

УДК 66.041

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.14

КОНСТРУКТИВНЕ ОФОРМЛЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ У ВИПАЛЮВАЛЬНИХ ШАХТНИХ ПЕЧАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА

В. С. ВИТЯГАНЕЦЬ, В. П. ШАПОРЕВ, І. В. ПІТАК, А. О. БАРАНОВА*

кафедра хімічної техніки та промислової екології, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: baranova647@gmail.com

АНОТАЦІЯ У статті проаналізовано шахтні печі для виробництва вапна. За способом випалювання шахтні печі бувають пересипні, напівгазові, на газоподібному і рідкому паливі. Встановлено недоліки роботи основних сучасних печей при випалюванні вапна. Основними агрегатами для великотоннажного виробництва вапна є шахтні вапняково-випалювальні печі, в яких в якості палива використовуються доменний кокс або антрацит або сортові вугілля. Як правило тощі види палива застосовують у виробництвах, де поряд у технологічному циклі використовується вуглекислий газ, який міститься у топкових газах з концентрацією 36–40%_{мас.} Дані по експлуатації шести печей на території України на підприємствах показали, що основного поширення набули газові шахтні печі циліндричного і щілинного типу з прямим профілем футерування продуктивністю від 100 до 250 т/добу, діаметром шахти від 3,2 до 5,4 м і висотою 6–8 діаметрів печі. Найчастіше на них використовуються системи опалення з центральним і двома рядами периферійних інжекційних пальників без вису. Найбільш відповідальною частиною усіх печей є розподіл швидкостей газового потоку по перетину шахти печі й глибина радіального проникнення газового потоку в шар матеріалу. Розрахунки τ_1 і τ_{II} проводилися таким чином: для τ_1 вибирали інтервал температур середовища від 1300 до 250–300 °С, для τ_{II} – вибирався інтервал температур для матеріалу від 1000 до 100 °С і враховувалася щільність продукту при ступеня розкладання вапняку 98% (=1700 кг/м³). У зоні підігріву лімітуючою стадією є підведення тепла від газу до кускових матеріалів і при цьому можна прийняти рівним ~ 400–450 кДж/(м²·год·К) і τ_1 оцінюється 0,8÷1 години. Загальний час перебування матеріалу в печі (зоні підігріву і зоні випалу) оцінюється 1,4÷1,5 години, середня швидкість переміщення матеріалу в циліндричній частині печі оцінюється як 0,004 м/с, що дозволяє вважати, що фільтрується шар умовно нерухомим. Зазначені характеристики впливають на якість вапняку і рівномірність випалу вапняку, що і було основою конструктивного оформлення випалювальних печей шахтних з використанням газоподібного палива.

Ключові слова: шахтна піч; вапно; виробництво вапна; випал вапняку; газовий потік

