

С.М. Форись, С.С. Федоров, В.Я. Перерва, А.Ю. Усенко

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШАХТНОЇ ВАПНЯНО-ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ

Анотація. Розроблено та реалізовано на ЕОМ математичну модель шахтної протитокової вапняно-випалювальної печі з центральним та периферійним підведенням природного газу. В моделі враховані рух газів у щільному шарі кускового матеріалу, конвективне та дифузійне перенесення речовини, горіння палива, зовнішній та внутрішній теплообмін. Розроблено енергоефективні режими роботи шахтної протитокової вапняно-випалювальної печі, що забезпечують зниження питомої витрати природного газу на 20 ч 25 % при заданих значеннях якості готового продукту та продуктивності агрегату. Розроблено режими опалення шахтної протитокової вапняно-випалювальної печі сумішшю природного та доменного газів. Очікувана економія природного газу при цьому становить близько 30 %.

Ключові слова: вапно, шахтна піч, паливо, теплові режими, математична модель, щільний шар.

Постановка проблеми. На фоні зростання вартості природного газу на внутрішньому ринку України, важливим є його ефективне використання в найбільш енергоємних галузях промисловості. Одними з великих споживачів природного газу є шахтні протитокові вапняно-випалювальні печі, в яких виробляють близько 30 % вапна.

Основними недоліками їхньої роботи є значний хімічний недопал палива і нерівномірність випалу вапняку, які, у свою чергу, обумовлені незадовільним перемішуванням палива з окислювачем у щільному шарі кускового матеріалу. У результаті, фактичні показники питомої витрати природного газу на тонну вапна перевищують проектні на 20 ÷ 35 %. Таким чином, зниження споживання природного газу в цих агрегатах має велике практичне та економічне значення. Вирішення цієї задачі можливе за рахунок розробки та впровадження ефективних газодинамічних та теплових режимів роботи випалювальних печей.

© Форись С.М., Федоров С.С., Перерва В.Я., Усенко А.Ю., 2020

Для підприємств металургійної галузі перспективним є часткова заміна природного газу більш дешевими видами палива. Зокрема, переведення печей на комбіноване опалення природно-доменною сумішшю, що потребує розробки відповідних режимів та технічних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження роботи таких печей з метою їх удосконалювання ведуться науковими колективами (УДТУ-УПІ, НМетАУ) та закордонними компаніями «Merz» і «Polysius» [1-5]. Аналіз літературних джерел показав, що результати комплексних досліджень теплової роботи шахтних вапняно-випалювальних печей представлені малою кількістю робіт [2 - 5]. Основною причиною є складність теплофізичних процесів, що відбуваються у печах, вивчення яких вимагає проведення масштабних і витратних наукових експериментів.

Аналіз результатів досліджень робіт [1 - 6] та даних технічної експлуатації шахтних печей з центральним та периферійним підведенням палива показав, що основними недоліками цих агрегатів є високий хімічний недопал палива та нерівномірність випалу вапняку, які обумовлені незадовільним перемішуванням палива з окислювачем у шарі кускового матеріалу.

Перспективними заходами щодо підвищення ефективності використання природного газу в шахтних вапняно-випалювальних печах є розробка оптимальних режимів випалу, технічних рішень щодо комбінованого опалення природно-доменною сумішшю.

Мета та результати досліджень. Метою даної роботи є дослідження впливу режимних параметрів шахтної вапняно-випалювальної печі на основні показники її роботи. Ефективне рішення поставлених задач можливе в сполученні з математичним моделюванням роботи випалювальних агрегатів. Для досліджень була розроблена математична модель шахтної протитокової вапняно-випалювальної печі. Тестування її структурних частин було виконано по відношенню до відомих в літературі аналітичних рішень, розрахункових та експериментальних даних [7].

У зв'язку зі складністю теплообмінних та газодинамічних процесів система рівнянь, що описують роботу печі, була розділена на ряд

окремих сполучених задач. У загальній математичній постановці враховані задачі руху газів у щільному шарі, конвективного та дифузійного переносу речовини, горіння палива, зовнішнього і внутрішнього теплообміну.

