

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.041

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/31>

Витяганець В.С.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Пітак І.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ТА КОНСТРУКЦІЇ ШАХТНОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВАПНА

Металургійне виробництво вапна, хоча й відіграє ключову роль у будівельній сфері та інших галузях економіки, але є надзвичайно енергоємним і трудомістким процесом. Особливо важливою проблемою є великий викид CO₂ під час кальцинації, який становить половину загальних викидів CO₂ у руді. Закриття карбонізаційних установок стає актуальним завданням для екологічної політики. Основна мета виробництва вапна – забезпечення високої якості продукції та постійне покращення умов праці з метою зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Однак, основний фактор витрат – енергія, необхідна для випалу вапняку, що робить управління цим процесом надзвичайно важливим, особливо у зв'язку з постійним зростанням вартості енергоносіїв. Стаття розглядає різні аспекти оптимізації робочого режиму та конструкції шахтних печей для виробництва вапна. Досліджуються технологічні та інженерні аспекти, такі як вибір типу печі, оптимізація процесу випалу вапняку та вплив конструкції печі на якість та кількість виробленого вапна. Головна мета – забезпечення максимального виходу продукції за мінімальних витрат сировини, енергії та зменшення впливу на навколишнє середовище. Висновки досліджень показують, що реконструкція шахтних печей може значно знизити витрати палива та підвищити вміст корисних компонентів у вапні. Ефективне управління процесом випалу вапняку може забезпечити стабільні результати навіть за різних умов роботи печі. Оптимізація температурного режиму та використання принципу теплообміну за прямоточно-протитечійною схемою можуть значно покращити продуктивність та зменшити вплив на довкілля. Встановлено, що один із потенційних шляхів удосконалення шахтних печей із прямим профілем футерування полягає у переході до принципу теплообміну за прямоточно-протитечійною схемою та створенні нижнього контуру для рециркуляції продуктів згоряння, які потім спалюються у суміші з паливом та повітрям. Ця ініціатива має потенціал збільшити продуктивність після реконструкції печі на 15–20%.

Ключові слова: вапно, промислове зростання, випал, кінетика процесу, гранулювання, математична модель, охолодження, адсорбція, газоподібні викиди.

Постановка проблеми. Металургійне виробництво вапна трудомістке і потребує великих витрат енергії. Викиди CO₂ у процесі кальцинації у виробництві вапна становлять 50% загальних викидів CO₂ у руді та закриття карбонізаційних установок є важливою проблемою екологічної політики. Основна увага приділяється властивостям вапна для забезпечення її якості та правилам, що регулюють процес, із постійним покращенням умов праці; її основна мета – зменшити вплив на навколишнє середовище. Оскільки енергія, необхідна для випалу вапняку, сильно пов'язана з температурою та спорідненістю реакції карбонізації

саме ця частина всього процесу є найбільш ефективною з точки зору енергії. Це питання є більш актуальним через невпинне зростання вартості енергоносіїв. Управління ними в ідеальних умовах значною мірою сприятиме зменшенню впливу на навколишнє середовище. У цьому дослідженні детально розглядаються та пропонуються кілька варіантів перспектив мінімізації енергії у виробництві вапна.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Виробництво вапна в шахтних печах є важливою галуззю промисловості, яка забезпечує необхідність у цьому стратегічному будівельному

матеріалі для різних галузей економіки. Однак, збільшення конкуренції та необхідність зниження витрат виробництва вимагають постійного вдосконалення технологічних процесів та оптимізації робочих умов [1–4].

Оптимізація режиму роботи та конструкції шахтних печей для виробництва вапна відіграє важливу роль у забезпеченні ефективності та економічної доцільності виробництва. Це полягає в пошуку оптимальних параметрів процесу випалу вапняку, які забезпечують максимальний вихід продукції при мінімальних витратах сировини, енергії та забруднення навколишнього середовища [5].

У даній статті розглянуто різні аспекти оптимізації режиму роботи та конструкції шахтних печей для виробництва вапна. Будуть розглянуті технологічні та інженерні аспекти, такі як вибір підходящого типу печі, оптимізація процесу випалу вапняку, вибір оптимальних параметрів режиму роботи печі, а також вплив конструкції печі на якість та кількість випаленого вапна [6, 7].

Досягненням оптимальної роботи та конструкції шахтної печі може бути збільшення продуктивності підприємства, зменшення витрат на виробництво, підвищення якості виробленого вапна та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Постановка завдання. Метою статті є отримання поведінки різних енергетичних і матеріальних потоків, а також використання його в майбутньому для перевірки можливих модифікацій установки.

Виклад основного матеріалу. Виробництво вапна є життєво важливим етапом для виробництва як основних продуктів, таких як чорних металів так і супутніх продуктів у промислових умовах. У світі щорічно виробляється значна кількість чорних металів, що сприяє широкому асортименту експорту. Кількість заводів, які беруть участь у виробництві чорних металів, малих і великих, перевищує 200, і всі ці підприємства використовують такі процеси.

Ця частина дослідження полягає в тому, щоб закласти основу для обговорення шахтних печей, конструкцій шахтних печей і режимів роботи в наступних частинах огляду літератури, щоб повністю зрозуміти рівень технології. Звичайно, слід зазначити, що повний дискурс науки про чорну металургію та виробництво вапна справді виходить за рамки цієї частини дослідження. Однак, забезпечивши базову основу знань у цих областях, буде надано комплексну структуру,

з якої можна почати аналіз цієї складної галузі. Такий аналіз важливий з ряду причин. По-перше, технологія, яка використовується в цій галузі, все ще розвивається і поки що не повністю зрозуміла тим, хто не має безпосередньої участі в галузі. По-друге, економіка виробництва вапна відіграє невелику, але важливу роль у світовій економіці, де певні країни залежать від металів.