CONSTRUCTIVE DESIGN AND FEATURES OF THE PROCESSES IN THE ROASTING SHAFT FURNACES BY USING GASEOUS FUEL

V. VYTYAHANETS, V. SHAPOREV, I. PITAK, A. BARANOVA

Department of chemical engineering and industrial ecology, NTU “KhPI”, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The article analyzes shaft furnaces for lime production. According to the method of firing, shaft furnaces are of bulk type, semi-gas type, gaseous and liquid fuels. The disadvantages of the operation of the main modern kilns during lime burning have been established. The main aggregates for high-tonnage lime production are mine lime kilns, in which blast furnace coke or anthracite, or high-quality coals are used as fuel. Generally, lean fuels are used in industries where, together with the technological cycle, carbon dioxide is used, which are contained in flue gases with a concentration of 36–40%_{mass}. The data on the operation of six furnaces on the territory of Ukraine at the enterprises showed that gas shaft furnaces of cylindrical and slotted type with a straight-lining profile were widely used. The parameters of such furnaces are productivity from 100 to 250 tons per day, shaft diameter from 3.2 to 5.4 m, and height 6–8 furnace diameters. Most often, they use heating systems with central and two rows of peripheral injection burners without protrusion. The most critical part of all furnaces is the distribution of gas flow rates over the cross-section of the furnace shaft and the depth of radial penetration of the gas flow into the material layer. Calculations of τ_1 and τ_{II} were carried out in the following way: for τ_1 , the temperature range of the medium was chosen from 1300 to 250–300 °C, τ_{ox} – the temperature range for the material was chosen from 1000 to 100 °C and the density of the product was taken into account at the degree of decomposition of limestone 98% (=1700 kg/m³). In the preheating zone, the limiting stage is the supply of heat from the gas to the lump material, and at the same time can be taken equal to $\approx 400–450$ kJ/(m²·h·K) and τ_1 is estimated as 0.8÷1 hour. The total residence time of the material in the furnace (in the heating zone and in the firing zone) is estimated at 1.4÷1.5 hours. The average speed of material movement in the cylindrical part of the furnace is estimated as 0.004 m/s, which makes it possible to consider the filtering layer conditionally stationary. These characteristics affect the quality of limestone and the uniformity of limestone firing that was the basis for the design of roasting shaft kilns using gaseous fuel.

Keywords: shaft furnace; lime, lime production; limestone roasting; gas flow

Вступ

До вапна, що споживається для технологічних цілей різними галузями промисловості, і відповідно до його якості висувають різноманітні вимоги. Для забезпечення різних галузей народного господарства вапном необхідної якості перед виробництвом завжди

стояла задача розробки нових технологічних режимів і конструкцій печей, що забезпечували б стабільне отримання продукту із заданими властивостями. Основними агрегатами для великотоннажного виробництва вапна є шахтні вапняково-випалювальні печі, в яких у якості палива використовуються доменний кокс або антрацит, або сортові вугілля. Як

правило тощі види палива застосовують у виробництвах, де разом у технологічному циклі використовується вуглекислий газ, що міститься у топкових газах із концентрацією 36–40%_{мас.}

Ряд виробництв, що забезпечують випуск високодисперсних наповнювачів та інгредієнтів за фізико-хімічними властивостями близькі до наноматеріалів першого роду, використовують в технологічному процесі.

Вапно із вмістом основної речовини $\text{CaO} > 96\%$, що містить $\text{CaO}_{\text{акт}} > 92\%$ і сумарним вмістом домішок менше ніж 1,5% [1]. Виробництво вапна для таких технологічних процесів вимагає не тільки певної підготовки вапняку або крейди до випалу, але в основному використання у якості палива природного газу, продукти спалювання якого виключають забруднення вапна [2].

До вищевказаного ряду виробництв належать виробництва хімічно осадженої крейди, високодисперсних оксиду і гідроксиду кальцію, гідрохлориду кальцію, кальцієвих наповнювачів для парфумерної та медичної промисловості та ін. Використання альтернативних джерел енергії з метою виробництва чистого продукту для проведення процесу випалу вапняку, як, наприклад, НВЧ-енергії [3], електрообігріву [4], сонячної енергії [5], проблематично, оскільки невідпрацьовані реакторні установки для реалізації процесу, а також досягнутий рівень досліджень [3–5] не дозволяють сподіватися на організацію в найближчому майбутньому великотоннажного виробництва вапна.

Тому застосування газоподібного палива в шахтних вапняно-випалювальних печах для виробництва високо випаленого вапна з високою активністю залишається необхідним прийомом.

Мета роботи

Опис, конструктивне оформлення випалювальних шахтних печей з використанням газоподібного палива і попередній аналіз особливостей протікають в них процесів.