Відповідно до конструктивних особливостей шахтних печей [1-3] для випалу вапняку прийнято, що профіль робочого простору має циліндричну форму. У моделі враховані підведення газів у пальники та основу печі, а також теплові втрати через теплову ізоляцію. Вважалося, що піч працює в сталому стані.

Постановка задачі руху газу в щільному шарі кускового матеріалу представлена диференціальним рівнянням потенційного руху в циліндричній системі координат:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi(r, h)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi(r, h)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \varphi(r, h)}{\partial h^2} = \frac{\Delta V_{\text{ист}}^*(r, h)}{dV}, \quad (1)$$

де $\varphi(r, h)$ – потенціал швидкості, м²/с; r – поточний радіус печі, м; h – поточна висота печі, м; $\Delta V_{\text{ист}}^*(r, h)$ – локальна зміна об'ємної витрати газу в елементарному об'ємі в результаті хімічних реакцій горіння палива та дисоціації вапняку, м³/с; $dV = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot dh$ – елементарний об'єм печі, м³.

Математичне формулювання задачі переносу речовини з урахуванням джерел маси записане у вигляді диференціального рівняння (2), що визначає розподіл концентрацій речовини в нестисливому потоці:

$$\bar{w}_r(r, h) \cdot \frac{\partial C(r, h)}{\partial r} + \bar{w}_h(r, h) \cdot \frac{\partial C(r, h)}{\partial h} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot D_r(r, h) \cdot \frac{\partial C(r, h)}{\partial r} \right) + G_c(r, h), \quad \text{с}^{-1} \quad (2)$$

де $\bar{w}_r(r, h)$ і $\bar{w}_h(r, h)$ – відповідно радіальна та вертикальна складові вектору швидкості фільтрації, нм/с; $C(r, h)$ – концентрація речовини, що дифундує в шарі, кг/кг; $D_r(r, h)$ – коефіцієнт радіальної турбулентної дифузії, м²/с; $G_c(r, h)$ – інтенсивність виділення (поглинання) речовини в одиниці об'єму шару внаслідок хімічних реакцій горіння палива та дисоціації вапняку, с⁻¹.

Кількість рівнянь виду (2) визначалася числом компонентів, що розглянуті у системі. Для умов роботи шахтних вапняно-випалювальних печей на газоподібному паливі були враховані дванадцять основних компонентів: метан CH₄, етан C₂H₆, пропан C₃H₈, бутан C₄H₁₀, пентан

C₅H₁₂, етилен C₂H₄, оксид вуглецю CO, водень H₂, диоксид вуглецю CO₂, водяна пара H₂O, кисень O₂ та азот N₂.

При постановці задачі горіння палива в щільному шарі були враховані відомі в літературі реакції неповного згорання та водяного газу [6].

Постановка задачі зовнішнього теплообміну в шарі представлена рівнянням (3) [7]:

$$c_r(t_r) \cdot \left[\bar{w}_h(r, h) \cdot \frac{\partial t_r(r, h)}{\partial h} + \bar{w}_r(r, h) \cdot \frac{\partial t_r(r, h)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot D_r(r, h) \cdot \frac{\partial t_r(r, h)}{\partial r} \right) \right] = q_v(r, h), \text{ Вт/м}^3, \quad (3)$$

де $c_r(t_r)$ – ізобарна об'ємна теплоємність теплоносія, Дж/(м³·К); $t_r(r, h)$ – температура газів, °С; $q_v(r, h)$ – закон розподілу потужності джерел (стоків) теплоти на основі рішення завдань горіння палива і дисоціації вапняку, Вт/м³.