Виробництво вапна в чорній металургії. Вапно використовується в чорній металургії для виробництва сталі і одержується випалом вапняку при високих температурах. Металургійні заводи не в змозі виробляти вапняк, необхідний для виробництва, і закуповують його від незалежних постачальників. *Вапно* – це продукт випалу вапняку, крейди та інших карбонатних порід. Найчастіше під назвою вапна об'єднують негашене CaO (окис кальцію) та продукт його взаємодії з водою – гашене Ca(OH)₂ (гідроокис кальцію). За фракційним складом воно поділяється на грудкове і мелене (порошкоподібне). Вапно використовується на очисних спорудах питної води для пом'якшення рН води, як антисептик. Випалене вапно також є основним інгредієнтом у цементній промисловості. Світове виробництво вапна становить приблизно від 350 до 300 мільйонів метричних тон, з яких приблизно 15 тон отримують в Індії. Стрімке зростання населення в усьому світі породило попит на використання якісної питної води. Шкіряні заводи та желеподібні підприємства також споживають вапно окремо. Вапно є одним із агентів, який продається як товар. Галузі промисловості, в основному споживчі, належать до дрібних галузей промисловості, і вапняк має тут дуже велику частку. Найважливішим використанням вапна є синтез на заводах кальцинованої соди.

Режими роботи та конструкції шахтних печей. Перш ніж приступати до вибору способу встановлення шахтних печей, важливо застосувати різні методи експлуатації та проектування. Тут, у реверсивній конструкції шахтних печей у виробництві вапна, робочі параметри спрямовані на те, щоб забезпечити контроль типу повітря, що надходить і виходить з печей. Контроль потоку повітря здійснюється в нижній частині печей, і це контролюється за допомогою приводу, а також керованого клапана. Крім того, піч має систему збору газу в ній, і це необхідно спеціально для цілей ламінарного газу. Газ у зоні фретингу збирається окремо, і це необхідно, тому що процес фільтрації повинен мати додаткове первинне повітря. Важливість встановлення режиму роботи та проектування робочих моделей шах-

тних печей покращує якість вапняної продукції, що виробляється, а також знижує рівень забруднення атмосфери.

Технології оптимізації у виробництві вапна.

Оптимізацію виробництва вапна можна здійснити кількома різними способами, кожен з яких представляє окремий параметр. У першому варіанті було зроблено 11 прогонів, враховуючи варіації тиску повітряної кришки, що призвело до питомого споживання 289 кг від'ємного CaO, що призвело до втрати від випалу CaCO₃ до CaO та CO₂ в умовах, відібраних у діапазоні змінних для параметрів. Значення були відібрані для кожного випадку, інші залишалися фіксованими, тиск повітряної кришки становив 22,5 мм H₂O. Оптимальним діапазоном параметра був 1,55–1,75 (нормований тиск). Будь-які невідповідні умови, які можуть призвести до надмірного споживання, можна розглядати як агресивну роботу та вказувати на важливість нормального діапазону для оптимізації питомого споживання.

Збір даних. За допомогою первинних даних отримано первинну інформацію, необхідну для проектування печі для виробництва вапна в чорній металургії. Основною сировиною для виробництва вапна в печі є вапняк, газоподібне паливо і повітря. Дані для кожного з вищезазначених трьох параметрів були зібрані та використані для дослідження.

Для перевірки правильності запропонованої моделі печі були проведені експериментальні випробування, де використовується однокамерна піч. Установка включала вісім різних вимірювальних виходів для реєстрації температури в камері, температури димових газів, вмісту CaO (який не прореагував) у вапні та його реакційної здатності. Профіль температури всередині печі по її довжині від точки впорскування палива до точки викиду вапна було зареєстровано та проаналізовано. Відповідно до запропонованої моделі змінено конструкцію печі та режим її роботи.

Залежними змінними для дослідження є виробництво вапна (CaO) з вапняку (CaCO₃) і спалювання монооксиду вуглецю. Виробництво вапна залежить від температури і тиску, що створюється всередині печі. Згоряння оксиду вуглецю також залежить від кількості введеного повітря та загальної ефективності реакції. Ця ефективність – це ступінь, до якого CO окислюється до CO₂, а вироблене тепло використовується для ендотермічних реакцій у печі.

Оптимізаційні моделі. Розроблено математичну оптимізаційну модель для оцінки опти-

мального режиму роботи шахтної печі, а також для визначення необхідної конструкції печі. Модель здатна перемикатися між двома режимами роботи, нормальним і холостим, а також між двома різними конструкціями печі. Мета використання моделі полягає в тому, щоб визначити режим роботи печі, а також найкращу можливу схему для системи печі, щоб загальна ефективність процесу виробництва вапна була максимальною.

Обговорення результатів. Оптимальні режими роботи печі для випалу вапняку були визначені в результаті експерименту як «оптимальний режим» для спалювання негашеного вапна у печі. Поточна пропускна здатність вапна, а також виміряна пілотна радіоактивність для кисню становила 0,14 м³ паливного повітря на 1,772 м² поверхні печі. Ці пілотні результати відповідають за комерційну експлуатацію. Що стосується якості вапна, то для фракції вапна від 50 мм до 70 мм було розраховано вміст активного вапна. Ці результати порівнювали зі стандартними існуючими результатами якості вапна.

При найнижчій температурі шару на виході з печі спостерігалось підвищення від 1350 до 1450 К. Для температур на глибині від 0,8 до 1,0 м у печі різниця була нижче 30 К. Таким чином, різниця спостерігалась лише для температур на виході з печі. Основною причиною падіння температури були заводські налаштування контролера. Збільшення товщини шару не було виконано через аномальне зростання товщини футеровки. Результати показують, що протягом половини досліджуваного періоду налаштування заводського контролера мали позитивний вплив на температуру шару та теплові характеристики печі. Час охолодження надавав більше тепла матеріалу для досягнення бажаної температури, а отже, потрібно менше тепла з пальників, що може призвести до економії палива. Однак ця економія не була кількісно визначена. Важливо також відзначити, що обидва ці параметри пропонують переваги контролю, тобто матеріал і тепло, які необхідно забезпечити для досягнення бажаної температури в футерівці.

