

Щербина В.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Швачко Д.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБЕРТОВИХ ТЕПЛОВИХ АГРЕГАТИВ

Наведено математичну модель для уточненого розрахунку технологічних параметрів обертових печей зональним методом. Досліджено можливості підвищення енергоефективності шляхом установаження шару теплоізоляції у футерівці. Виконано розрахунки теплової ефективності під час установаження додаткової теплоізоляції в різних енергетичних зонах обертової печі. Установлено, що збільшення теплового опору футерівки зменшує витрати теплоти в процесі виробництва на 9%.

Ключові слова: обертова піч, температура, теплоізоляція, газовий потік, футерівка.

Постановка проблеми. Раціональне використання енергоємних високотемпературних агрегатів, обертових печей сьогодні є однією із найважливіших проблем у питаннях розвитку та вдосконалення технологій на підприємствах металургійної, хімічної, будівельної, целюлозно-паперової та інших галузей промисловості. У промисловості будівельних матеріалів обертові печі отримали найбільш широке розповсюдження [1, с. 11; 2, с. 5, 4, с. 36], де є основними установками для виробництва вапна, перліту, керамзиту, цементного клінкеру та інших матеріалів. При цьому вони є значним споживачем палива, де проблема високої енергоємності обладнання посилюється низьким рівнем корисного використання енергетичних ресурсів. Так, тепловий ККД обертових печей для виробництві будівельних матеріалів, зазвичай не перевищує 55–60%. Тому підвищення енергоефективності даних машин є вкрай актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що енергоефективність обертових печей залежить від раціональних витрат палива [1; 2; 3; 4]. При цьому величина його використання головним чином визначається повнотою згорання і величиною теплової енергії не використаної в робочому просторі печі. Указані показники характеризуються головним чином тепловмістом або температурою газів, що відходять і тепловими втратами через корпус – футерівку печі в навколишнє середовище.

Постановка завдання. Існує декілька способів, спрямованих на підвищення ефективності використання обертових печей:

– збільшення повноти згорання палива за рахунок більш раціональних режимів і вибір оптимального положення і напрямку пальників [1, с. 18; 3, с. 290, с. 342; 4, с. 279];

– зменшення тепловтрат із газами, що відходять, за рахунок поліпшення теплообміну між пічними газами й оброблюваним матеріалом за допомогою встановлення різноманітного роду теплообмінників [7, с. 26];

– зменшення витрат тепла через корпус печі за рахунок збільшення теплового опору футерівки [5, с. 58; 6, с. 23].

Одним із перспективних напрямів на шляху до інтенсифікації роботи печі є зменшення втрат тепла в навколишнє середовище через корпус, за рахунок установаження додаткової теплоізоляції в футерівку. Так, наприклад, у цементних печах ці втрати сягають 20–35% від загальної теплоти згорання палива. Однак при цьому залишаються невирішеними питання того, наскільки ефективним буде встановлення додаткової теплоізоляції в різних енергетичних зонах печі.

Відомо, що максимум тепловтрат по корпусу припадає на високотемпературні зони. У вказаних зонах тепловтрати цементних печей досягають 40% від загальних втрат через корпус. При цьому температура зовнішньої поверхні становить 300°C, а при зношенні футерівки підвищується до 400°C, а в деяких випадках навіть досягають 550°C. При цьому навіть незначні тепловтрати суттєво впливають на загальну витрату тепла по обертової печі. Водночас зменшення тепловтрат через корпус не є гарантією ефективного використання тепла для

оброблення матеріалу. Зрозуміло, що частина вказаного тепла перейде в газовий потік, тобто для підвищення температури газу, що виходить із печі.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для дослідницьких і проектних робіт обертових цементних печей широко застосовується метод зонального розрахунку [3, с. 390, 4, с. 187]. Він використовується для визначення низки характерних параметрів: питомі витрати тепла, розміри, кількість сировинних матеріалів та інші. Піч умовно поділяється на 8 енергетичних зон. Далі по тексту: 1 – охолодження; 2 – спікання; 3 – екзотермічних реакцій; 4 – декарбонізації (кальцинування); 5 – дегідратації; 6 – сушіння; 7 – випаровування; 8 – підігріву. Однак температура газів, що відходять, та втрати тепла через корпус печі, вводиться в розрахунок як експериментально визначені незмінні параметри. Указане не дає змоги повністю визначити теплову ефективність та враховувати вплив зменшення товщини футерівки при її зносі, що відбувається під час роботи теплового агрегату. Тим більше не дозволяє встановити вплив додаткової теплоізоляції встановленої в окремих енергетичних зонах. Таким чином, зональний метод розрахунку потребує доповнень низкою залежностей, котрі враховують указані параметри.