При моделюванні нагрівання та дисоціації куску вапняку прийнята фронтальна модель, в якій враховані залежність теплофізичних властивостей матеріалу від температури та перегрівання зовнішніх шарів вапна відносно температури дисоціації. Внутрішні процеси теплообміну при цьому описані рівняннями (4)-(6):

- рівняння теплопровідності в ядрі вапняку ($r_k \in [0; r_\phi]$, $r \in [0; R_\Pi]$):

$$\rho_{\text{CaCO}_3} \cdot c_{\text{CaCO}_3}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r_k} \left(\lambda_{\text{CaCO}_3}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} \right) + \lambda_{\text{CaCO}_3}(t_m) \cdot \frac{2}{r_k} \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k}; \quad (4)$$

- рівняння теплопровідності в прошарку вапна ($r_k \in [r_\phi; R_k]$, $r \in [0; R_\Pi]$):

$$\rho_{\text{CaO}} \cdot c_{\text{CaO}}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r_k} \left(\lambda_{\text{CaO}}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} \right) + \lambda_{\text{CaO}}(t_m) \cdot \frac{2}{r_k} \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k}, \quad (5)$$

де ρ_{CaCO_3} , ρ_{CaO} – відповідно щільності вапняку та вапна, кг/м³; $c_{\text{CaCO}_3}(t_m)$, $c_{\text{CaO}}(t_m)$ – відповідно теплоємності вапняку та вапна, Дж/(кг·К); $\lambda_{\text{CaCO}_3}(t_m)$,

$\lambda_{\text{CaO}}(t_m)$ – відповідно коефіцієнти теплопровідності вапняку та вапна, Вт/(м·К); $t_m(r_k, \tau, r)$ – температура матеріалу, що є в загальному випадку функцією радіуса куска r_k , часу τ (що визначає положення куску по висоті печі) і поточного радіуса печі r , °С; $R_{\text{п}}$ – радіус печі, м; r_k – поточний радіус, м; $r_{\text{ф}}$ – радіус, що відповідає положенню фронту дисоціації, м; τ – поточний час, с;

- рівняння балансу теплоти на границі розділу фаз CaO-CaCO₃ :

$$-\lambda_{\text{CaO}}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} = -\lambda_{\text{CaCO}_3}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} + q_{\text{дис}} \cdot \rho_{\text{CaCO}_3} \cdot \frac{\partial r_{\text{ф}}}{\partial \tau} + \frac{\rho_{\text{CaCO}_3}}{\rho_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{CaCO}_3}} \cdot c_{\text{CO}_2}(t_{\text{дис}}) \cdot t_{\text{дис}} \cdot \frac{\partial r_{\text{ф}}}{\partial \tau}, \quad (6)$$

де $q_{\text{дис}}$ – тепловий ефект ендотермічної реакції дисоціації вапняку, Дж/кг; $t_{\text{дис}}$ – температура дисоціації вапняку, °С; μ_{CaCO_3} , μ_{CO_2} – відповідно мольні маси вапняку та диоксиду вуглецю, кг/кмоль; $c_{\text{CO}_2}(t_{\text{дис}})$ – ізобарна об'ємна теплоємність диоксиду вуглецю при температурі дисоціації, Дж/(м³·К).

Система кінцевих та диференціальних рівнянь (1)-(6) була доповнена граничними умовами. Її апроксимація виконана інтегро-інтерполяційним методом, а отримані в підсумку кінцево-різницеві рівняння реалізовані на ЕОМ. Розроблений програмний алгоритм рішення задачі передбачав послідовне обчислення кожного з розрахункових блоків (газодинаміки, масообміну, горіння, зовнішнього та внутрішнього теплообміну) окремо з наступними та багаторазовими ітераціями.

У результаті, це забезпечувало сполученість рішення. Критерієм збіжності й завершеності обчислень виступала похибка матеріального та теплового балансів печі. Задача вважалася вирішеною по досягненні значення її модулю <0,5 %.

Досліджено вплив режимних параметрів на показники роботи шахтної вапняно-випалювальної печі: структуру видаткових статей теплового балансу й ступінь випалу вапняку. В якості режимних параметрів розглянуто: витрата повітря, витрата рециркулята на центральний паль-

ник, витрата природного газу на піч, витрата вапняку, середній діаметр кусків вапняку [8-9].