Визначення оптимальної конструкції печі та робочих параметрів залежало від вимог до вапняку та газоподібного палива, а також від домішок, які є результатом завантаження валунів, і мотивації для збільшення рівнів переробки. Дані були зібрані для чотирьох різних експериментів з належним урахуванням викидів та паливної ефективності. Проведено хімічний аналіз домішок у валунній шихті та низькосортному вапняку. Послідовні дані виявилися більш надійними, ніж

дані про склад, що визначають якість валунів і вапняку. Було визначено, що збільшення споживання вапняку не принесло жодної користі через доступний простір шару та висушене та попередньо нагріте повітря для горіння. Задовільне виробництво вапна вимагало введення достатньої кількості кисню для окислення заліза з валунів у пласті донної зони, а отриманий оксид кальцію мав бути бажаної якості.

Однією з ключових переваг металургійної промисловості є здатність рекуперувати тепло з гарячих димових газів, які утворюються та виводяться з процесу. Було виявлено, що приблизно 80% теплової енергії використовується, а решта викидається в атмосферу як відходи через димові гази. Це дозволяє уникнути великих втрат енергії разом із контролем забруднення атмосфери. На металургійному заводі є багато відходів, які потрібно використовувати в процесі, щоб мінімізувати рівень забруднення.

Металургійне виробництво найбільш вимогливе до такого показника, як час гасіння вапна водою, що визначає її реакційну здатність. Огляд літератури показав, що швидкість гасіння вапна залежить від її хімічного складу, особливо вмісту домішок, температури отримання та кристалічної будови вапняку. У літературі викладено висновки про якісний взаємозв'язок температури випалу вапна зі швидкістю її гасіння водою [8, 9], однак експериментальних даних, які свідчать про цю залежність, виявити не вдалося. Тому у роботі проведено відповідні експерименти.

В умовах роботи промислової печі шматок вапняку не завжди прогрівається до потрібної температури на всю свою глибину, його поверхневий шар, навпаки, перегрівається, тому і реакційна здатність отриманого вапна буде іншою. Таким чином, залежність швидкості гасіння вапна водою в умовах шахтного випалу повинна бути доповнена з урахуванням крупності шматків вапняку та тривалістю витримки.

Металургійні підприємства, що постачають чорний прокат за кордон повинні відповідати стандарту ISO 9001:2000. Цей стандарт передбачає виконання міжнародних вимог системи управління якістю на всіх етапах випуску продукції, включаючи і сертифікацію допоміжних виробництв. Тому методи випробувань вапна повинні відповідати вимогам чинного в ЄС стандарту DIN/EN 459-2 [10].

У стандарті DIN/EN 459-2 під реакційною здатністю (часом гасіння вапна водою) мається на увазі відрізок часу, за який температура реагує

суміші досягає 60°C. За тривалість гасіння приймають час із моменту додавання води на початок періоду, коли зростання температури вбирається у 0,25°C на хвилину, тобто. до досягнення максимальної температури суміші, що реагує.

Шматок вапняку масою 70–100 г поміщався в муфельну піч, де витримувався при фіксованій температурі протягом 8 годин – часу, достатнього для повного завершення дисоціації карбонатів та рівномірного прогрівання шматка на всю глибину до температури муфеля. Після виїмки та охолодження в ексикаторі вапно подрібнювалося у ступці, отримане вапняне борошно просівалося через сито № 008. Потім з просіву відбиралася навішування, маса якої в грамах розраховувалася за формулою $G = 1000/A$, де A – вміст активних оксидів кальцію та магнію вапна.

Для визначення температури та часу гасіння вапна використовували побутовий термос місткістю 500 мл. Наважка поміщалася в термосну колбу, після чого до неї додавали 25 мл води, що має температуру 20°C, і суміш швидко перемішувалась дерев'яною відполірованою паличкою. Після цього колба закривалася пробкою із щільно вставленим термометром на 150°C і залишалася у спокої. Відлік температури реагування суміші вівся з моменту додавання води. У ході спостережень фіксувалися: час досягнення сумішшю температури 60°C, максимальна температура суміші та час закінчення реакції (коли зростання температури знижувалося до 0,25°C за хвилину).

Аналіз були піддані вапняки Вінницького (В1), Донецького (Д1) родовищ, які за хімічним складом задовольняють вимогам до виробництва металургійного вапна. Випал проводився при температурах від 900 до 1300°C у трьох повторних дослідах. Результати аналізів наведено на Рисунок 1.

Аналізуючи графіки реакційної здатності вапна, отриманої при різних температурах можна помітити, що зв'язок температури випалу вапняку з тривалістю процесу гідратації вапна можна описати кусково-заданою функцією, за рідкісним винятком, лінійної на інтервалах температур випалу 900–1000°C, 1000–1200°C та 1200–1300°C. Зв'язок максимальної температури гідратації з температурою випалу можна описати лінійною залежністю, але вона є визначальним показником, далі ця характеристика не розглядається.

