше 1 мм в пило-деревному паливі (о) від розміру отворів сит дробарки при помелі щепи

Другим основним чинником, який впливає на можливість і ефективність факельного спалювання твердого палива, є тонина його помелу. Відомі джерела рекомендують максимальний розмір часток пило-деревного палива для факельного спалювання не більше 1 мм [2, 8]. На ЛВСП для подрібнення висушеної щепи використали модернізовану молоткову дробарку типу СМД-147. Модернізація її зводилася до установки вузла кріплення листових ґратчастих сит замість литих колосників. Швидкість обертання ротора підвищили до 1600 об/хв. Для виготовлення сит використали перфорований металевий лист товщиною 3 мм з круглими отворами типу Rv (тип 1) згідно з ТУ 23.2.2067-94. Експериментальні помели щепи проводили на ситах з отворами різного діаметру у діапазоні 3–6 мм. Якість подрібнення щепи оцінювали за залишком після розсівання на ситі з отворами 1 мм. Параметри роботи печі на паливі з різним ступенем подрібнення щепи замірювали протягом однієї зміни, тобто протягом 12 годин з інтервалом у 2 години. Результати замірів наведено на рис. 2.

Базова витрата природного газу при продуктивності печі по вапну 5 т/год становила 1180 м³/год. При подачі пило-деревного палива витрати газу були знижені до 80 м³/год і зафіксовані на цьому рівні. Подальше зниження подачі газу, у тому числі і до повного його відключення, призводило до втрати стабільності горіння і періодичного (кожні 30–60 хв.) неконтрольованого зниження температури у зоні випалу від 1350 до 1100 °C.

Результати досліджень засвідчили, що навіть при використанні сітки діаметром 3 мм не вдається досягти стовідсоткової повноти згоряння щепи. Частки палива великих розмірів не встигають повністю згоріти. Вони падають на випалений матеріал і виносяться із печі з випаленим вапном, що підвищує витрати палива. Мінімальні витрати пило-деревного палива складали 400–420 кг/т вапна при використанні сітки з отворами 3 мм у процесі подрібнення щепи. Максимальні – 480–510 кг/т вапна при використанні сітки з отворами діаметром 6 мм. На жаль, промисловість

Рис. 3. Технологічна схема підготовки біопалива (позначення обладнання наведено у тексті статті)

України не випускає перфорований сталевий лист товщиною 3 мм з меншим діаметром отворів, а використанню сіток з меншою товщиною листа заважає їх низька міцність.

Крім недостатнього подрібнення щепи при помелі з використанням сита з отворами діаметром 3 мм незадовільною є і продуктивність молоткової дробарки, яка не перевищувала 400 кг/год. Для досягнення необхідної продуктивності 2,0–2,2 т/год паливного комплексу потрібно використання шести дробарок. Додаткові витрати електроенергії на подрібнення пило-деревного палива у цьому випадку становлять 50–60 кВт·год на тонну вапна.

Низька ефективність молоткової дробарки при подрібненні щепи обумовлена великим коефіцієнтом подрібнення (співвідношенням середньої крупності матеріалу на вході і виході з дробарки), який знаходиться у діапазоні 50–100. Тому для реалізації виробничого процесу прийняли технологічну схему не з паралельною, а з послідовною установкою 3-х молоткових дробарок (рис. 3). Це дозволило зменшити коефіцієнт подрібнення на кожному етапі до значення 4–6 і отримати необхідну продуктивність комплексу підготовки пило-деревного палива на рівні 2,4 т/год при питомій витраті електроенергії на подрібнення деревини 25–30 кВт·год. Побічним позитивним ефектом стало зменшення до 5–7 % кількості великих часток (розміром більше 1 мм) щепи у готовому пило-деревному паливі. Остаточний вуглець від незгорілого пило-деревного палива, виробленого за запропонованою технологією, або не виявлявся зовсім, або визначався у незначущій кількості. Витрати пило-деревного палива знизилися до 380–400 кг/т вапна. Треба відзначити, що дробарку першої стадії дроблення (позиція 7, на рис. 3) було встановлено безпосередньо після живильника вологої щепи (3) до сушильного барабана (6), в якому подрібнена до розмірів менше 8 мм щепи висушується до вологості 8–10 %. Це дозволило підняти продуктивність процесу сушіння з 1 до 3 т/год.