На основі розрахунково-теоретичних досліджень встановлено, що на роботу печі впливають всі перераховані параметри керування. При цьому, основні зміни відбуваються у видаткових статтях теплового балансу: корисно використана теплота, що пішла на дисоціацію вапняку, втрати теплоти з хімічною неповнотою згоряння палива, втрати з фізичною теплотою газів, що йдуть.

Встановлені в ході досліджень зв'язки між режимними параметрами та показниками роботи будуть використані надалі для оптимізації режимів шахтних вапняно-випалювальних печей.

Для рішення задачі оптимізації була отримана регресійна енергетична характеристика печі, що виражає зв'язок витрати палива $B_{пр}$ із основними режимними параметрами роботи агрегату (витратою палива $B_{пр}^u$, повітря $V_{п}^u$ і рециркуляту V_p на центральний пальник, витратою повітря в основу печі $V_{п}$) і заданими технологічними показниками (добовим завантаженням печі вапняком G і ступенем випалу матеріалу σ):

$$\begin{aligned} B_{пр} = & -4442 - 0,781 \cdot B_{пр}^u + 0,344 \cdot V_{п} + 13,1 \cdot G + 5095,54 \cdot \sigma - 0,06 \cdot V_{п}^u + \\ & + 10^{-3} \cdot B_{пр}^{u^2} + 3 \cdot 10^{-5} \cdot V_p^2 - 6,15 \cdot 10^{-4} \cdot G \cdot V_{п} + 5,752 \cdot G \cdot \sigma - \\ & - 1,44 \cdot 10^{-4} \cdot B_{пр}^u \cdot V_p - 0,463 \cdot V_{п} \cdot \sigma + 1,94 \cdot 10^{-5} \cdot (V_{п} \cdot \sigma)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Коефіцієнт детермінації R^2 рівняння (7) склав 0,95. Значимість коефіцієнтів пропорційності була перевірена на основі відомих статистичних оцінок.

Отримана енергетична характеристика використана в якості оптимізаційної моделі, а як критерій оптимальності прийнята витрата природного газу $B_{пр}$. Рішення задачі оптимізації виконано методом Ньютона.

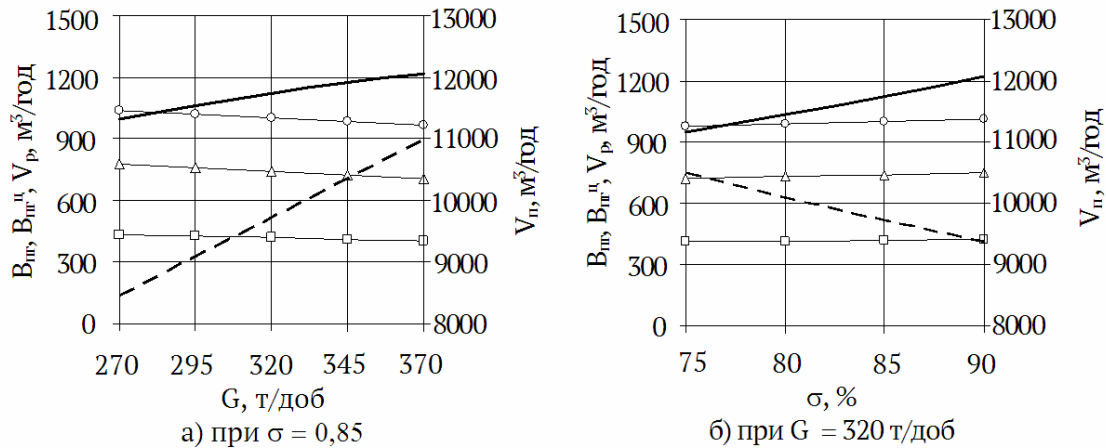


Рисунок 1 - Залежність оптимальних режимних параметрів роботи печі від завантаження вапняком та ступеню випалу матеріалу

- витрата природного газу на піч $V_{п}$
- - витрата повітря в основу печі $V_{п^ц}$
- витрата природного газу на центральний пальник $V_{п^ц}$
- △— витрата рециркуляту на центральний пальник $V_{р}$
- витрата повітря на центральний пальник $V_{п^ц}$

Деякі з отриманих результатів представлені на рис. 1-2.

