

УДК 66.041

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.05

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНОГО ОФОРМЛЕННЯ ШАХТНИХ ПЕЧЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЯКІСНОГО ПРОДУКТУ, ОТРИМАНОВОГО В ХОДІ ВИПАЛУ

В. С. ВИТЯГАНЕЦЬ, І. В. ПІТАК*

кафедра хімічної техніки та промислової екології, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: Inna.Pitak@khp.edu.ua

АНОТАЦІЯ Проведено аналіз шахтних печей для випалу вапняку. Виявлені недоліки роботи сучасних печей при випаленні вапняку полідисперсного складу. Розглянута конструкція печі з підвищеною ефективністю, яка забезпечує збільшення продуктивності на 20–25%, утилізацію відходів карбонатної сировини, зниження витрат тепла на 10%. В ході експериментальних досліджень було встановлено кінетичні процеси випалення. Надано дані експлуатації печі з рекомендованими конструктивними змінами. Було розглянуто питання розподілу топкових газів по перетину шахтної печі, характер руху матеріалу і газу, кінетика процесу. Розглянуто питання про використання газоподібного палива в шахтних випальних печах для виробництва вапна високої активності. Проведені дослідження вапняку високої якості, отриманого в процесі випалу в шахтній печі. За результатами скануючої електронної мікроскопії було доведено, що отриманий в процесі випалу продукт на 100% належить до кальцію оксиду без додаткових домішок чи шкідливих речовин. За результатами поросиметрії було досліджено вапно і визначені аспекти пористої структури матеріалу, таких як діаметр та загальний об'єм пор, площа поверхні, об'ємна й абсолютна щільності. Встановлено, що матеріал містить макропори, та демонструє комбінацію щільних та циліндричних пор. За допомогою азотної поросиметрії (за методом БЕТ методом математичного опису фізичної адсорбції, заснований на теорії полімолекулярної (багатошарової) адсорбції) була визначена площа поверхні, яка склала 84,0 м²/г. Кореляція між діаметром пор і площею поверхні була визначена за допомогою методу DFT (теорія функціоналу густини) і було встановлено наступне: питома площа поверхні матеріалу – 66,5 м²/г; засальний об'єм пор – 0,18 см³/г; діаметр пор – 4,08 нм. Також було встановлено, що досліджуваній зразок містив різні групи пор в діапазоні від 0,54 нм до 33,24 нм. Групи пор мали бімодальний розподіл у матеріалі, і саме пори меншого діаметру мали форму щілини, а пори більшого діаметра виглядали як циліндричні пори. Циліндричні пори є результатом термохімічних перетворень за участю складових компонентів.

Ключові слова: вапно; кінетика процесу; гранулювання; піч; математичний опис; теплообмін; адсорбція; викиди

ANALYSIS OF THE STRUCTURAL DESIGN OF MINE FURNACES AND RESEARCH OF THE HIGH-QUALITY PRODUCT OBTAINED DURING FIRING PROCESS

V. VYTYAHANETS, I. PITAK*

Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT An analysis of mine furnaces for calcining limestone was carried out. Deficiencies in the operation of modern furnaces during the firing of polydisperse limestone were revealed. The proposed design of the furnace with increased efficiency provides an increase in productivity by 20–25%, disposal of waste carbonate raw materials, and a reduction in heat consumption by 10%. During experimental studies, the kinetic processes of burning were established. Furnace operating data with recommended structural changes are provided. The question of the distribution of flue gases along the section of the mine furnace, the nature of the movement of material and gas, and the kinetics of the process were considered. The issue of the use of gaseous fuel in mine blast furnaces for the production of quicklime is considered. Studies of high-quality limestone obtained in the firing process in a mine furnace have been conducted. According to the results of scanning electron microscopy, it was proved that the product obtained in the firing process is 100% calcium oxide without additional impurities or harmful substances. Based on the results of porosimetry, the resulting lime was examined, and aspects of the material's porous structure were determined, such as the diameter and total volume of pores, surface area, bulk and absolute densities. Based on the results of porosimetry, it was established that the material contains macropores and exhibits a combination of slotted and cylindrical pores. Using nitrogen porosimetry (using the BET method), the surface area was determined, which was 84.0 m²/g. The correlation between the pore diameter and the surface area was determined using the DFT (density functional theory) method, and the following was established: the specific surface area of the material is 66.59 m²/g; total pore volume – 0.18 cm³/g; the diameter of the pores is 4.08 nm. It was also established that the test sample contained different groups of pores in the range from 0.54 nm to 33.24 nm. The pore groups had a bimodal distribution in the material, and the pores with smaller diameters were slit-shaped, while pores with larger diameters appeared as cylindrical pores. Cylindrical pores are the result of thermochemical transformations involving constituent components.

Keywords: lime; process kinetics; granulation; furnace; mathematical description; heat exchange; adsorption; emissions

Вступ

Шахтні печі – це тип промислових печей, які зазвичай використовуються для високотемпературних процесів, таких як виробництво чавуну, сталі та інших матеріалів. Розподіл теплових газів по

поперечному перерізу печі та кінетика розкладання матеріалу відіграють вирішальну роль у розробці та експлуатації шахтних печей.

У шахтній печі розподіл теплових газів, включаючи повітря для горіння та технологічні гази, має вирішальне значення для підтримки ефективного

та рівномірного теплообміну по всій печі. Гази зазвичай вводяться на різних рівнях або в зонах печі для оптимізації температурного профілю, необхідного для конкретного процесу. Такий розподіл гарантує, що матеріал всередині печі піддається бажаним тепловим умовам для належного розкладання та хімічних реакцій.

Шахтні печі часто використовуються для процесів, які включають розкладання або відновлення матеріалів. Кінетика розкладання матеріалу стосується швидкості, з якою відбуваються хімічні реакції в печі, зокрема реакції, які призводять до бажаного перетворення оброблених матеріалів.

Кінетика розкладання матеріалу залежить від різних факторів, включаючи температуру, склад газу, час перебування та властивості матеріалу. Розуміння кінетики допомагає визначити оптимальні умови роботи та конструкцію печі для досягнення бажаних швидкостей реакції та якості продукту. Ця інформація має вирішальне значення для максимізації продуктивності, мінімізації споживання енергії та забезпечення загальної ефективності процесу.

Для розробки шахтних печей інженери та дослідники вивчають розподіл теплових газів і кінетику розкладання матеріалу за допомогою теоретичного моделювання, обчислювального моделювання та експериментальних досліджень. Аналізуючи та оптимізуючи ці фактори, вони можуть проектувати печі, які забезпечують необхідні температурні профілі, структуру потоку газу та час перебування, необхідний для конкретного застосування обробки матеріалів.

Загалом, розподіл теплових газів і розуміння кінетики розкладання матеріалу є основними міркуваннями при розробці та експлуатації шахтних печей, що забезпечує ефективні та контрольовані промислові процеси.

М'який випал, також відомий як попередній нагрів або кальцинація, вапняку в шахтній печі є вирішальним етапом у виробництві вапна. Шахтні печі – це вертикальні печі, які зазвичай використовуються для випалу вапняку для отримання негашеного вапна або оксиду кальцію.