Істотною особливістю прийнятої на ЛВСП схеми підготовки пило-деревного палива є наявність техно-

логічного розриву між молотковими дробарками другої (8) і третьої (9) стадії дроблення, в якому розміщується відкритий проміжний бункер з живильником (4) (див. рис. 3). Це дозволяє крім щепи використовувати дрібні відходи лісопереробки (шліфувальний пил фанерного виробництва, тирсу), які не потребують додаткової сушки. Тобто без використання ділянки сушки і грубого подрібнення, що знижує витрати на підготовку пило-деревного палива. Волога щепи зберігається на відкритому майданчику (1), а сухі подрібнені відходи – на критому складі палива (2).

Після введення у 2018 р. в експлуатацію комплексу паливopідготовки, Любомирське вапняно-силікатне підприємство стабільно працює на пило-деревному паливі, випускаючи грудкове вапно першого і другого ґатунків. Порівняльний хімічний аналіз вапна, випаленого з використанням пило-деревного палива і на чистому природному газі, не виявив значних відмінностей у хімічному складі. Зокрема вміст SiO_2 залишився у межах 0,7–1,8 %, лужних оксидів – близько 0,1–0,15 %. У той же час вміст цих компонентів в пилу, що вловлює система аспірації печі, у 1,3–1,5 рази вищий. Це дозволяє обґрунтовано припустити, що переважна частина попелу, який утворюється при згорянні палива, не осідає у печі, а виноситься у вигляді пилу димовими газами.

Висновки за результатами досліджень і виробничих випробувань

У результаті виконаних дослідницьких робіт та модернізації виробництва на Любомирському вапняно-силікатному підприємстві введено в експлуатацію комплекс з підготовки пило-деревного палива, яке використовується для заміщення природного газу. Досягнуто ступеня заміщення газу пило-деревним паливом на рівні 90–95 %, що дозволило суттєво знизити витрати природного газу і відповідно зменшити собівартість випаленого вапна. Використання пило-деревного палива дозволяє отримувати вапно високої якості, у тому числі і для металургійної промисловості.

Статтю підготовлено за результатами досліджень, виконаних згідно з планом науково-технічного співробітництва Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України, Українського державного хіміко-технологічного університету і ТОВ «Любомирське вапняно-силікатне підприємство».

ЛІТЕРАТУРА

1. HELIOS SHINES BRIGHT AT SCA ÖSTRAND.
URL: <https://www.andritz.com/resource/blob/284120/368d59ce45788f22ee43b4a0d7fdbbfa/helios-shines-bright-at-sca-ostrand-data.pdf> (дата звернення 12.01.2021).
2. Using wood powder as fuel in lime kilns.
URL: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/wood_powder_in_lime_kilns_whitepaper.pdf (дата звернення 12.01.2021).
3. Лысенко А.А., Пьяных К.Е., Антошук Т.А., Пьяных К.К. Использование биотоплива для обжига материалов во вращающихся печах. Труды XVII Междунар. конфер. «Теплотехника и энергетика в металлургии», Днепропетровск, Украина 7–9 окт. 2014 г. Днепропетровск: Нац. металлург. акад. Украины, 2014. С. 123–124.
4. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
5. Карп И.Н., Пьяных К.Е., Колесник В.В., Орлик В.Н., Юдин А.С. Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2010. № 5. С. 13–20.
6. Роберт С. Бойтон. Химия и технология извести. Сокращенный перевод с английского. М.: Издательство литературы по строительству, 1972. 239 с.
7. Троценко Л.Н. Особенности конструкции и тепловой работы вращающихся печей и перспективные направления их усовершенствования. Обзор. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2016. № 4. С. 61–68.
8. Карп И.Н., Пьяных К.Е., Провалов А.Ю., Юдин А.С. Исследование динамики выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника в кипящем слое. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2010. № 3. С. 9–13.