Виклад основного матеріалу

Як показав аналіз даних з експлуатації шести печей на території України, на підприємствах, основного поширення набули газові шахтні печі циліндричного і щілинного типу з прямим профілем футерування продуктивністю від 100 до 250 т/добу, діаметром шахти від 3,2 до 5,4 м і висотою 6–8 діаметрів печі. Найчастіше на них використовуються системи опалення з центральної і двома рядами периферійних інжекційних пальників без висову [6]. Таким печам характерна висока питома витрата палива, що становить 4000–4700 кДж/кг, в продукті підвищений залишковий вміст CO_2 – до 12% і відносно низька реакційна здатність продукту за часом гасіння 25 хвилин. При цьому зміст $\text{CaO}_{\text{акт}}$ у продукті не перевищує 60–65%. З огляду на це, виробництво вапна з вмістом основної речовини \geq

96%, залишковим $\text{CO}_2 \leq 2\%$ і вмістом $\text{CaO}_{\text{акт}} > 90\%$ в таких печах ускладнений. Очевидно, що печі, що працюють на газоподібному паливі, витрачають тепла на 15–25% більше, ніж кращі печі на твердому паливі [7,8]. Перевитрата тепла викликається неповнотою згоряння в фільтраційному шарі через нерівномірний розподіл паливного газу за поперечним перерізом печі, несприятливих умов для перемішування газу з повітрям в шарі пускового матеріалу, в зв'язку з чим не може горіння газу, можливий недопал палива [9,10]. Крім того з цієї ж причини в шарі матеріалу можливе виникнення зон з аномально високою і відносно низькими температурами, що призводить до спікання продукту реакції або недопалом вихідної сировини (вапняку, крейди) [9,10]. Відомі розробки удосконалення щодо, конструктивного оформлення шахтних печей [11,12] з метою ліквідації вищезазначених недоліків, наприклад, удосконалення процесу спалювання природного газу з примусовим відхиленням факела або відведення частини підігрітого повітря з внутрішньої частини печі перед зоною оснащення печі балочним багатосопловим підігрівом, а також пальниками [12] не дають кардинального поліпшення при протіканні фільтраційного горіння палива.

Згідно дослідження [13] для термічної обробки полідисперсних порід регульована температурою теплоносія піч повинна характеризуватися такими особливостями: спалювання палива повинно здійснюватися поза шару матеріалу з отриманням продуктів горіння заданої температури; для забезпечення рівномірного розподілу теплоносія та зниження аеродинамічного опору рух газів в зоні випалу повинно відбуватися в перпендикулярному напрямку по відношенню до опускають матеріалу. Однак достовірні дані по експлуатації таких печей відсутні.

У всіх типах печей незалежно від конструктивного оформлення розрізняють три основні зони: зону підігріву, зону випалу і зону охолодження. Нерівномірний розподіл швидкостей газового потоку по перетину шахти впливає на робочі фракції вапняку, характер руху матеріалу в циліндричній частині печі.

Найкращим варіантом характеру режиму руху матеріалу є варіант, коли середні вертикальні швидкості \bar{V} великих шматків (0,06–0,08 м); менших шматків (0,03–0,04 м) в обсязі \bar{V}_V дрібних шматків в пристенній області \bar{V}_W рівні. У роботах [14,15] проведено чисельне моделювання течії сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу і було з достатньою достовірністю встановлено, що вище вказаний варіант може досягатися при середньому розмірі дрібних шматків 0,03 м, середній розмір великих шматків – 0,07 м і відповідно масовому вмісті фракцій 25–30% і 70–75%. Слід зазначити, що таке співвідношення фракційного складу вапняків досягається перед подачею їх в піч при їх збагаченні з використанням фотоелектронного сепаратора.

Однак, загальноприйнятим є твердження, що у шахтну піч необхідно подавати розміри шматків

вапняку при співвідношенні $D_p/d > 45 - 50$. При цьому вважається, що розмір d не впливає на розподіл газового потоку [15]. Останнє свідчить про те, що вапняк має подаватися в піч чітко визначеної фракції, приблизно $d = 0,07-0,08$ м, при внутрішньому діаметрі печі $D_p = 3,7-5,5$ мм.

Проте, навіть при такому фракційному складі при русі матеріалу в циліндричній частині шахтної печі при центральному вивантаженні, спостерігається відміна приосьової та пристінної швидкостей у зоні випалу на 5–8% з переважанням приосьової. Ця нерівномірність може бути згладжена з використанням декількох отворів для вивантаження вапна поблизу стін. Таким чином питання про фракційний склад вапняку, що подається в піч і умовах рівномірного руху печі матеріалу з різним фракційним складом уздовж шахти теоретично і практично вирішене в відомій літературі.