У проведених дослідах за рахунок подовження витримки досягався повний випал вапняку та рівномірне прогрівання каменю на всю глибину. При випалюванні в реальних умовах поле температур за радіусом шматка нерівномірне. Зовнішній шар

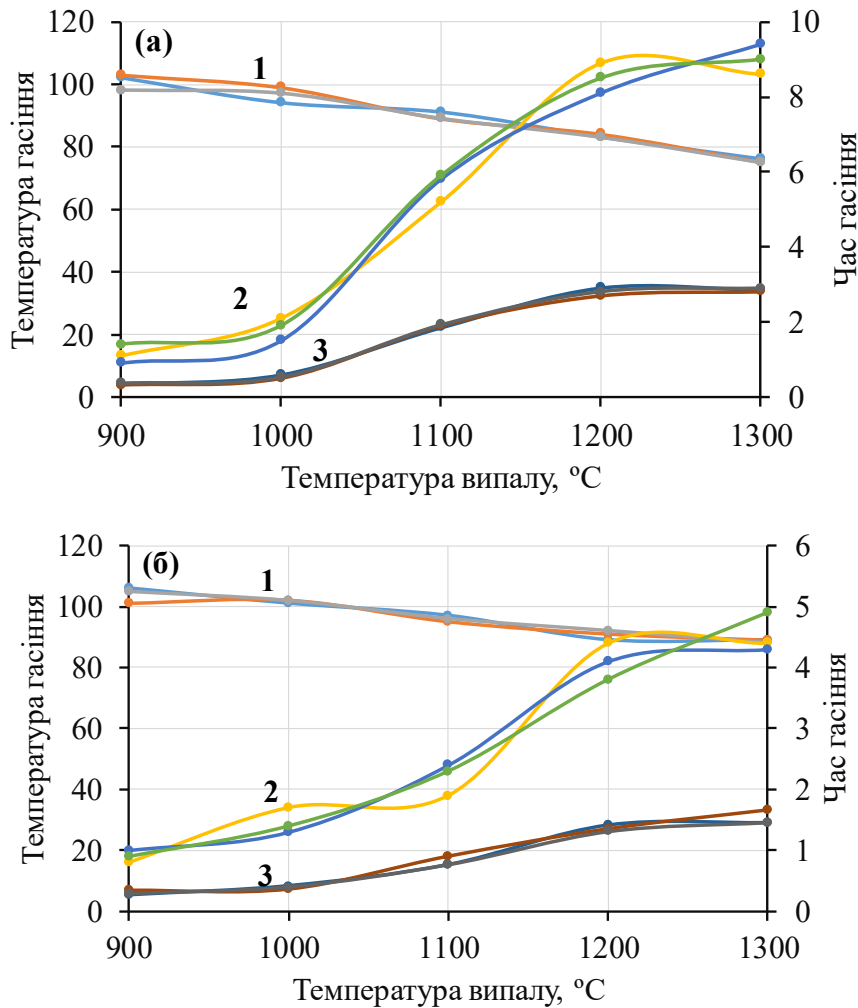


Рис. 1. Результати випробувань реакційної здатності вапна: а – проба В1, б – проба Д1. 1 – температура гасіння, 2 – Час гасіння за ДСТУ 9179-77, 3 – Час гасіння за DIN/EN 459-2

каменю піддається впливу високих температур пічних газів, що омивають його, температура ж у фронті реакції (за умови неповного завершення випалу), як показали розрахунки, не перевищать 900°C. Тому у випадку з шматковим вапняком, який перебував при різних температурах, експертним шляхом оцінити середній час гасіння вапна важко, і необхідно розробити методику прогнозуючого розрахунку реакційної здатності вапна, отриманої зі шматкового вапняку. Виконавши розрахунок розподілу температур по радіусу кулястої гранули в момент, що відповідає її максимальному прогріву, не важко розрахувати середню температуру шматка за формулою

$$\bar{T}_{gr} = \frac{1}{V_{gr}} \cdot \int_0^V T_{gr} dv \text{ або } \bar{T}_{gr} = \frac{3}{R^3} \cdot \int_0^R r^2 T_{gr}(r) dr \quad (1)$$

Аналогічно можна розрахувати і середню тривалентність гідратації речовини гранули, вибравши одну із залежностей

$$\bar{\tau}_{react} = \frac{3}{R^3} \cdot \int_0^R r^2 f(T_{gr}) dr \quad (2)$$

Для засипання гранул різної крупності час гідратації суміші обчислюється за формулою

$$\bar{\tau}_{react.mix} = \sum \bar{\tau}_{react} m_i \quad (3)$$

де m_i – масова частка гранул i -го класу крупності.

За допомогою виразу (3) апіорно може бути розрахована реакційна здатність випаленого вапна будь-якого класового складу, якщо відома залежність часу гасіння від температури випалу для даного виду вапняку та розподіл температур по радіусу гранули в момент найвищого прогріву.

Оптимізація випалу вапняку у печі. Розглянута піч для випалу вапняку потужністю 12–20 тон продукції щоденно. Шахта має робочу висоту 7,7 м, а загальна висота становить 9,9 м. У печі встановлено 8 газо-повітряних пальни-

ків з регульованою потужністю, що дозволяє змінювати продуктивність в залежності від потреби. Газові пальники розташовані у водоохолоджувальних фурмах, які висуваються усередину печі. Завантаження та вивантаження продукції відбувається періодично. Механізм завантаження шиберного типу без герметизації, що здійснюється по мірі спустошення завантажувального бункера. Механізм вивантаження також шиберного типу, без герметизації, розташований центрально, з вивантаженням у контейнери за необхідності.

Експлуатація водоохолоджуваних фурм часто супроводжувалася утворенням сольових відкладень через використання технічної води без додаткового знесолення. Для заміни цих фурм піч зупинялася на ремонтні роботи. Інша негативна характеристика фурм це втрати тепла через охолодження водою. Згідно з тепловим розрахунком, близько 2,5% тепла, що вводилось у піч, безповоротно губилося через охолодження на кожній фурмі, і загальні втрати становили близько 20%. Було прийнято рішення про реконструкцію печі з відмовою від водяного охолодження паливних пристроїв.