У процесі м'якого випалу в шахтній печі вапняк вводиться зверху і поступово рухається до низу за рахунок зустрічного потоку гарячих газів згоряння. Метою м'якого випалу є нагрівання вапняку до температури, при якій він піддається термічному розкладанню, вивільняючи вуглекислий газ і залишаючи вапно.

Процес м'якого випалу зазвичай включає наступні етапи:

1) Зона нагріву. У верхній частині шахтної печі вапняк піддається впливу високотемпературних газів, що утворюються в результаті спалювання палива. Гарячі газ рухаються у протитечії до вапняку, що опускається. Коли вапняк спускається через зону нагріву, він поглинає тепло від газів і поступово нагрівається.

2) Зона кальцинації. У середній частині шахтної печі вапняк досягає діапазону температур, необхідних для кальцинації. На цьому етапі вапняк проходить хімічну реакцію, відому як термічне розкладання, з виділенням вуглекислого газу (CO_2) і утворенням вапна (CaO). Реакція ендотермічна, тобто для її проходження потрібна теплота.

3) Зона охолодження. Коли вапняк продовжує рухатися в нижній частині печі, він охолоджується і досягає температури, придатної для обробки. Вапно, що утворюється під час випалу, залишається твердим і збирається на дні печі.

Процес м'якого випалу в шахтній печі спрямований на досягнення поступового та контрольованого нагріву вапняку для забезпечення рівномірного випалу та оптимальної якості виробленого вапна. Конкретна температура та час перебування, необхідні для м'якого випалу, залежать від бажаної якості вапна, конструкції печі та робочих параметрів.

Негашене вапно, отримане м'яким випалюванням у шахтній печі, широко використовується в різних галузях промисловості, включаючи сталеливарну промисловість, будівництво, очищення води та хімічні процеси. Він служить життєво-важливою сировиною або реагентом у таких процесах, як виробництво сталі, будівельних матеріалів і екологічних застосувань.

До вапна, що споживається для технологічних цілей різними галузями промисловості, і відповідно до її якості висувають різноманітні вимоги. Для забезпечення різних галузей народного господарства вапном необхідної якості перед виробництвом завжди стояло завдання розробки нових технологічних режимів та конструкцій печей, які б забезпечували стабільне отримання продукту із заданими властивостями. Основними агрегатами для багатотоннажного виробництва вапна є шахтні випалювальні печі, в яких як паливо використовуються доменний кокс, антрацит або сортове вугілля. Як правило, «тощі» види палива застосовують у виробництвах, де поряд у технологічному циклі використовується вуглекислий газ, який міститься в топкових газах з концентрацією 36–40%(мас).

Вапно, що містить активний кальцію оксид більше 95%, із загальним вмістом домішок до 1,4% та вмістом основної речовини, а саме активного кальцію оксиду більше 92% можна вважати вапном, з максимально ефективними характеристиками [1]. Виробництво вапна для таких технологічних процесів вимагає не тільки безперервної підготовки вапняку і крейди, а й використання природного газу переважно як палива, що унеможливує забруднення вапна продуктами згоряння [2].

Згадані вище групи продуктів включають хімічно осажену крейду, високодисперсний оксид і гідроксид кальцію, гідрохлорид кальцію, ароматизатори та кальцієві наповнювачі для медичної промисловості.

До основних труднощів термічної обробки вапняку з полідисперсними розмірами (фракція 20–

80 мм) у шахтній печі слід віднести обмежене проникнення газу (метану) у шар матеріалу у горизонтальному напрямку, тобто розподіл газу за перерізом шахти. Це призводить до нерівномірного змішування газу з повітрям та неповного згорання газоподібного палива. Відомі технічні рішення, спрямовані на інтенсифікацію процесів горіння, наприклад, за рахунок примусового відхилення смолоскипа або установки балкових пальників не вирішують проблеми [1, 2].

Для термічної обробки вапняку зазначеної фракції з регульованою температурою теплоносія на підставі проведених нами досліджень на напізаводській модельній печі, що має шахту у вигляді прямокутного сектора з розмірами $0,5 \times 1,2$ м та висотою 7,5 м, пропонується піч з такими особливостями:

1) спалювання палива здійснюється поза шаром матеріалу в камерах згорання з отриманням продуктів горіння заданої температури;

2) для забезпечення рівномірного розподілу теплоносія і зниження аеродинамічного опору рух газів у зоні випалу відбувається в перпендикулярному напрямку щодо матеріалу, що опускається по шахті;

3) в зоні охолодження перед вивантаженням, для збереження інтенсивного теплообміну, рух випаленого матеріалу та повітря приймається протитечійним;

4) здійснення в одній печі принципів протитечії та поперечного струму досягається зміною поперечного перерізу шахти у відповідних зонах (теплообміну та зоною випалу), а також кутом розкриття конусної частини печі в зоні вивантаження.

Використання альтернативних джерел енергії з метою виробництва чистого продукту для проведення процесу випалу вапняку проблематично, оскільки невідпрацьовані реакторні установки для реалізації процесу, а також досягнутий рівень досліджень [3, 4] не дозволяє сподіватися на організацію випального процесу в найближчому майбутньому багатотоннажного виробництва вапна.

Тому застосування газоподібного палива у шахтних печах для виробництва високоякісного випаленого вапна з високою активністю залишається необхідним прийомом.

Мета роботи

Метою цієї статті є опис і дослідження конструктивних та технологічних параметрів печі для випалу мінералів на газоподібному паливі та аналіз процесів, що відбуваються в ній, і дослідження отриманого продукту в процесі випалу.

Виклад основного матеріалу

Методологія проведення досліджень

– Проведення досліджень у шахтній печі

Дослідження процесів проводили на холодній та гарячій аеродинамічній моделі, виконаній у вигляді сектора промислової печі. Розігріта макетна шахта мала прямокутну форму з розмірами в плані $0,5 \times 1,2$ м і висотою 7,5 м. Модель печі мала наступні зони: зону

нагріву (40% корисної висоти шахти від висоти засипки), зону випалу (40% висоти засипки) та зону охолодження (20% від висоти засипки). Три фурми для подачі димових газів були встановлені нижче межі передбачуваної зони підігріву та розпалу та на половині зони розпалу. У зоні встановлення фурми відбувається зменшення внутрішнього розміру моделі за рахунок виступу корпусу фурми на 10–15 %. Зовні, внутрішні частини печі фурми з'єднані з футеровочним бортом легкою литою вогнетривкою цеглою, в якій вмонтовані і працюють пальники типу ГПН-3. Газовий пальник ГПН призначений для спалювання природного і зрідженого газу з примусовою подачею повітря.

Дослідженню підлягав природний газ із теплою згорання $35,6$ МДж/м³ та щільністю $0,73$ кг/м³. Враховуючи можливість використання рециркулюючого повітря із зони охолодження, температура повітря, що подається в пальники, приймалася від 150 до 200°C , коефіцієнт витрати повітря склав $1,1$, тиск у топці від 50 до 100 Па. Довжина полум'я пальника була прийнята в інтервалі від $0,5$ до $0,6$ м, відповідно факел закінчувався на виході з фурми. Фурми, нижче зони підігріву встановлені у вигляді кола через 120° , а в зоні випалу фурми по відношенню до попередньої зміщені на 60° , тобто, вони встановлені один від одного через 120° , але зміщені щодо попередніх на 60° . Повітря нагнітається в пальники та борови; вентиляторами в борови подавалося холодне повітря; вимірювання витрати повітря здійснювалося за допомогою діафрагм та мікроманометрів. Відведення повітря з печі здійснювалося за допомогою вентиляторів через систему циклонів, а потім у димову трубу.