Кінетика випалу вапняку за умови руху щільного шару матеріалу та фільтрації через цей шар топкових газів мало вивчена в багатьох роботах [2,7,8]. Для практичних випадків, коли кусковий шар матеріалу нагрівається гарячими газами час повного розкладання вапняку, тобто умовно час перебування у зоні випалу печі, може бути оцінений за рівнянням [7]:

$$\tau_{\text{п}} = \frac{Q_y \cdot \rho_0 \cdot C_0 \cdot r_0}{300 \cdot \alpha \cdot \lambda_0 \cdot \Delta T_2} \cdot \left[\frac{1 - E \cdot T_B}{\left(\lambda_0 + \frac{\alpha \cdot r_0}{2} \right) - \frac{1}{4} \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T_2 \cdot r_0} \right]$$

де Q_y – питома витрата тепла, кДж/кг; ρ_0 – щільність вапняку – 2553 кг/м³; C_0 – вміст СаСО₃, %_{мас.}; r_0 – радіус шматка вапняку, м; α – коефіцієнт теплообміну в інтервалі температур від 950 – 1300 °С – 62,85–838 кДж/(м²·ч·К); ΔT_2 – різниця температур між газовим середовищем і речовиною, °С; λ_0 – коефіцієнт теплопровідності, кДж/(м·с·К),

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_T}{(1 + ET)}$$

де E – поправочний коефіцієнт $\sim 0,42 \cdot 10^{-3}$;
 $\lambda_T = \lambda_0(1 + ET)$.

У загальному випадку час перебування матеріалу в печі від моменту завантаження і до моменту вивантаження визначається сумою часу перебування у кожній із зон шахтної печі:

$$\tau_1 + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{ох}} = \tau$$

де τ_1 – час перебування в початковій зоні, год;
 $\tau_{\text{п}}$ – час перебування в зоні підігріву, год; $\tau_{\text{ох}}$ – час перебування в зоні охолодження, год.

Обговорення результатів

Відповідно до досліджень [7,8] розрахунок τ_1 і $\tau_{\text{п}}$ проводиться аналогічним способом, для τ_1 вибираємо інтервал температури середовища від 1300 до 250–300 °С, $\tau_{\text{ох}}$ – вибираємо інтервал температур для матеріалу від 1000 до 100 °С та враховується щільність продукту при ступені розкладу вапняку 98%

($\rho_{\text{СаО}} = 1700$ кг/м³). У зоні підігріву лімітуючою стадією є підведення тепла від газу до кускових матеріалів і при цьому можна прийняти рівним $\sim 400-450$ кДж/(м²·ч·К) [7] і τ_1 оцінюється 0,8÷1 год. Загальний час перебування матеріалу в печі (зоні підігріву і зоні випалу) оцінюється 1,4÷1,5 години, середня швидкість переміщення матеріалу з циліндричної частини печі оцінюється, як 0,004 м/с, що дозволяє вважати, що шар, який фільтрується умовно нерухомий.

Висновки

Таким чином, можна вважати, що найбільш відповідальною частиною усіх печей є розподіл швидкостей газового потоку по перетину шахти печі й глибина радіального проникнення газового потоку в шар матеріалу. Зазначені характеристики впливають на якість вапняку і рівномірність випалу вапняку, що і стало основою конструктивного оформлення випалювальних печей шахтних з використанням газоподібного палива.