Надійшла 19.01.2021

REFERENCES

1. HELIOS SHINES BRIGHT AT SCA ÖSTRAND.
URL: <https://www.andritz.com/resource/blob/284120/368d59ce45788f22ee43b4a0d7fdbbfa/helios-shines-bright-at-sca-ostrand-data.pdf> (last accessed 12.01.2021) [in English].
2. Using wood powder as fuel in lime kilns.
URL: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/wood_powder_in_lime_kilns_whitepaper.pdf (last accessed 12.01.2021) [in English].
3. Lysenko, A.A., Pyanykh, K.E., Antoshchuk, T.A., Pyanykh, K.K. (2014). Use of biofuels for firing materials in rotary kilns. Proceedings of the XVII International. conf. "Heat engineering and energy in metallurgy", October 7–9. Dnepropetrovsk: Nat. metallurg. acad. of Ukraine, pp. 123–124 [in Russian].
4. Babi, V.I., Kuvaev, Yu.F. (1986). Combustion of coal dust and calculation of a coal torch. Moscow: Energoatomizdat, 208 p. [in Russian].
5. Karp, I.N., Pyanykh, K.E., Kolesnik, V.V., Orlik, V.N., Yudin, A.S. (2010). Mathematical modeling of the wood particle combustion process. *Energy technologies and resource saving*, no. 5, pp. 13–20 [in Russian].
6. Robert C. Boyton. (1972). Chemistry and technology notifications. Abbreviated translation from English. Moscow: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 239 p. [in Russian].
7. Trotsenko, L.N. (2016). Features of design and thermal work of rotating furnaces and perspective directions of their improvement. Review. *Energy technologies and resource saving*, no. 4, pp. 61–68 [in Russian].
8. Karp, I.N., Pyanykh, K.E., Provalov, A.Yu., Yudin, A.S. (2010). Investigation of the dynamics of burning sawdust and sunflower husk in a fluidized bed. *Energy technologies and resource saving*, no. 3, pp. 9–13 [in Russian].

Received 19.01.2021

Summary

S.G. Polozhaj¹, PhD (Engin.), Senior Research Scientist,

e-mail: s.polozhaj@mail.ru

S.V. Mazur², PhD (Engin.), Director, e-mail: mazur@optima.com.ua

S.V. Muzychuk³, Technical Director, e-mail: tov-lvsp@ukr.net

I.M. Raykovsky³, Chief Engineer, e-mail: tov-lvsp@ukr.net

¹*Ukrainian State University of Chemical Technology (Dnipro, Ukraine)*

²*LLC "Sigma-invest" (Dnipro, Ukraine)*

³*LLC "Lubomyr lime-silicate enterprise" (village Nova Lubomyrka, Ukraine)*

Improving the efficiency of lime firing in a rotary kiln using wood powder as fuel

The materials of publications devoted to the topic of replacing natural gas with biofuel during firing in lime kilns for metallurgical, construction and other industries are generalized. Scientific and technical solutions for the use in rotary kilns crushed wood pellets when burning lime as a fuel instead of natural gas are the most wellknown and wide-spread in industrial practice. This technology is used to the greatest extent at the enterprises of Sweden, Finland. Based on the analysis of the results of published studies, it is shown that a prerequisite for flare burning pellets in rotary kilns is their grinding to a fraction of less than 1 mm. Technical solutions are analyzed, which allow to replace 50–70 % of natural gas with agricultural production wastes, in particular sunflower husks, during lime firing in rotary kilns. The possibility and efficiency of substitution of natural gas in rotary kilns for burning lime with wood powder as fuel, which is obtained from the waste of the woodworking industry of the north-western region of Ukraine, is theoretically and experimentally substantiated. Data on the composition of equipment and technology of lime firing in a rotary kiln for metallurgical, construction and other industries at the Lubomyr lime-silicate enterprise located in the Rivne region are shown. The results of research performed on the industrial equipment of Lubomyr lime-silicate enterprise are presented. The basics of lime production technology when used in rotary kilns of wood powder as fuel are considered.

It is shown that wood fuel chip requires preliminary preparation before burning. The parameters of wood powder fuel required for its use in rotary kilns for burning lime are determined. The suitability of this fuel was evaluated by the completeness of its combustion, which was determined by the amount of residual carbon in the lime. Fuel requirements for moisture and degree of grinding of wood waste have been established. The efficiency of dust wood powder fuel depending on its humidity is investigated. It is shown that drying wood to a humidity of not more than 10 % is sufficient to ensure a flare temperature of 1400 °C. According to the results of research, a technological scheme of preparation of such fuel for use as fuel in rotary kilns during lime firing has been developed and put into practice. The parameters of the technological line with the capacity of 2.4 t/h of wood powder fuel preparation for the rotary kiln built and put into operation in 2018 at the Lubomyr lime-silicate factory are given. The implemented solution allowed replacing 90–95 % of natural gas during the firing of lime in the rotary kiln of the Lubomyr lime-silicate factory with wood powder fuel. The experience of two years of operation of the rotary kiln on wood powder fuel has shown that the company stably produces lime of the 1st and 2nd grades. Industrial practice has confirmed the correctness of scientific and technical solutions developed during research. The prospects of additional research, aimed at the implementation of the obtained scientific solutions at other industrial facilities for the purpose, to increase the use of wood powder fuel to replace natural gas are shown.

Keywords

Lime, production, rotary kiln, biofuel, wood processing waste, natural gas.