Для виміру температур по висоті печі та на виході з фурм встановлені термометри у захисних чохлах. Повітря для охолодження вапна вводилося в нижню частину конічного бункера, який мав кут розкриття конуса 30° , а на виході мав валковий зволожувач. Проби газу, що відбираються по висоті печі та на виході, аналізувалися за допомогою газоаналізатора, хімічний недопал визначали наступним чином. В апарат завантажували вапняк ($\text{CaCO}_3 - 98,5\%$, $\text{MgO} - 0,2\%$) полідисперсного складу з вмістом фракції 27 м у кількості 30% та фракції $0,065$ м у кількості 70% , загальна витрата природного газу становила $38,7$ м. Холодна аеродинамічна модель була виконана з прозорого скла та відповідала $1/10$ передбачуваної промислової печі діаметром $3,5$ м. Область поширення газового потоку в шарі матеріалу визначалася шляхом фіксування забарвлених ділянок шматкової засипки. Як індикатор кольорової реакції застосовувалася взаємодія парів йоду, що міститься в повітрі, що імітує газ, з крохмалем, нанесеним на поверхню шматків вапняку шаром $\sim 0,001$ м. Повітря з моделі відводилося за допомогою вентилятора. В моделі здійснювався перехресний рух матеріалу і газу з послідовним протитечійним відведенням газу через верх моделі.

Штуцери для подачі газу холодної моделі приблизно відповідали розташуванню фурм в гарячій моделі. Досліди проводилися як з використанням полідисперсного складу вапняку, так і з окремими фракціями.

До штуцерів подавалося повітря з насиченими парами йоду з витратою в 10–15 разів менше по відношенню сумарної витрати топкових газів, що утворюються, на виході з фурм.

– Визначення розподілу пор за розміром

Розподіл пор за розміром було отримано методом адсорбції азоту з використанням теорії функціоналу щільності загартованого твердого тіла (QSDFT – Quenched solid density functional theory), яка враховує шорсткість і неоднорідність поверхонь стінок пор. Деякі дослідники [5, 6] використовують ВІН (Barret, Joyner and Halenda) і метод ртутної інтрузійної поросиметрії (МІП) для опису розподілу пор за розміром, припускаючи циліндричну геометрію пор у матеріалах. У сорбції металів активну участь беруть колоїдні форми сульфідів, кремнезему та інших сполук. Було вирішено використовувати метод QSDFT для врахування неоднорідності стінок пор і достовірної характеристики мезопор в діапазоні від 2 до 35 нм. Метод QSDFT [7] дозволяє аналізувати більш широкий діапазон пор.

– Дослідження морфології та елементного аналізу матеріалу

Морфологію та елементний аналіз зразків отриманого продукту, (СаО) досліджували за допомогою скануючої електронної мікроскопії в парі з детектором енергодисперсійної спектроскопії (SEM-EDS – Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)). Досліджувані зразки просіювали, а потім висушували при температурі 40°C. Щоб отримати SEM-зображення, порошкоподібні зразки поміщали в контейнер для полегшення морфологічного спостереження. SEM спостереження зразків проводили на мікроскопі ZEISS EVO MA10 при прискорювальній напрузі 20 кВ. Детектор Bruker AXSX Flash 6/10 може відображати всі елементи, присутні в зразку, із загальною точністю близько 1% і чутливістю виявлення до 0,1% за вагою.

Обговорення результатів

Результати дослідження конструктивного оформлення та особливості процесів, що протікають у випалювальних печах

Аналіз даних про експлуатацію печей в Україні показує, що найчастіше використовуються шахтні печі циліндричного та гофрованого типів продуктивністю 4,2–10,5 т/год, діаметром шахти 3–5,5 м і висотою печі до 8 діаметрів з плоским профілем футеровки. Як правило, використовується система опалення з центральним і двома рядами периферійних інжекційних пальників, які не мають розширення [6]. Такі печі є агрегатами які споживають значну кількість палива, а саме 4003–4702 КДж/кг. Продукт, який отримують в процесі

випалу містить підвищене значення діоксиду вуглецю і має низьку реакційну здатність за часом гасіння готового випаленого продукту (більше 15 хвилин). Слід зазначити, що вміст активного кальцію оксиду не перевищує 65%. Зважаючи на зазначені вище характеристики можна зробити припущення, що готовий продукт матиме не зовсім високі характеристики, і отримання такого продукту в печах зазначеного типу дуже ускладнений. Очевидним є і той факт, що печі, які працюють на газоподібному паливі витрачають більше тепла ніж печі, які працюють на твердому паливі. Надмірна витрата тепла викликана неповним згорянням палива в шарі фільтрації через нерівномірний розподіл паливних газів в перерізі печі і несприятливі умови для газоповітряного перемішування в шарі вихідного матеріалу [8, 9]. Також слід зазначити, що в шарі матеріалу можуть виникати аномально високі температури і відносно низькотемпературні зони, що може призвести до спікання продуктів реакції і недостатнього недовипалу сировини. Проводячи аналіз розробок з удосконалення конструкції шахтних печей для усунення вищезгаданих недоліків, а саме, поліпшення процесу спалювання природного газу шляхом примусового відхилення полум'я і часткового видалення нагрітого повітря з топки перед зоною нагріву, не надають суттєвих переваг у вирішенні питання щодо поліпшення процесу спалювання фільтраційного палива [9].

Для термічної обробки полідисперсних порід з регульованою температурою теплоносія піч має відповідати наступним вимогам: спалювання палива має відбуватися поза шаром матеріалу з отриманням продуктів горіння певної температури; рух газу в зоні випалу повинен бути перпендикулярним для забезпечення рівномірного розподілу теплоносія і зменшення аеродинамічного опору.

Всі типи печей для випалу незалежно від конструктивного оформлення мають три основні зони. На неоднорідний розподіл швидкості газового потоку в шахтному перерізі впливає частка використовуваного вапняку і характер руху сировини в циліндричній частині печі.

У роботах [10,11] було проведено моделювання процесу перебігу матеріалу в реакторі шахтного типу і було встановлено, що оптимальні розміри шматків матеріалу для руху в печі наступні: дрібні шматки – 3 см, великі шматки – 7 см і при масовому вмісті фракцій від 30 до 70% відповідно. Слід зазначити, що наведене співвідношення за фракційним складом може бути досягнуто до подачі матеріалу в піч при його збагаченні з використанням фотоелектронного сепаратора [12].

Існує твердження, що співвідношення внутрішнього діаметру печі (D_f) до шматків вапняку (d) має бути в межах від 43 до 50 для подачі у шахтну піч, і розмір « d » не впливає на розподіл газового потоку. Виходячи з цього твердження отримуємо той факт, що вапняк повинен подаватися в піч певною фракцією $d=70-80$ мм, при внутрішньому діаметрі печі $D_f=3,7-5,5$ м.