З наведених даних виходить, що для печі цеху випалу вапняку у першу чергу необхідна організація оптимального режиму роботи центрального пальника. У дослідженому діапазоні $G = 270 \div 370$ т/доб і $\sigma = 75 \div 90$ % рекомендовані витрати газів на центральний пальник становлять: $V_{п^ц} = 410 \div 430$ $m^3/год$; $V_{р} = 730 \div 780$ $m^3/год$; $V_{п^ц} = 980 \div 1040$ $m^3/год$ (рис. 1-2).

Надалі, для забезпечення необхідної якості вапна σ залежно від завантаження печі G варто керувати витратами палива на периферійні пальники та повітря в основу печі.

Як видно з рис. 1, з ростом продуктивності печі при заданій якості вапна витрати палива і повітря на піч збільшуються. У той же час при збільшенні ступеня випалу, навпроти необхідно знижувати подачу повітря в основу печі при підвищенні витрати палива.

На рис. 2 показана зміна питомої витрати умовного палива на тону активного вапна в оптимальних режимах роботи печі.

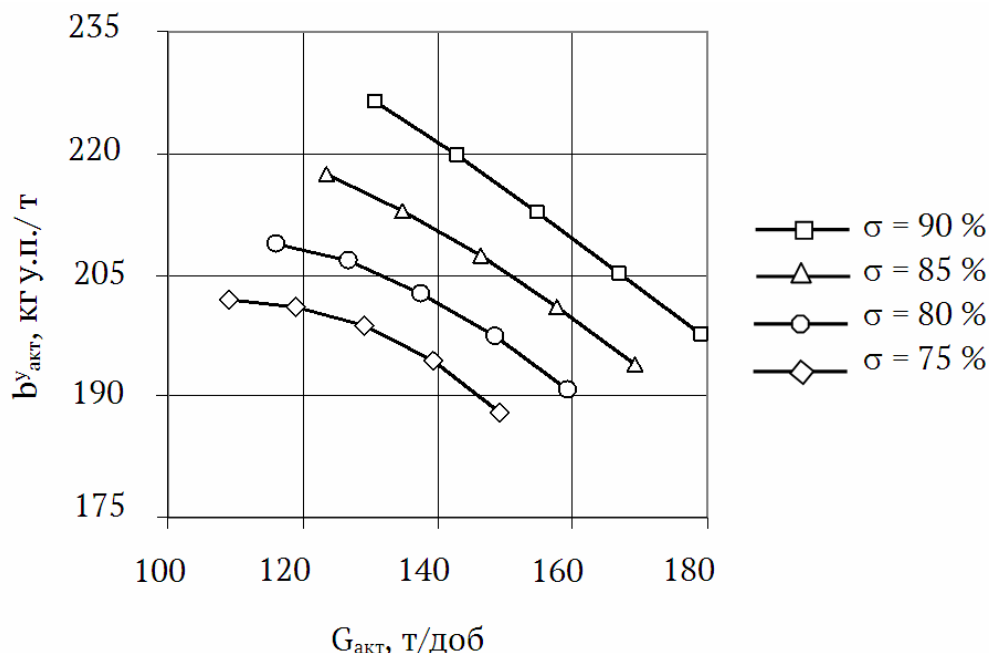


Рисунок 2 - Залежність питомої витрати умовного палива від продуктивності печі за активним вапном при оптимальних режимах роботи

Згідно із представленими даними, питома витрата палива на тону активного вапна тим менше, чим вище продуктивність печі і нижче вимоги до якості готового продукту

З аналізу отриманих результатів встановлено, що впровадження оптимального режиму забезпечить зниження питомої витрати палива на $20 \div 25\%$.