Демонтаж фурмених пристроїв означав, що в новій конструкції пальники будуть розміщуватися без можливості висування у внутрішній простір. Під час реконструкції печі змінювався профіль внутрішнього перерізу, здійснювався «пережим» шахти вище за пальникові пристрої, що запобігало закупорці пальників і дозволяло відведення потоку продуктів згоряння від стін (Рисунок 2). Внаслідок зміни форми робочої зони та методу розміщення пальників, газодинамічна ситуація у печі мала зазнати змін, і режим випалу вимагав налаштування. Для оцінки умов випалу у печі після переміщення пальників був проведений гідродинамічний аналіз робочої зони. Розрахунок печі був виконаний без урахування теплообміну між газами та матеріалом, що призвело до зниження точності отриманих даних, але дозволило відобразити загальну картину розподілу параметрів газового потоку та порівняти її з аналогічними дослідженнями.

Такий підхід часто використовується в гідродинамічних розрахунках шарових установок [11, 12]. При розглянутих режимних параметрах спостерігався кільцевий потік гарячих газів. У найближчій до футерування зоні температура газів досягала 1400°C, тому матеріал не прогрівався до температури дисоціації. Швидкості газів у шахті становила 0,4–0,6 м/с.

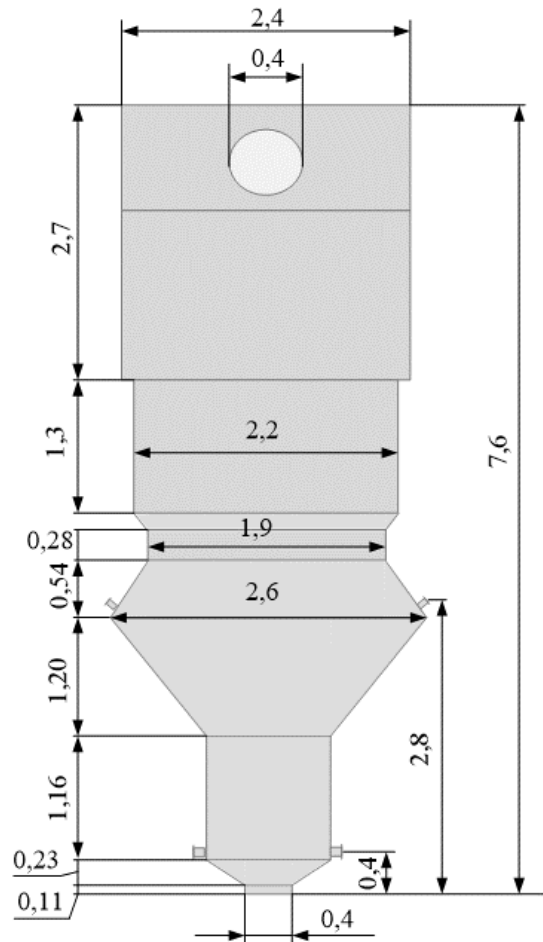


Рис. 2. Шахтна піч: геометрична схема

Футеровка печі виконана шамотною цеглою ША-19. Оскільки при температурах понад 1250°C вона активно реагує з CaO вапна, утворюючи низькотемпературні евтектики в системі CaO-Al₂O₃-SiO₂. Максимальна температура футерування не повинна перевищувати цього значення. Отримані результати показують, що після реконструкції робота печі з попередніми витратами газу та повітря не є прийнятною (Рисунок 3).

Внаслідок оптимізації виявлено, що найкращі умови для виробництва вапна зі ступенем випалу 80% досягаються при використанні печі з підвищеною витратою повітря на горіння. Це призводить до зниження температури газів до 1200°C та температури матеріалу до 1150°C, та малої витрати повітря на охолодження, що збільшує температуру вапна до 447°C. Висота зони підігріву становить близько 1,3 м, хоча активна фаза випалу починається на висоті трохи більше 1 м вище за рівень пальникових пристроїв.

Повторний гідродинамічний розрахунок печі здійснений за оптимізованими режимними пара-

метрами. Виявлено, що при роботі з попередніми витратами газу та повітря, осьова частина зони випалу заповнюється холодним повітрям, що входить з зони охолодження, і тим самим погіршує умови роботи. У пристінній зоні температури газового потоку перевищують допустимі, що може призводити до перепалу матеріалу та розплавлення футерування.

Різке зміння концентрації метану і кисню у зоні випалу свідчить про те, що горіння газу

відбувається дифузійно. У фронті горіння розвиваються високі температури. Дифузійне горіння особливо небезпечно в областях, де спостерігається нестача повітря, та горіння протікає при $\alpha = 0,5-1$. В печах з периферійними дифузійними пальниками ця область виникає біля стін, а в печах з центральним пальником – уздовж центральної вісі. У таких зонах температури можуть перевищувати 1500°C , що призводить до перепалу вапна і втрати його активності.