Однак, навіть при такому фракційному складі матеріалу спостерігається відмінність привіської та пристінної швидкостей в зоні випалу, з переважанням привіської. Цього можна уникнути, якщо використати декілька отворів, через які буде вивантажуватися вапно.

Кальцинування вапняку відбувається в умовах щільного шару рухомого пічного газу і фільтрації через цей шар. Для випадків, коли кусковий шар матеріалу нагрівається гарячими газами, час повного розкладання вапняку (умовний час), може бути розрахований рівнянням [13]:

$$\tau_f = \frac{Q_{nm} \cdot \rho_v \cdot C_{CaCO_3} \cdot r_v}{300 \cdot \alpha \cdot \lambda_0 \cdot \Delta T_2} \cdot \left[(1 - \beta \cdot T) \cdot \left(\lambda_0 + \frac{\alpha \cdot r_v}{2} \right) - \frac{1}{4} \cdot \beta \cdot \alpha \cdot \Delta T_2 \cdot r_v \right], \quad (1)$$

де Q_{nm} – питома витрата тепла, кДж/кг; ρ_v – щільність вапняку; $\rho_b = 2553$ кг/м³; C_{CaCO_3} – вміст карбонату кальцію, %_{мас}; r_v – радіус шматка вапняку, м; α – коефіцієнт теплопередачі в діапазоні температур від 900 до 1300°C; $\alpha = 62,85 \div 838$ кДж/(м²·год·К); ΔT_2 – різниця температур між газоподібним середовищем і речовиною, °C; λ_0 – теплопровідність при 0°C, кДж/(м·сек·К); β – температурний коефіцієнт; $\beta \sim 0,42 \cdot 10^{-3}$,

$$\lambda_0 = \lambda_T / (1 + \beta \cdot T), \quad (2)$$

де λ_T – теплопровідність матеріалу, кДж/(м·сек·К).

У загальному випадку час перебування матеріалу (τ) у печі від моменту завантаження та до моменту вивантаження визначається сумою часів перебування у кожній із зон шахтної печі.

Час перебування матеріалу в початковій зоні вибираємо в інтервалі температур від 1300 до 300°C. Час перебування в зоні охолодження вибирається від 1000 до 100°C і враховується щільність продукту при ступеня розкладання вапняку 98%. Слід зазначити, що у зоні підігріву лімітуючою стадією є підведення тепла від газу до шматкового матеріалу і дорівнює $\sim 0,4 \div 0,45$ МДж/(м²·год·К) і даний процес протікає протягом 1 години. Загальний час перебування матеріалу в печі, а саме в зоні підігріву та зоні випалу складає приблизно 1,5 години, середня швидкість переміщення матеріалу в циліндричній частині печі становить 14,4 м/год, що дозволяє вважати шар умовно нерухомим.

Враховуючи вищевикладені факти слід зазначити, що найбільш важливою характеристикою всіх печей є розподіл швидкостей газового потоку по перерізу шахти печі і глибина радіального проникнення газового потоку в шар матеріалу. Саме ці характеристики впливають на якість вапняку та рівномірність випалу матеріалу і саме ці параметри є основою конструктивного оформлення печей для випалу вапняку з використанням газоподібного палива.

Результати візуальних спостережень

Візуальні спостереження на холодній моделі показали, що при засипанні вапняку однорідного розміру (60–70 мм) та при подачі повітря в один або

кілька штуцерів спостерігалось найбільш яскраве та «густе» фарбування біля стін апарату на відстані від стін ~ 75 –82 мм. Під час просування матеріалу радіусом моделі до центру апарату спостерігалось зниження інтенсивності забарвлення. Подібна картина спостерігалась і при завантаженні в апарат вапняку фракцією 30–40 мм, хоча слід зазначити, що забарвлення ставало менш інтенсивним вже на відстані 45–55 мм від стінок моделі, а ось в центрі перерізу моделі апарату колір практично не змінювався. Іншою особливістю, яка спостерігалась, було те, що фарбування поширювалося вздовж вісі холодної моделі як вгору, так і вниз від точки введення газу. Якщо умовно прийняти товщину забарвлення за одиницю, то приблизно від точки введення газу вгору забарвлювалося 0,700–0,800 м матеріалу, а вниз 0,200–0,300 м матеріалу. В цілому, оцінюючи вищевикладені результати можна вважати, що вони свідчать переважно про кільцевий струм газів, що подаються в модель вздовж стінок і взаємодії зон протитечії і прямогоку відповідно вгору і вниз моделі. Збільшення витрати газу через штуцера в 1,5 рази змістило глибину фарбування на 5–7 мм у радіальному напрямку, що свідчить про неефективність цього методу. Відносно рівномірний розподіл забарвлення за поперечним перерізом шару було досягнуто, коли штуцера подачі повітря були висунуті вглиб шару на 40 мм, а шар матеріалу (вапняку) був полідисперсною системою, що складається з шматків розміром 40 м і 70 м при співвідношенні 20 та 80% відповідно. Шматки меншого розміру довільно розподілялися за обсягом моделі при завантаженні суміші, проте спостерігалось відносно рівномірний їх розподіл за обсягом досліджуваного шару, ступінь сегрегації становила приблизно 5–7%. У цьому випадку максимальне радіальне проникнення струменя повітря пропорційно наступному співвідношенні $H/d \sim 0,06 \cdot (H/d - H - \text{висота шатної печі, } d - \text{діаметр шматків вапняку})$.

При цьому також спостерігалось виникнення зон протитечії $H/d \sim 0,6$ –0,7 і прямогоку $H/d \sim 0,3$ –0,4. Такий ефект умовно-рівномірного розподілу фарбування спостерігався через зміну структури потоку матеріалу за рахунок висування штуцерів. Визначення глибини проникнення топкових газів з температурою 1250°C у радіальному напрямку проводилося і на гарячій моделі шляхом одночасного відбору проб газу, що відходить з печі та з шару шматкового матеріалу по діаметру шахти на рівнях, де розташовані фурми та на рівнях вище фурм та нижче фурм (на відстані 1,2 м). Середній розмір шматків завантаженого в піч вапняку дорівнював 37 і 76 мм. Кожен наступний відбір проб газу проводили через 540–600 с. Було проведено розрахунок статичних характеристик та коефіцієнтів рівнянь проникнення топкових газів у радіальному напрямку. Отримано рівняння для розрахунку проникнення топкових газів у радіальному напрямку:

$$G = k \cdot V_G \cdot d^{0.4} \cdot H^{0.3}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт, що враховує симплексне відкриття струменя потоку димових газів; $k = 4$; V_G – об’єм димових газів, м^3 ; $d^{0.4}$ – діаметр великих шматків матеріалу, м; $H^{0.3}$ – висота заповнення топки матеріалом, м.

Розмір середнього відхилення значень проникнення, розрахованих за рівнянням, становить $\pm 12\%$. Спостереження за поведінкою матеріалу безпосередньо біля фурм свідчить про відсутність вогнищ високої температури (рис. 1).

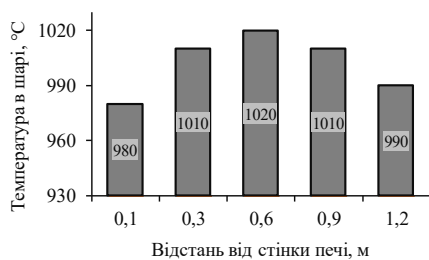


Рис. 1 – Температурне поле в області фурм у шарі матеріалу

При цьому, зона підтримки зазначеного розподілу температур по висоті становила приблизно 3–3,2 м.