При дослідженні впливу доменного газу на роботу вапняно-випалю-вальної печі як технологічне обмеження по витраті доменного газу розглядалася пропускна здатність існуючих пальникових пристроїв. Відповідно до виконаних оцінок максимальна об'ємна частка доменного газу в природно-доменній суміші становить близько $\tau_{\text{дг}} = 0,8$. При цьому, теплота згоряння такої суміші дорівнює $9,4 \text{ МДж/м}^3$.

Відповідно до результатів досліджень збільшення витрати доменного газу на центральний пальник призводить до деякого погіршення роботи агрегату, що виражається в зниженні ступеня випалу вапняку. Подача доменного газу на периферійні пальники навпроти підвищує якість вапна. У підсумку, при переведенні печі на опалення природно-

доменною сумішшю в діапазоні значень теплоти згорання $9,4 \div 33,5$ МДж/м³ її основні інтегральні показники роботи (структура теплового балансу печі, а також якість випалу) практично не змінюються.

Даний висновок пояснюється, насамперед, тим, що шахтна піч не має розвиненого об'єму робочого простору як нагрівальні печі та котельні агрегати. У щільному шарі основне перенесення теплоти від газів до поверхні матеріалу здійснюється конвекцією. Тому при заміні природного газу низькокалорійним паливом ефект зниження температури продуктів згорання і падіння променистої складової тепловіддачі компенсується підвищенням швидкості газів та відповідним збільшенням коефіцієнту тепловіддачі конвекцією. Очікувана економія природного газу при переході на природно-доменну суміш із теплою згорання $9,4$ МДж/м³ становить близько 30 %.

Висновки. За результатами параметричного дослідження вапняно-випалювальної печі встановлено, що розподіл палива між пальниками, витрата повітря в основу печі, витрата первинного повітря і рециркуляту в центральний пальник, завантаження печі вапняком та діаметр кусків вапняку нелінійно впливають на видаткові статті теплового балансу печі та повинні враховуватися при розробці режимів роботи агрегату. При перерозподілі палива між пальниками та зміні витрати повітря в основу печі існують оптимальні режими, яким відповідає максимум корисно використаної теплоти. На основі узагальнення результатів досліджень отримано енергетичну характеристику шахтної протитокової вапняно-випалювальної печі, що визначає зв'язок витрати природного газу з розподілом палива, повітря і рециркуляту між центральною та периферійними пальниками в залежності від завантаження печі вапняком та якості вапна.

На основі розрахункових досліджень розроблено пропозиції щодо переведення печі випалу вапняку на опалення природно-доменною сумішшю з теплою згорання $9,4$ МДж/м³. Очікувана економія природного газу при цьому становить близько 30 %.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Федоров О. Г. Расчет газораспределения в плотном продуваемом слое при обжиге известняка в шахтных печах / О. Г. Федоров, В. Р. Журавский, Д. П. Нелюбина // Тезисы докладов республиканской конференции «Вопросы совершенствования тепловой работы и конструкций металлургических печей». – Днепропетровск. – 1981. – С. 9 – 10.
2. Мадисон В.В. Проблемы и пути повышения эффективности сжигания топлива в шахтных известковоробжиговых печах / Рязанов В.Т., Гордон Я.М. // Металлургическая теплотехника. – Днепропетровск: НМетАУ. – 2002. – Т.6. – С. 89 – 99.
3. Ляшенко Ю.П. Разработка и внедрение эффективных газодинамических и тепловых режимов шахтных печей для обжига известняка: Автореф. дис... канд.техн.наук: 05.14.04. – Днепропетровск, 1985, – 22 с.
4. Розенгарт Ю.И., Движение газов в шахтных известково-обжиговых печах / Федоров О.Г., Ляшенко Ю.П. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. – №6. – С.79-81.
5. Гордон Я. М. Механика движения материала и газов в шахтных печах / Я. М. Гордон., Е. В. Максимов, В. С. Швыдкий. – Алма-Ата, 1989. – 144 с.
6. Лисиенко В.Г., Щелков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание: В 3-х книгах. Книга 2/ Лисиенко В.Г., Щелков Я.М., Ладыгичев М.Г. – М.: Теплотехник, 2004. – 832 с.
7. Форись С. М. Математическое моделирование шахтных известково-обжиговых печей / С. М. Форись, С. С. Федоров, М. В. Губинский // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2008. – Т.2. – С. 98 – 104.
8. Форись С.Н. Разработка и реализация рациональных режимов работы шахтных известково-обжиговых печей / Форись С.Н., Федоров С.С., Федоров О.Г. // Металургійна теплотехніка. Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: «ПП Грек О.С.», 2007. – С.278-287.
9. Форись С. М. Результати дослідження теплової роботи шахтної вапняно-випалювальної печі на природному газі / С. М. Форись, С. С. Федоров, О. Г. Федоров // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: «Нова ідеологія», 2008. – С. 297 – 306.