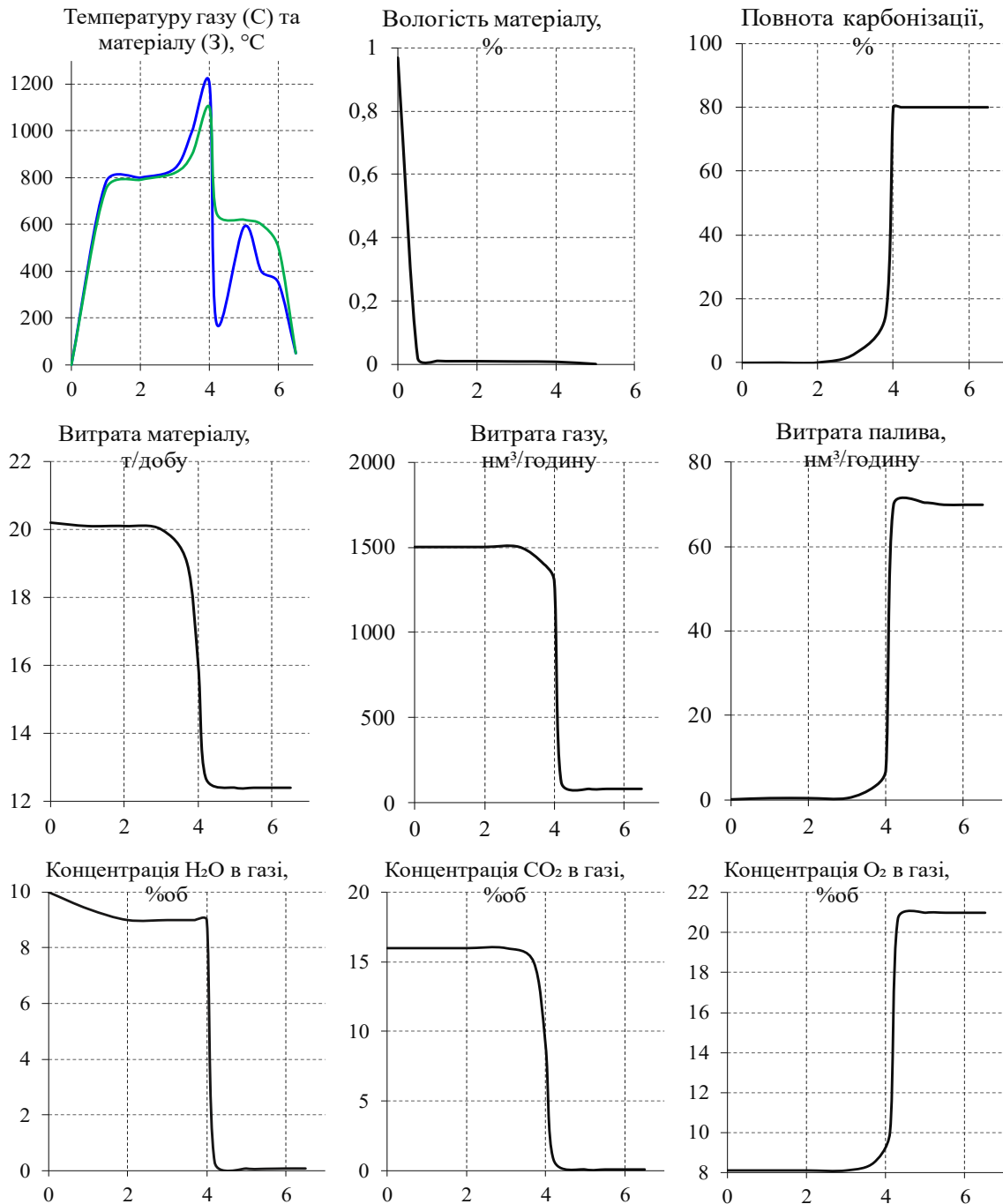


Рис. 3. Розподіл ключових параметрів по висоті шахтної печі

У розглянутій печі дифузійне горіння відбувається лише у центральній частині, оскільки продукти згоряння, що рухаються вздовж стін, утворюються в результаті кінетичного горіння попередньо отриманої паливно-повітряної суміші на пальниках. Продукти згоряння у печі розбавлені повітрям, тому реалізуються температури лише до 1200°C.

З цього випливає, що отримання вапна, яке швидко піддається гасінню, при температурах випалу 1000–1100°C може бути найбільш ефективно реалізовано у шахтній печі з палинковими пристроями попереднього змішування при високих концентраціях баластового газу (надлишок повітря або рециркуляція).

Дослідження процесу руху матеріалу у шахтній печі. Для створення моделі руху гранульованого матеріалу у шахтній печі та його випуску через отвори було використано математичний опис, який був представлений у дослідженні [12]. Реалізація програми здійснена за допомогою середовища Matlab. Чисельні обчислення руху матеріалу можуть бути проведені для печей циліндричної форми, де геометрія шахти розглядається як плоска вісесиметрична. Програма дозволяє налаштовувати різні конфігурації внутрішнього простору. Вивантаження отворів розташовано на однаковій відстані від центру і має однакові розміри. Передбачено можливість візуалізації поля швидкостей матеріалу та отримання чисельних значень швидкостей шихти у вибраних точках внутрішнього простору шахтної печі.

Для ідентифікації моделі руху гранульованого середовища, з використанням припущення про наявність еліпсоїдів рівних швидкостей, було проведено порівняння модельних обчислень з результатами фізичного експерименту [13].

Вихідні умови: насипна вага матеріалу, 1300 кг/м³; діаметр частинок, 10 мм; коефіцієнт внутрішнього тертя 0,9; витрата матеріалу, 1,3 кг/с; діаметр випускних отворів, 50 мм; радіус кола центрів отворів, 155 мм; кількість отворів, 1000 од.; тривалість моделювання, 70 с.

Для забезпечення імітації єдиного розвантажувального отвору у формі кільця за рахунок взаємного перекриття невеликої кількості отворів, їх кількість було встановлено на рівні 1000. Результат експерименту представлено на Рисунок 4.

Для вивчення закономірностей руху матеріалу в традиційних шахтних печах була проведена серія експериментів. Особлива увага приділялася умовам вивантаження матеріалу. Експерименти включали три випадки розвантаження: виванта-

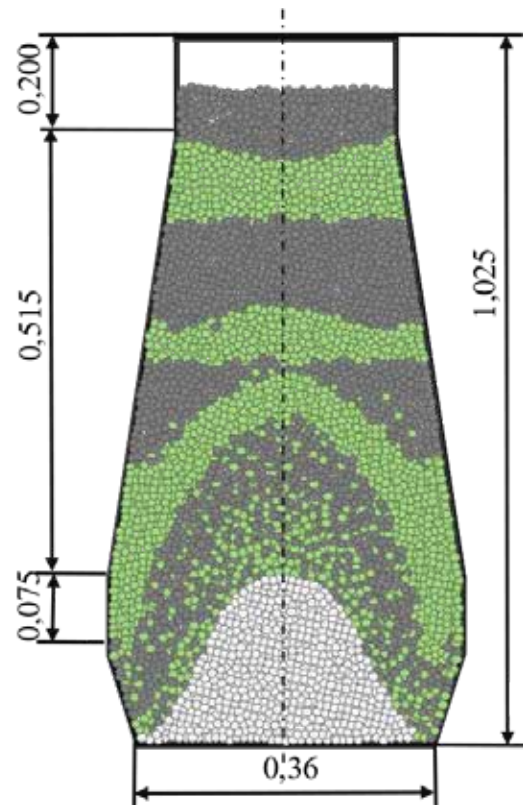


Рис. 4. Рух матеріалу в печі

ження через єдиний центральний отвір діаметром 500 мм; використання розвантажувального столу (розвантаження по всьому перерізу); вивантаження через отвори (4 шт.), діаметром 500 мм, з радіусом кола центрів отворів 800 мм.