Нижче цієї зони температура шару становила 860–900°C, при цій температурі подальше випалення припинялося. Проте встановлено, що порівняно з типовими шахтними печами у зоні підтримки температур 1050–1070°C спостерігається адиабатична витримка при температурах більше 1000°C у шарі 1,2–1,5 м, тобто за висотою шару нижче та вище точок введення топкових газів. Це свідчить про те, що існує (як і в холодній моделі) прямоток топкових газів нижче за зону введення і протиточія вище цієї зони, що подовжує зону випалу і дозволяє збільшити ступінь випалу на 3–4%, а продуктивність печі на 10%. На рис. 2 наведено принципову схему конструкції печі (а), а також розподіл температур і ступеня випалу по її висоті (б).

Піч для випалу вапняку (1), внутрішньо відкладена вогнетривкою цеглою (2). Кусковий матеріал завантажується у піч зверху через приймальну лійку (8) за допомогою скіпового ковша (9), який піднімається лебідкою по скіповій дорозі (10). Приймальна (завантажувальна) вирва (8) обладнана двоклапанним механізмом, який забезпечує від підсмоктування повітря через верх печі.

Спочатку матеріал для випалу засипається у верхню лійку, потім верхній клапан відкривається і матеріал потрапляє у проміжну камеру. Тільки після закриття верхнього клапана відкривається нижній, і матеріал вивантажується в піч. У печі кусковий матеріал рухається зверху до низу, звільняючись внизу за допомогою спеціального візка (7). Гарячі газу, утворені під час спалювання газоподібного палива, піднімаються вгору через шар матеріалу і

видаляються димососом через спеціальний короб (11) у верхній зоні печі. Газоподібне паливо спалюється в периферійних (3), (4) та центральному (5) пальниках. Центральний пальник розташований у нижній частині на розсікачі (6) [14].

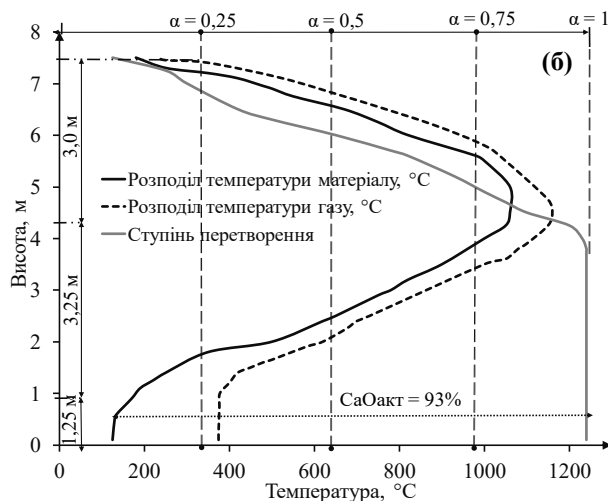
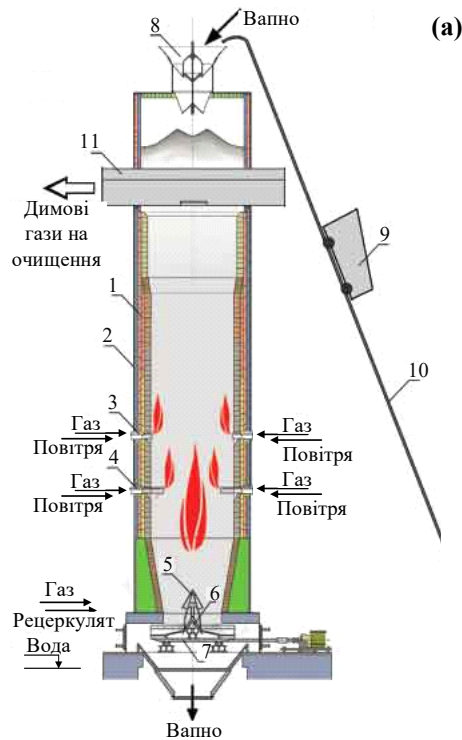


Рис. 2 – Схема конструкції печі (а), розподіл температур та ступеня випалу по висоті печі (б)

Результати експериментів свідчать про те, що дисоціація шматкового вапняку на початковому етапі процесу визначається фактором температури, а при ступені випалення шматка понад $\alpha = 80\text{--}85$ лімітуючим процесом є внутрішнє масоперенесення у поверхневій оболонці вапна. Конструкція печі, яка забезпечує прямоточно-протиточний принцип теплообміну, дозволяє здійснювати адиабатичну витримку в зоні випалу при температурах 1050–1070°C, що забезпечує можливість отримувати вапно із вмістом основної

речовини 96–97% та вмістом $\text{CaO}_{\text{акт}} > 90\%$. Досягнуте під час досліджень збільшення продуктивності на 20–25%, супроводжувалося зниженням питомої витрати палива на 10%.

Таким чином, отримані результати свідчать про доцільність розробки та широкого впровадження нової конструкції печі у різних галузях промисловості.

– **Дослідження отриманого продукту в результаті випалу. Результати СЕМ аналізу**

Після випалу, було отримано продукт, кальцію оксид, який можна бачити на рис. 3.



Рис. 3 – Отриманий після випалу кальцію оксид

Аналіз мікроструктури зразка матеріалу після випалу представлений на рис. 4.

Негашене вапно, або кальцію оксид – кристалічний матеріал, який має білий відтінок. Він формується в процесі випалу таких субстанцій, як крейда, доломіт, вапняк і інших речовин, що мають кальцієво-магнієву структуру.

Морфологія та розмір часток пов'язані з характеристиками їх кристалічної структури. Згідно з результатами, поверхня досліджуваного зразка є однорідною. Колір зразка був від світло- до темно-білого. Морфологічна структура зразка має умовно однорідну структуру. Зразок містить такі хімічні елементи як, кисень, кальцій, карбон та магній. З отриманого мепінгу матеріалу можна прослідити розташування того чи іншого хімічного елементу в зразку. Отриманий за результатами аналізу елементний склад матеріалу 100% підтверджує що в результаті випалу було отримано саме кальцію оксид. Щодо незначної кількості вмісту магнію в зразку. То, наявність магнію можна пояснити тим, що випалу піддаються субстанції, які мають кальцієво-магнієву структуру.

– **Результати дослідження матеріалу методом фізичної адсорбції**

Були проведені експерименти з адсорбції газу, щоб охарактеризувати площу поверхні, розподіл пор за розміром і об'єм пор, що відноситься до пор, доступних з поверхні пористих матеріалів. Утворення пористих матеріалів зазвичай відбувається під час кристалізації або наступних фаз обробки, в результаті чого утворюється структура, що містить ізольовані або взаємопов'язані пори, які можуть мати різні форми та розміри. Характеристика цих пористих матеріалів передбачає визначення розмірів їхніх пор

за допомогою даних сорбції газу [15]. Відповідно до класифікації IUPAC, розміри пор зразка підпадають під категорію ізотерм типу II, що вказує на непористі або макропористі матеріали. Ізотерми сорбції типу II, як показано на рис. 5, зазвичай спостерігаються з непористими або макропористими адсорбентами, що забезпечує необмежену багат шарову адсорбцію.