REFERENCES

1. Fedorov O.G. Raschet gazoraspredeleniya v plotnom proizvodimom sloye pri obzhige v shakhtnykh pechakh / O. G. Fedorov, V. R. Zhuravskiy, D. P. Nelyubina // Tezisy dokladov respublikanskoy konferentsii «Voprosy sovershenstvovaniya teplovyoy raboty i konstruktsiy metallurgicheskikh pechey». - Dnepropetrovsk. - 1981. - S. 9 – 10
2. Madison V.V. Problemy i puti povysheniya effektivnosti szhiganiya topliva v shakhtnykh izvestkovorbzhigovykh pechakh / Ryazanov V.T., Gordon YA.M. // Metallurgicheskaya teplotekhnika. - Dneyepetrovsk: NMetAU. - 2002. - T.6. - S. 89 - 99.
3. Lyashenko Yu.P. Razrabotka i vnedreniye effektivnykh gazodinamicheskikh i teplovykh rezhimov shakhtnykh pechey dlya obzhiga izvestnyaka: Avtoref. dis... kand.tekhn.nauk: 05.14.04. - Dnepropetrovsk, 1985, - 22 s.
4. Rozengart YU.I., Dvizheniye gazov v shakhtnykh izvestkovo-obzhigovykh pechakh / Fedorov O.G., Lyashenko YU.P. i dr. // Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. - 1990. - №6. - S.79-81.
5. Gordon YA. M. Mekhanika dvizheniya materiala i gaza v shakhtnykh pechakh M. Gordon., Ye. V. Maksimov, V. S. Shvydkiy. -Alma-Ata,1989.-144 s.
6. Lisiyenko V.G., Shchelkov YA.M., Ladygichev M.G. Toplivo. Spravochnoye izdaniye: V 3-kh knigakh. Kniga 2 Lisiyenko V.G., Shchelkov YA.M., Ladygichev M.G. - M. : Teplotekhnika, 2004. - 832 s.
7. Foris' S. M. Matematicheskoye modelirovaniye shakhtnykh izvestkovo-obzhigovykh pechey / S. M. Foris', S. S. Fedorov, M. V. Gubinskiy // Sistemní tekhnologíí. Regionalíy mízhvuzívs'kiy zбірnik naukovikh prats'. - 2008. - T.2. - S. 98 – 104
8. Foris' S.N. Razrabotka i realizatsiya ratsional'nykh rezhimov ra-boty shakhtnykh izvestkovo-obzhigovykh pechey / Foris' S.N., Fedorov S.S., Fedorov O.G. // Metalurgíyna teplotekhníka. Nauchno-issledovatel'skiy institut natsional'noy metallurgii Ukrainy. - Dnepropetrovs'k: «PP Grek O.S.», 2007. - S.278-287.
9. Foris' S.M. Rezul'tatom dosrochnoy razrabotki teplovykh robotov i shakhtnykh vap-nyano-vipalyuval'nykh pechakh na prirodnom gaze / S. M. Foris', S. S. Fedorov, O. G. Fedorov // Metallurgicheskaya teplotekhnika: nauchnaya nauka o natsional'noy metallurgii Ukrainy. - Dnepropetrovsk: «Nova ideologiya», 2008. - S. 297 - 306.