Швидкість матеріалу була виміряна в зоні охолодження на відстані 1,5 м, в зоні випалу на відстані 7 м та в зоні підігріву на відстані 17 м. Результати розрахунків наведені на Рисунок 5.

При центральному вивантаженні матеріалу спостерігається помітна нерівномірність у його русі. У зоні охолодження різниця у часі перебування становить понад 50%, що означає, що деяка частина матеріалу залишається недостатньо охолодженою. У зоні випалу нерівномірність перевищує 6%, що негативно впливає на повноту та рівномірність випалу вапняку. Найбільш рівномірне розвантаження забезпечує система конструкції Антонова, яка має стіл вивантаження, що горизонтально зміщується, знижуючи відмінність часів перебування матеріалу в зоні випалу до близько 3%.

Альтернативною може бути система вивантаження через кілька отворів, яка дає подібний результат. Однак вплив геометрії проявляється так, що зростання швидкості руху засипки в зоні охолодження відбувається на відстані, яка дорів-

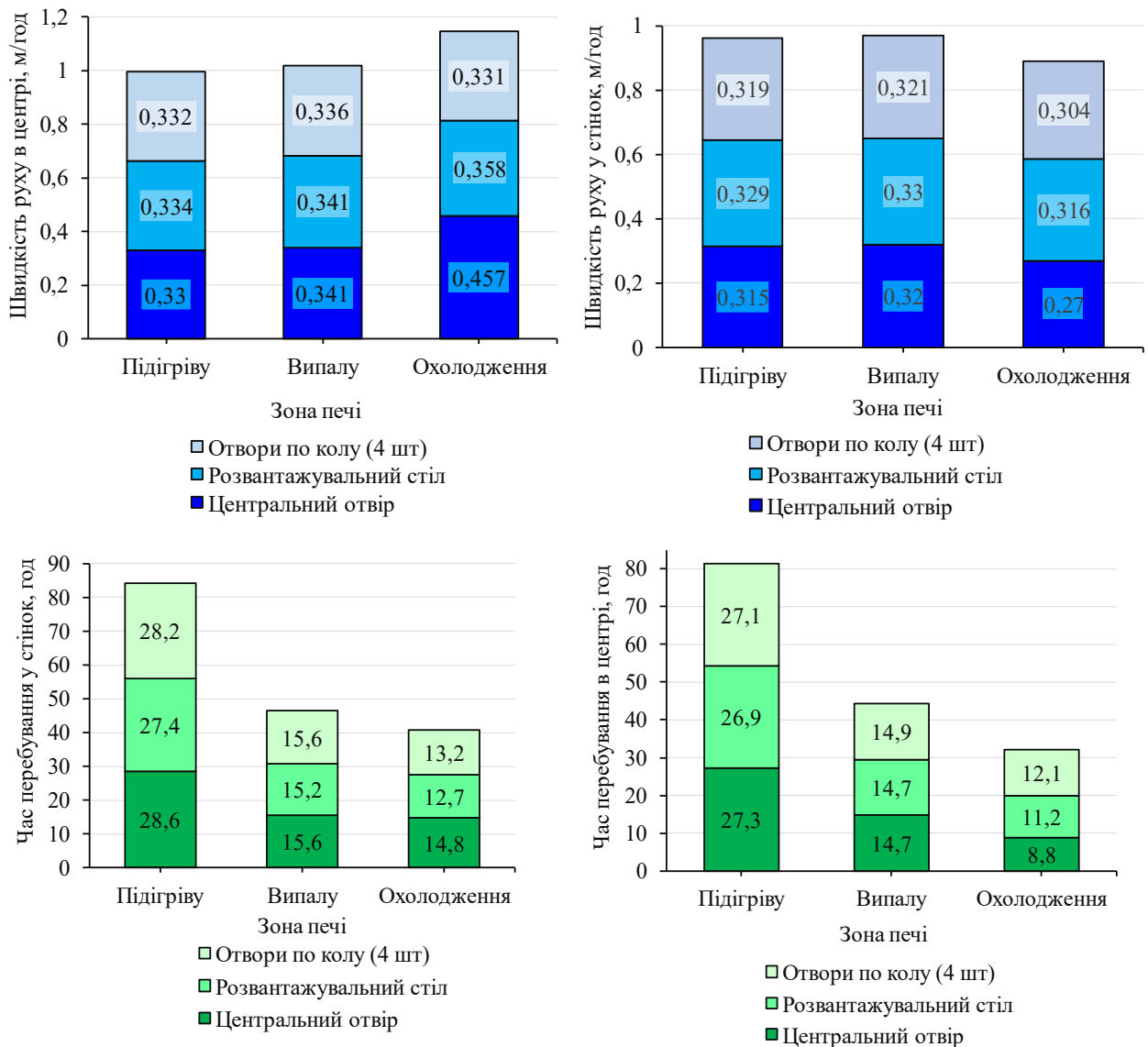


Рис. 5. Порівняння швидкостей руху матеріалу у шахтній печі

ное радіусу центрів вивантажувальних отворів, де еліпсоїди рівних швидкостей зменшуються в розмірах.