Список літератури

1. Шапоров П. В., Питак И. В., Себко В. В. Шахтная печь для мягкого обжига известняка. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2013. № 3. С. 86–90.
2. Мешалкин В. П., Шулаев Н. С., Быковский Н. А., Аристов В. М. Физико-химические основы комбинированной энергоресурсоэффективной технологии переработки стоков производства кальцинированной соды. *Химия, науки о материалах*. 2020. Т. 494. С. 45–49.
3. Ишкильдин А. С. Подходы к построению систем автоматического контроля загазованности. *Современные технологии: достижения и инновации*. 2020. С. 466–467.
4. Пітак І. В., Шапоров П. В., Шапоров В. П., Протопопов Р. Я. Удосконалення виробництва вапняку в шахтних печах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2012. № 26. С. 33–41.
5. Пашенко А. А., Акрамов Р. А., Ибрагимов К. А. Свойства вяжущих синтезированных в солнечных печах. *Неорганические материалы*. 1985. № 5. С. 870–872.
6. Сокращение использования природного газа за счет перевода существующих известково-обжиговых печей на твердое топливо. *Сборник трудов I Межотраслевой научн.-практ. конф., молодых ученых и специалистов. «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережения, охрана окружающей природной среды», 27–28 марта 2012*. Харьков. С. 122–134.
7. Матюхин В. И., Ярошенко Ю. Г., Журавлев С. Я., Морозова, Е. В., Матюхина А. В. Технологические возможности использования природного газа в шахтных печах для обжига известняка. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. 63 (1). С. 13–18.
8. Плотникова С. Е., Перегудов Ю. С., Горбунова Е. М., Нифталиев С. И. Перспективы применения жидких отходов производства кальцинированной соды в качестве хладоносителя на основе тройной системы СаСl₂-К₂Сr₂О₇-Н₂О. *Вестник Воронежского*