Received 21.02.2020.
Accepted 125.02.2020.

Моделирование рабочих режимов с целью повышения эффективности шахтной известково-обжиговой печи

Разработана и реализована на ЭВМ математическая модель шахтной противоточной известково-обжиговой печи с центральным и периферийным подводом природного газа. В модели учтены движение газов в плотном слое кускового материала, конвективный и диффузионный перенос вещества, горение топлива, внешний и внутренний теплообмен.

Разработаны энергоэффективные режимы работы шахтной противоточной известково-обжиговой печи, обеспечивающие снижение удельного расхода природного газа на 20 ч 25 % при заданных значениях качества готового продукта и производительности агрегата. Разработаны режимы отопления шахтной противоточной известково-обжиговой печи смесью природного и доменного газов. Ожидаемая экономия природного газа при этом составляет около 30 %.

Simulation operating modes for enhancing the efficiency of a shaft limestone kiln

Analysis of performance by various shaft lime stone kilns with distributed central and peripheral gas fuel supply, applied in metallurgical industry, shows that the major disadvantages of these units are caused by poor gas mixing conditions and incomplete burning of fuel. To avoid over burning the lime due to the high heat capacity of natural gas, primary fuel for these furnace, the mixing and combustion must occur directly in the moving packed bed of material. That results in low quality of end product.

However, the way this problem can be partially resolved is the development and optimization of justified and efficient operating modes based on advanced technical solutions for gas fuel mixtures. To reduce fossil fuel consumption, one of the possible solutions for metallurgical plants is application of waste combustible gases like blast furnace gas combined with optimal fuel and air distribution between all levels of kiln burners.

For this purpose, the mathematical model of a shaft counter flow lime-stone kiln with central and peripheral natural gas supply was developed. The model took into account gas dynamics in the moving bed of lime-stone material, convection, fuel combustion, external and internal heat transfer.

To reduce the consumption rate of natural gas in lime stone calcining, the optimization of operating modes was conducted. as working conditions there were examined fuel, air and recycling gas distribution between central and peripheral burners.

As a result, the efficient operating conditions of the kiln were determined. In average, the reduction of natural gas consumption rate comprised 20 ч 25 % with enhanced performance of the whole unit, in terms of product quality and productivity.

According to the obtained results, switching the kiln to firing with mixtures of natural and blast furnace gases can lead to economy of natural gas by 30%.

Форись Светлана Николаевна – доц., к.т.н., Национальная металлургическая академия Украины.

Федоров Сергей Сергеевич – проф., д.т.н., Национальная металлургическая академия Украины.

Перерва Валерия Яковлевна – доц., к.т.н., Национальная металлургическая академия Украины.

Усенко Андрей Юрьевич - доц., к.т.н., Национальная металлургическая академия Украины.

Форись Світлана Миколаївна – доц., к.т.н., Національна металургійна академія України.

Федоров Сергій Сергійович – проф., д.т.н., Національна металургійна академія України.

Перерва Валерія Яківна – доц., к.т.н., Національна металургійна академія України.

Усенко Андрій Юрійович – доц., к.т.н., Національна металургійна академія України.

Foris Svitlana Mikolaivna – Associate Professor, PhD, National Metallurgical Academy of Ukraine.

Fedorov Serhii Serhiovich –Professor, DSc, National Metallurgical Academy of Ukraine

Pererva Valeria Yakivna – Associate Professor, PhD, National Metallurgical Academy of Ukraine.

Usenko Andrii Yuriyovich – Associate Professor, PhD, National Metallurgical Academy of Ukraine.