Висновки. Проведені результати досліджень свідчать про те, що головним позитивним наслідком реконструкції стало зниження витрат палива в 2,1–2,3 рази і підвищення сумарного вмісту CaO і MgO в вапні в середньому на 7%. Важливим висновком з розглянутих результатів є той факт, що, незважаючи на відмінності у часі перебування матеріалу в зонах підігріву та випалу, що впливає на рівномірність дисоціації сировини, відмінності у фактичних швидкостях руху менш значущі. Тобто радіальне перемішування матеріалу в печі з прямим профілем футерування є незначним. Максимально допустима

температура для випалу шматкового вапняку, яка забезпечує необхідний час гасіння, може бути визначена за допомогою аналізу реакційної здатності вапна при різних температурах: 900, 1000 та 1300°C. Зазвичай для виготовлення вапна температура в печі не перевищує 1000–1100°C, але для випалення окремих видів вапняку допускається використання температур понад 1300°C. Одним з потенційних напрямків вдосконалення шахтних печей із прямим профілем футерування є перехід на принцип теплообміну за проточно-протитечійною схемою та організація нижнього контуру рециркуляції продуктів згоряння з подальшим їхнім спалюванням у суміші з паливом та повітрям. Це може призвести до збільшення продуктивності реконструйованої печі на 15–20%.

Список літератури:

1. Карзун Е.Г. Боглаенко Д.В., та ін. Дослідження процесу змочування вапна водою перед подачею її в гідратор у виробництві високодисперсного гідроксиду кальцію або пушонки. *Східноєвроп. журнал переводних технологій*, 2007. № 1/3 25. С. 41–46.
2. Шахин І.Х., Шапоров В.П., та ін. Аналіз способів виробництва вапна та випалу карбонатної сировини. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2003. № 3. С. 76–90.
3. Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy Proc.*, 2017. 120. pp. 75–95. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.156>
4. Senegačnik A., Oman J., Širok B. Annular shaft kiln for lime burning with kiln gas recirculation. *Appl Therm Eng.*, 2008. № 28 (7) pp. 785–792. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.015>
5. Дорофеєнко С. О. Чисельне моделювання руху сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу. *Теоретичні основи технологій*, 2007. Т. 41. № 2. С. 205–212.
6. Дорофеєнко С. О. Чисельне моделювання перебігу бі дисперсного сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу. *Теоретичні основи хімічної технології*, 2007. Т. 41. № 6. С. 625–629.
7. Шапоров П. В., Райко В.Ф., Себко В.В. Про можливість збагачення вапняків класу 40–150 мм із використанням фотоелектронного сепаратора. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2010. № 16. С. 139–153.
8. Rehabilitation and adaptation of disused or obsolete lime kilns // Intermediate Technology conference. – Myson House, 2002.
9. Ritchie I. M., The kinetics of lime slaking. *Hydrometallurgy*, 1990. № 23. P. 377–396.
10. DIN/EN 459-2: 2002 Building lime – Part 2: Test methods EURO116.20. 21 p.
11. Гордон Я.М. Дослідження впливу параметрів фурменого пристрою на розподіл у щільному шарі. *Вісник ВУЗів*, 2012. Чорна металургія. 1977. № 2. С. 135–139.
12. Гордон Я.М. Механіка руху матеріалів та газів у шахтних печах. Наука. Алма-Ата, 1989. – 144 с.
13. Zhou Z.Y. Discrete particle simulation of gas-solid flow in a blast furnace. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries (CSIRO). – Melbourne, 2003. – P. 455–460.
14. Krause B., Liedmann B., Wiese J., Buchera P., Wirtz S., Piringer H., Scherer V. 3D-DEM-CFD simulation of heat and mass transfer, gas combustion and calcination in an intermittent operating lime shaft kiln. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017. 117. P. 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.017>
15. Manocha S., Ponchon F. Management of lime in steel. *Metals*, 2018. 8. P. 686. <https://doi.org/10.3390/met8090686>
16. Piringer H. Key factors to minimise emissions from parallel flow regenerative lime kilns. Technical Report 11, ZKG International, 2015.
17. Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy Procedia*, 2017. 120. P.75–95. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.156>

Vytiahaneets V.S., Pitak I.V. OPTIMIZATION OF THE OPERATING MODE AND DESIGN OF THE MINE FURNACE FOR LIME PRODUCTION

The metallurgical production of lime, although it plays a key role in the construction sector and other sectors of the economy, is an extraordinarily energy-intensive and labour-intensive process. A significant problem is the large CO₂ emission during calcination, which accounts for half of the total CO₂ emissions in the ore. Closing carbonization plants is becoming an urgent task for environmental policy. The main goal of lime production is to ensure high product quality and constant improvement of working conditions to reduce the negative impact on the environment. However, the main cost factor is the energy required to calcine limestone, which makes managing this process extremely important, especially with the constant increase in energy costs. The article considers various aspects of optimizing mine kilns' operating mode and design for lime production. Technological and engineering aspects such as the choice of kiln type, optimization of the limestone firing process and the effect of kiln design on the quality and quantity of lime produced are investigated. The main goal is to ensure the maximum yield of products with minimum consumption of raw materials and energy and reduce the environmental impact. Research findings show that the reconstruction of mine furnaces can significantly reduce fuel consumption and increase the content of useful components in lime. Effective management of the limestone firing process can ensure stable results even under different kiln operating conditions. Optimizing the temperature regime and using the principle of direct-counter-current heat exchange can significantly improve performance and reduce the environmental impact. It was found that one of the potential ways to improve mine furnaces with a direct linking profile is to switch to the principle of heat exchange in a direct-counterflow scheme and create a lower circuit for recirculation of combustion products, which are then burned in a mixture with fuel and air. This initiative can potentially increase productivity by 15–20% after furnace reconstruction.

Key words: lime, industrial growth, roasting, process kinetics, granulation, mathematical model, cooling, adsorption, gaseous emissions.