Також слід зазначити, що ізотерма зразка відноситься і до типу I (до типу Ia). Це є мікропористі тверді речовини з відносно невеликими зовнішніми поверхнями дають оборотні ізотерми типу I. Ізотерма типу I є увігнутою до осі p/p_0 (p/p_0 – відносний тиск), і адсорбована кількість наближається до граничного значення.

Це обмеження поглинання регулюється доступним об'ємом мікропор, а не площею внутрішньої поверхні. Різке поглинання при дуже низькому p/p_0 відбувається завдяки посиленій взаємодії адсорбент-адсорбція у вузьких мікропорах (мікропорах молекулярного розміру), що призводить до заповнення мікропор при дуже низькому p/p_0 .

Точка, де ізотерма демонструє перегин або коліно, називається точкою «В». Цей перегин означає завершення моношарового покриття та початок багат шарової адсорбції.

Як згадувалося раніше, матеріал демонструє ізотерми типу II, які є оборотними та зазвичай спостерігаються під час фізичної сорбції більшості газів на непористих або макропористих адсорбентах. Форма цих ізотерм є результатом необмеженої одношарово-багат шарової адсорбції, яка поширюється на високі значення p/p_0 . Коли коліно гостре, позначене як точка «В», це зазвичай означає завершення одношарового покриття. І навпаки, більш поступове викривлення, що означає менш чітку точку «В», свідчить про значне перекриття між одношаровим покриттям і початком багат шарової адсорбції. У таких випадках товщина адсорбованого багат шарового шару має тенденцію до збільшення, коли p/p_0 наближається до 1.

Відповідно до класифікації петель гістерезису IUPAC [16–20] досліджуваний матеріал відноситься до категорії петель H3. Петля типу H3 демонструє дві відмінні характеристики:

- гілка адсорбції нагадує ізотерму II типу;
- нижня межа гілки десорбції зазвичай знаходиться на p/p_0 , пов'язаному з кавітацією.

Петлі такого роду зазвичай спостерігаються в матеріалах, що складаються з нежорстких агрегатів пластинчастих частинок або у випадках, коли мережа пор містить макропори, які не повністю заповнені поровим конденсатом.

Аналіз розподілу пор за розміром, отриманий в результаті експериментів з адсорбції азоту на зразку, вказує на стійку тенденцію, коли зразок демонструє комбінацію щілинних і циліндричних пор. Адсорбатом був азот при температурі 77,35 K за методом BET. Кореляція між діаметром пор і площею поверхні була визначена за допомогою методу DFT, як показано на рис. 6.

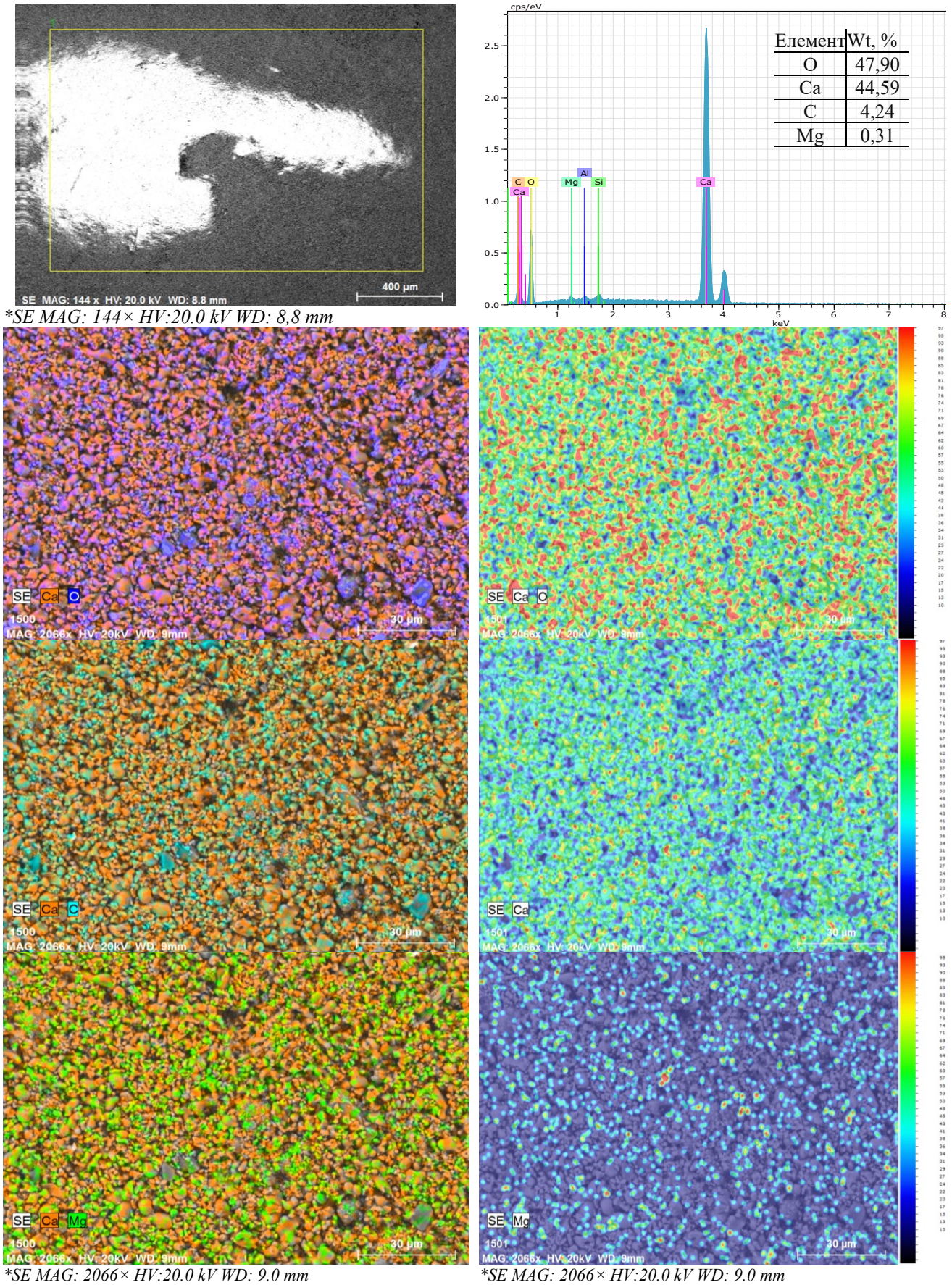


Рис. 4 – SEM-EDS аналіз матеріалу після випалу *Шкала, розташована праворуч має значення від 10 до 100 %, від синього до червоного кольору відповідно