- государственного университета инженерных технологий. 2020. 82(3). С. 233–238.
- Протасова Е. П., Пузиков Н. Т. Математическое моделирование и численный анализ шахтной печи известкового производства. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematic-heskoe-modelirovanie-i-chislennyy-analiz-shahtnoy-pechi-izvestkovogo-proizvodstva/viewer> (дата звернення 12.05.2021).
 - Цховребова И. Б., Чочиева А. В., Шевчук П. С. Перспективы использования технические средства при проведении таможенного контроля делящихся и радиоактивных материалов. *Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия*. 2019. С. 51.
 - Ильяшенко Н. И., Фильшин В. Е. Исследование аэродинамических характеристик шахтных известковых печей с принудительным отводом газа через kern. *Журнал Механика*. 1976. № 1. 168 с.
 - Исследование процесса обжига известняка в шахтных печах с газообразным топливом. *Труды НИОХИМ*. Харьков. 1981. Т. 56. С. 64–76.
 - Негадайлов А. А., Негадайлов П. А., Шапоров В. П. Оптимизация распределения кускового материала по диаметру шахтной печи с целью уменьшения вредных выбросов в атмосферный воздух от известнякового производства. *Экологічна безпека*. 2013. № 2. С. 97–102.
 - Питак И. В., Шапоров П. В., Шестопалов А. В., Шапоров В. П. Совершенствование производства известии в шахтных печах. *Технологический аудит и резервы производства*. 2014. №6 (1). С. 59–63.
 - Измалкова Т. В. Современные способы и методы оптимизации granulometric composition состава цементно-минеральных смесей. *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. С. 1188–1192.
- References (transliterated)**
- Shaporev P. V., Pitak I. V., Sebko V. V. Shakhtnaya pech' dlya myagkogo obzhiga izvestnyaka [Shaft kiln for soft calcining of limestone]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2013, no. 3, pp. 86–90.
 - Meshalkin V. P., Shulaev N. S., By'kovskij N. A., Aristov V. M. Fiziko-khimicheskie osnovy' kombinirovannoy energoresursoeffektivnoy tekhnologii pererabotki stokov proizvodstva kal'czinirovannoy sody' [Physicochemical foundations of a combined energy-resource-efficient technology for processing effluents from the production of soda ash]. *Khimiya, nauki o materialakh*, 2020, Vol. 494, pp. 45–49.
 - Ishkil'din A. S. Podkhody' k postroeniyu sistem avtomaticheskogo kontrolya zagazovannosti [Approaches to the construction of automatic gas control systems]. *Sovremennyye tekhnologii: dostizheniya i innovaczii*. 2020, pp. 466–467.
 - Pitak I. V., Shaporev P. V., Shaporev V. P., Protopopov R. Ya. Udoskonalennya virobnicztva vapnyaku v shakhtnikh pechakh [Improving limestone production in mine kilns]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 2012, no. 26, pp. 33–41.
 - Pashhenko A. A., Akramov R. A., Ibragimov K. A. Svoystva vyazhushhikh sintezirovanny'kh v solnechny'kh pechakh [Properties of binders synthesized in solar kilns]. *Neorganicheskie materialy*, 1985, no.5, pp. 870–872.
 - Sokrashhenie ispol'zovaniya prirodnogo gaza za schet perevoda sushhestvuyushhikh izvestkovo-obzhigovy'kh pechej na tverdoe toplivo [Reducing the use of natural gas by converting existing lime kilns to solid fuels]. *Collection of works I Interdisciplinary scientific and practical. Conf., young scientists and specialists. "Innovative ways of modernizing basic industries, energy and resource conservation, environmental protection"*, March 27–28, 2012, Kharkiv, pp. 122–134.
 - Matyukhin V. I., Yaroshenko Yu. G., Zhuravlev S. Ya., Morozova E. V., Matyukhina A. V. Tekhnologicheskiye vozmozhnosti ispolzovaniya prirodnogo gaza v shakhtnykh pechakh dlya obzhiga izvestnyaka [Technological possibilities of using natural gas in shaft kilns for calcining limestone]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2020, 63 (1), pp. 13–18.
 - Plotnikova S. E., Peregudov Yu. S., Gorbunova E. M., Niftaliev S. I. Perspektivy' primeneniya zhidkikh otkhodov proizvodstva kal'czinirovannoy sody' v kachestve khladonositelya na osnove trojnoy sistemy' CaCl2-K2Cr2O7-H2O [Prospects for the use of liquid waste from soda ash production as a coolant based on the CaCl2-K2Cr2O7-H2O ternary system]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenerny'kh tekhnologij*, 2020, no. 82(3), pp. 233–238.
 - Protasova E. P., Puzikov N. T. Matematicheskoe modelirovanie i chislenny'j analiz shakhtnoj pechi izvestkovogo proizvodstva [Mathematical modeling and numerical analysis of a shaft kiln of lime production]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematic-heskoe-modelirovanie-i-chislennyy-analiz-shahtnoy-pechi-izvestkovogo-proizvodstva/viewer> (accessed 12.05.2021).
 - Czkhovrebava I. B., Chochieva A. V., Shevchuk P. S. Perspektivy' ispol'zovaniya tekhnicheskie sredstva pri provedenii tamozhennogo kontrolya delyashhikhsya i radioaktivny'kh materialov [Prospects for the use of technical means during customs control of fissile and radioactive materials]. *Nauka i innovaczii v XXI veke: aktual'ny'e voprosy', otkry'tiya*, 2019, p. 51.
 - Ilyashenko N. I., Fil'shin V. E. Issledovanie aerodinamicheskikh kharakteristik shakhtny'kh izvestkovy'kh pechej s prinuditel'ny'm otvodom gaza cherez kern [Investigation of the aerodynamic characteristics of shaft lime kilns with forced gas removal through the core]. *Zhurnal Mekhanika*, 1976, no. 1, 168 p.
 - Issledovanie prozessa obzhiga izvestnyaka v shakhtny'kh pechakh s gazoobrazny'm toplivom [Investigation of the process of calcining limestone in shaft furnaces with gaseous fuel]. *Proceedings of NIOCHEM*, Kharkiv, 1981, Vol. 56, pp. 64–76.
 - Negadajlov A. A., Negadajlov P. A., Shaporev V. P. Optimizaczija raspredeleniya kuskovogo materiala po diametru shakhtnoj pechi s czel'yu umen'sheniya vredny'kh vy'brosov v atmosfery'j vozdukh ot izvestnyakovogo proizvodstva [Optimization of the distribution of lumpy material along the diameter of the shaft furnace in order to reduce harmful emissions into the atmospheric air from limestone production]. *Ekologi'chna bezpeka*, 2013, no. 2, pp. 97–102.
 - Pitak I. V., Shaporev P. V., Shestopalov A. V., Shaporev V. P. Sovershenstvovanie proizvodstva izvestii v shakhtny'kh pechakh [Improvement of lime production in shaft kilns]. *Tekhnologicheskij audit i rezervy' proizvodstva*, 2014, no. 6 (1), pp. 59–63.
 - Izmalkova T. V. Sovremennyye sposoby' i metody' optimizaczii granulometriceskogo sostava czementno-mineral'ny'kh smesej [Modern methods and methods for optimizing the granulometric composition of cement-mineral mixtures]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molody'kh ucheny'kh BGTU im. V.G. Shukhova*. 2016, pp. 1188–1192.

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: Valenty.Vytiahanets@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: Valenty.Vytiahanets@mit.khpi.edu.ua

Шаповров Валерій Павлович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1652-4688, e-mail: Valerii.Shaporev@khpi.edu.ua

Valeriy Shaporev – Doctor of Technical Sciences, professor, National Polytechnic University "Kharkiv Polytechnic Institute", the head of Chemical engineering and industrial ecology Department of, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1652-4688, e-mail: Valerii.Shaporev@khpi.edu.ua

Пітак Інна Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічна техніка та промислова екологія, 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

Баранова Антоніна Олегівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ст. викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Antonina Baranova – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Витяганець В. С., Шаповров 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.

Please cite this article as:

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, no. 2 (8), pp. 96-100, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.14.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Витяганец В., Шаповров В., Пітак І., Баранова А. Конструктивное оформление и особенности процессов в обжиговых шахтных печах с использованием газообразного топлива. *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 96-100. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.14.

АНОТАЦІЯ В статтю проаналізовані шахтні печі для виробництва извести. По способу обжигу шахтні печі бувають пересипні, полугазові, на газообразному і рідкому паливі. Установлені недоліки роботи основних сучасних печей при обжигу извести. Основними агрегатами для многотоннажного виробництва извести являються шахтні известково-обжигальні печі, в яких в якості палива використовуються доменний кокс або антрацит, або сортові углі. Як правило, товщі види палива застосовують в виробництвах, де поряд в технологічному циклі використовується вуглекислий газ, який міститься в топочних газах з концентрацією 36–40% мас. Дані по експлуатації шести печей на території України на підприємствах показали, що основне поширення отримали газові шахтні печі циліндричного і циліндрогоподібного типу з прямим профілем футеровки продуктивністю від 100 до 250 т/сутки, діаметром шахти від 3,2 до 5,4 м і висотою 6–8 діаметрів печі. Найчастіше на них використовують системи опалення з центральною і двома рядами периферійних інжекційних горелок без висова. Найбільш відповідальною частиною всіх печей є розподіл швидкостей газового потоку по сеченню шахти печі і глибина радіального проникнення газового потоку в шар матеріалу. Розрахунки τ_1 і τ_2 проводились таким чином: для τ_1 вибирали інтервал температур середою від 1300 до 250–300 °С, τ_{ox} – вибирали інтервал температур для матеріалу від 1000 до 100 °С і враховувалась щільність продукту при ступені розкладання известняка 98% (=1700 кг/м³). В зоні підогреву лімітуючою стадією являється підвод тепла від газу до кускового матеріалу і при цьому "а" можна прийняти рівним $Q = 400-450$ кДж/(м²·ч·К) і τ_1 оцінюється 0,8÷1 година. Загальне час перебування матеріалу в печі (зоні підогреву і зоні обжигу) оцінюється 1,4÷1,5 година, середня швидкість переміщення матеріалу в циліндричній частині печі оцінюється як 0,004 м/с, що дозволяє вважати фільтруючий шар умовно нерухомим. Вказані характеристики впливають на якість известняка і рівномірність обжигу известняка, що і являлось основою конструктивного оформлення обжигових печей шахтних з використанням газообразного палива.

Ключові слова: шахтна печ; известь; виробництво извести; обжиг известняка; газовий потік

Надійшла (received) 01.05.2021