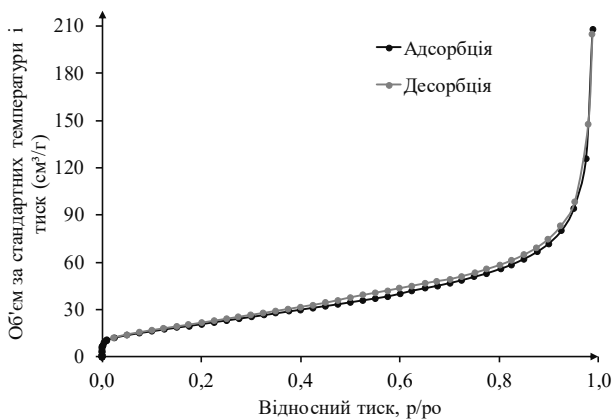


Рис. 5 – Тип ізотерм досліджуваного зразка

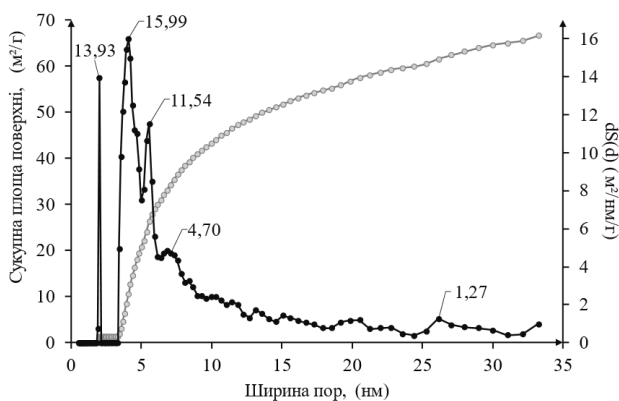


Рис. 6 – Розподіл пор за розміром за результатами тесту фізичної адсорбції зразка

Молекулярні моделі адсорбції, як теорія функціоналу густини (DFT), забезпечують точні описи явищ адсорбції. Використовуючи надані міжмолекулярні потенціали для взаємодії рідина-рідина та рідина-тверде тіло, ці моделі сприяють створенню ізотерм адсорбції в змодельованих порах.

У підході, заснованому на BET, азот використовувався як адсорбат при температурі 77,35 К. Кореляція між діаметром пор і площею поверхні була встановлена за допомогою методу DFT, і результати представлені в Табл. 1.

Таблиця 1 – Вимірювання адсорбції азотом для зразка.

Параметри	Зразок CaO	
	DFT метод	
Питома площа поверхні, м ² /г	66,59	
Загальний об'єм пор, см ³ /г	0,18	
Діаметр пор, нм	4,08	
BET резюме		
Площа поверхні, м ² /г	84,0	

Рис. 6 ілюструє поширеність мезопор у зразку. Дані про площу поверхні та адсорбцію були отримані з ізотерми адсорбції та обчислені методом BET. Крім того, метод DFT використовувався для оцінки

загального об'єму пор і середнього діаметра пор.

Дані таблиці показують питому поверхню (як визначено методом DFT) для досліджуваного зразка. Зокрема, досліджуваний зразок продемонстрував площу поверхні (сума BET) на рівні 84,0 м²/г. Крім того, середній діаметри пор зразка склав 4,08 нм. Аналогічна кореляція спостерігалася між питомою поверхнею та об'ємом пор зразка. Ці результати азотної поросиметрії можуть бути пов'язані з дослідженою мікроструктурою зразків для подальшого аналізу.

У досліджуваному зразку були очевидні різні групи пор в діапазоні від 0,54 нм до 33,24 нм. Ці пори показали бімодальний розподіл у матеріалі, причому пори меншого діаметру нагадували щілини, а пори більшого діаметра виглядали як циліндричні пори. Ці циліндричні пори є результатом термохімічних перетворень за участю складових компонентів. Наявність магнію в зразках обумовлює утворення циліндричних пор і подальшим збільшенням діаметра пор.

Висновки

Проведені результати досліджень свідчать про те, що дисоціація кускового вапняку на початковому етапі процесу визначається фактором температури, а при ступені випалу шматка понад $\alpha=80-85$ лімітуючим процесом є внутрішнє масоперенесення в поверхневій оболонці матеріалу. Конструкція печі, яка забезпечує прямоточно-протитечійний принцип теплообміну дозволяє здійснювати адіабатичну витримку в зоні випалу при температурах 1050–1070 °С, що забезпечує можливість одержувати вапно з вмістом основної речовини 96–97% і вмістом активного кальцію оксиду більше ніж 90%. Досягнуте при дослідженнях збільшення продуктивності на 20–25%, супроводжувалося зниженням питомої витрати палива на 10%. Фракційний склад вапняку, що завантажувався в піч дозволяє вважати, що можлива утилізація відходів класифікації карбонатної сировини фракції 20–40 мм. Також слід зазначити, що найбільш важливим параметром всіх печей є розподіл швидкостей газового потоку по перетину шахтної печі і глибина радіального проникнення газового потоку в шар матеріалу. Зазначені характеристики надають вплив на якість вапняку і рівномірність випалу вапна, що і стало основою конструкційного оформлення шахтних печей для випалу матеріалів з використанням газоподібного палива.

Таким чином, отримані результати свідчать про доцільність розробки і широкого впровадження конструкції печі в різних галузях промисловості.

Список літератури

1. Карзун Е. Г., Боглаєнко Д. В., Шаповров В. П., Шаповров П. В. Дослідження процесу змочування вапна водою перед подачею її в гідратор у виробництві високодисперсного гідроксиду кальцію або пушонки.

- Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2007. № 1/3 25. С. 41–46.
- Шахин І. Х., Шапоров В. П., Лопухина О. А. Аналіз способів виробництва вапна та випалу карбонатної сировини. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2003. №3. С. 76–90.
 - Kuparinen K., Vakkilainen E. Green pulp mill: Renewable alternatives to fossil fuels in lime kiln operations. *BioRes*. 2017. №12(2). P. 4031–4048. doi: 10.15376/biores.12.2.4031-4048.
 - Manning R., Honghi T. Impact of cofiring biofuels and fossil fuels on lime kiln operation. *TAPPI Journal*. 2015. №7. P. 474–80. doi: 10.32964/tj14.7.474.
 - Thommes M. Physical adsorption characterization of nanoporous materials. *Chemie Ingenieur Technik*. 2010. 82. P. 1059–1073. doi: 10.1002/cite.201000064.
 - A. Alothman Z. A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials. *Materials*. 2012. № 5(12). P. 2874–2902. doi: 10.3390/ma5122874.
 - Grubeša N., Vračević M., Ranogajec J., Vučetić V. Influence of pore-size distribution on the resistance of clay brick to freeze-thaw cycles. *Materials*. 2020. №13(10). P. 2364. doi: 10.3390/ma13102364.
 - Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy Proc*. 2017. 120. P. 75–95. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.156.
 - Senegačnik A., Oman J., Širok B. Annular shaft kiln for lime burning with kiln gas recirculation. *Appl Therm Eng*. 2008. №28 (7) P. 785–792. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.04.015.
 - Дорофєєнко С. О. Чисельне моделювання руху сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу. *Теоретичні основи технологій*. 2007. Т. 41. №2. С. 205–212.
 - Дорофєєнко С. О. Чисельне моделювання перебігу бі дисперсного сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу. *Теоретичні основи хімічної технології*. 2007. Т. 41. №6. С. 625–629.
 - 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.
 - Матюхін В. І., Ярошенко Ю. Г., Журавльов С. Я., Морозова, Є. В., Матюхіна А. В. Технологічні можливості використання природного газу в шахтних печах для випалу вапняку. *Вісті вищих навчальних закладів. Чорна металургія*. 2020. 63 (1). С. 13–18.
 - Витяганець В. С., Шапоров В. П., Пітак І. В. Баранова А. О. Конструктивне оформлення та особливості процесів у випалювальних шахтних печах з використанням газоподібного палива. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2(8). С. 96–100. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.14.
 - Matthias T., Katsumi K., Alexander V. and other. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem*. 2015. 87(9–10). P. 1051–1069. doi: 10.1515/pac-2014-1117.
 - Gabrijela H., Milica P., and other. A Brief Evaluation of Pore Structure Determination for Bioaerogels. *Gels*. 2022. 8(7). P. 438. doi: 10.3390/gels8070438.
 - Gritsenko C., Lepalovskij V., Volochaev M., Komanicky V., Gorkovenko A., Pazniak H., Gazda M., Andreev N., and Rodionova V.. Complex Study of Magnetization Reversal Mechanisms of FeNi/FeMn Bilayers Depending on Growth Conditions. *Nanomaterials*. 2022. 12. P. 1178. doi: 10.3390/nano12071178.
 - Liu C. A theoretical study of magnetization reversal in exchange biased synthetic antiferromagnet. *J. Magn. Magn. Mater*. 2022. 564(2). P. 170193. doi: 10.1016/j.jmmm.2022.170193.
 - Merkel M., Reginka M., Huhnstock R., and Ehresmann A. Polycrystalline exchange-biased bilayers: Magnetically effective versus structural antiferromagnetic grain volume distribution. *Phys. Rev. B*. 2022. 106. 014403. doi: 10.1103/PhysRevB.106.014403.
 - Congxiao Liu. Classification of hysteresis loops for exchange biased F/NM/F trilayer with antiferromagnetic interlayer coupling. *J. Appl. Phys*. 2023. 134. 043904 doi: 10.1063/5.0154790.

References

- Karzun E. H. Bohlaenko D. V., Shaporev V. P., Shaporev P. V. Doslidzhennia protsesu zmochuvannia vapna vodoiu pered podacheiu yii v hidrator u vyrobnytstvi vysokodispersnoho hidroksydu kaltsiiu abo pushonky. *Shkhidnoievropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 2007, 1/3 25, pp. 41–46.
- Shakhyn I. Kh., Shaporev V. P., Lopukhyna O. A. Analiz sposobiv vyrobnytstva vapna ta vypalu karbonatnoi syrovyny. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2003, 3, pp. 76–90.
- Kuparinen K., Vakkilainen E. Green pulp mill: Renewable alternatives to fossil fuels in lime kiln operations. *BioRes*, 2017, 12(2), pp. 4031–4048, doi: 10.15376/biores.12.2.4031-4048.
- Manning R., Honghi T. Impact of cofiring biofuels and fossil fuels on lime kiln operation. *TAPPI Journal*, 2015, №7, pp. 474–80, doi: 10.32964/tj14.7.474.
- Thommes M. Physical adsorption characterization of nanoporous materials. *Chemie Ingenieur Technik*, 2010, 82, pp. 1059–1073, doi: 10.1002/cite.201000064.
- A. Alothman Z. A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials. *Materials*, 2012, 5(12), pp. 2874–2902, doi: 10.3390/ma5122874.
- Grubeša N., Vračević M., Ranogajec J., Vučetić V. Influence of pore-size distribution on the resistance of clay brick to freeze-thaw cycles. *Materials*, 2020, 13(10), pp. 2364, doi: 10.3390/ma13102364.
- Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy Proc*, 2017, 120, pp. 75–95, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.156.
- 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, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.04.015.
- Dorofeienko S. O. Chyselne modeliuвання rukhu sypuchoho materialu v reaktori shakhtnoho typu. *Teoretychni osnovy tekhnolohii*, 2007, vol. 41, 2, pp. 205–212.
- Dorofeienko S. O. Chyselne modeliuвання perebihu bi dyspersnoho sypuchoho materialu v reaktori shakhtnoho typu. *Teoretychni osnovy khimichnoi tekhnolohii*, 2007, vol. 41, 6, pp. 625–629.
- Shaporev P. V., Raiko V. F., Sebko V. V. Pro mozhlyvist zbahachennia vapniakiv klasu 40–150 mm iz vykorystanniam fotoelektronnoho separatora. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2010, 16, pp. 139–153.
- Matiukhin V. I., Yaroshenko Yu. H., Zhuravlov S. Ya., Morozova, Ye. V., Matiukhina A. V. Tekhnolohichni mozhlyvosti vykorystannia pryrodnoho hazu v shakhtnykh pechakh dla vypalu vapniaku. *Visti vyshchyykh navchalnykh zakladiv, Chorna metalurhii*, 2020, 63 (1), pp. 13–18.

14. Vytiaganets V., Shaporev V., Pitak I., Baranova A. Constructive design and features of the processes in the roasting shaft furnaces by using gaseous fuel. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, 2 (8), pp. 96–100, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.14.
15. Matthias T., Katsumi K., Alexander V. and other. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.*, 2015, 87(9–10), pp. 1051–1069, doi: 10.1515/pac-2014-1117.
16. Gabrijela H., Milica P., and other. A Brief Evaluation of Pore Structure Determination for Bioaerogels. *Gels*, 2022, 8(7), pp. 438, doi: 10.3390/gels8070438.
17. Gritsenko C., Lepalovskij V., Volochaev M., Komanicky V., Gorkovenko A., Pazniak H., Gazda M., Andreev N., and Rodionova V. Complex Study of Magnetization Reversal Mechanisms of FeNi/FeMn Bilayers Depending on Growth Conditions. *Nanomaterials*, 2022, 12, pp. 1178, doi: 10.3390/nano12071178.
18. Liu C. A theoretical study of magnetization reversal in exchange biased synthetic antiferromagnet. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2022, 564(2), pp. 170193, doi: 10.1016/j.jmmm.2022.170193.
19. Merkel M., Reginka M., Huhnstock R., and Ehresmann A. Polycrystalline exchange-biased bilayers: Magnetically effective versus structural antiferromagnetic grain volume distribution. *Phys. Rev. B*, 2022, 106, 014403, doi: 10.1103/PhysRevB.106.014403.
20. Congxiao Liu. Classification of hysteresis loops for exchange biased F/NM/F trilayer with antiferromagnetic interlayer coupling. *J. Appl. Phys*, 2023, 134, 043904, doi: 10.1063/5.0154790.

Відомості про авторів (About authors)

Витяганець Валентин Сергійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3314-6917; e-mail: Valentyn.Vytiaganets@mit.khpi.edu.ua.

Valentin Vytiaganets – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", post-graduate student at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3314-6917, e-mail: Valentyn.Vytiaganets@mit.khpi.edu.ua

Пітак Інна Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

Inna Pitak – PhD, associate professor, National Polytechnic University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Витяганець В. С., Пітак І. В. Аналіз конструктивного оформлення шахтних печей та дослідження високоякісного продукту, отриманого в ході випалу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 31-41. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.05.

Please cite this article as:

Vytiaganets V., Pitak I. Analysis of the structural design of mine furnaces and research of the high-quality product obtained during firing process. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 31-41, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.05.

*Надійшла (received) 15.01.2024
Прийнята (accepted) 02.03.2024*