Розглянемо рівняння теплового балансу для обертової печі. Невідомі величини позначені курсивом.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3(t_{omx}^r) + Q_4 + Q_5 + Q_6(t_{omx}^r) + Q_7 \quad (1)$$

де Q – надходження теплоти; Q_1 – тепловий ефект клинкероутворення; Q_2 – теплота на випаровування води; $Q_3(t_{omx}^r)$ – втрати з газами, що відходять; Q_4 – втрати з клинкером; Q_5 – з повітрям яке виходить з холодильника; $Q_6(t_{omx}^r)$ – втрати теплоти з виносом; Q_7 – втрати в навколишнє середовище через корпус; t_{omx}^r – температура газів, що відходять із печі.

Надходження теплоти в (1) визначається по залежностям:

$$Q = Q_{низ}^p \cdot \frac{R_s}{\Pi_p} + \frac{R_s}{\Pi_p} \cdot c_{пл} t_{пл} + (G_C c_C + G_W^M) t_M + \frac{R_s}{\Pi_p} \cdot V_{пв} c_{пв} t_{пв} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{Q_{низ}^p}{\Pi_p} = \frac{\sum_{i=1}^I (G_i^M + P_i^M)}{X} \\ F_n = \left(\frac{X}{0.124} \right)^3 \cdot \frac{Q_{низ}^p \cdot R_s}{\sigma \cdot T_{теор}^4} \\ X = \left[0.43 \cdot \left(\frac{F_n}{D_n} \right)^{0.1} + \sqrt{\frac{Q_{низ}^p \cdot R_s}{\sigma \cdot T_{теор}^4} \cdot F_n} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot T_{теор}^2}{E_r^{0.1}}} \right] \\ \dot{E}_r = \frac{V_s \cdot \Pi_p \cdot 1000}{3600 \cdot 0.785 \cdot D_n^2 \cdot (1 - F_n)} \cdot \frac{T_i^2}{273} \end{cases} \quad (3)$$

де Π_p – продуктивність печі, D_n – діаметр печі, ω_r – швидкість продуктів згорання; F_n – поверхня загального теплообміну; η – ступінь тепловикористання; R_s – витрати палива; P_i – втрати тепла в навколишнє середовище відносно зон та інші, що визначаються з матеріального балансу або розрахунку горіння палива.

Затрати теплоти на клинкероутворення Q_1 , витрати на випаровування води Q_2 , витрати з клинкером Q_4 , повітрям, що виходить із холодильника Q_5 визначається по відомим залежностям [3; 4].

По зональному методу розрахунку ентальпії газового потоку на виході з обертового теплового агрегату визначається із співвідношення:

$$Q_3 = q_0^r + \frac{Q_{низ}^p \cdot R_s}{\Pi_p} - \sum_{i=1}^I (G_i^M - P_i^M) \quad (4)$$

тобто значення Q_3 залежить від витрати палива. Крім того, температуру газів, що відходять із печі ($t_{отх}$), можливо визначити, використовуючи метод підбору за такою залежністю:

$$Q_3 = \left[V_{H_2O}^r \cdot \frac{R_s}{\Pi_p} + V_{H_2O}^M \right] \cdot C_{H_2O}(t) + \left[V_{CO_2}^r \cdot \frac{R_s}{\Pi_p} + V_{CO_2}^M \right] \cdot C_{CO_2}(t) + V_{O_2}^r \cdot \frac{R_s}{\Pi_p} \cdot C_{O_2}(t) + V_{N_2}^r \cdot \frac{R_s}{\Pi_p} \cdot C_{N_2}(t) \cdot t_{отх} \quad (5)$$

Втрати теплоти при виносі пилу визначаються по формулі:

$$Q_6 = G_{пл}^{без} \cdot t_{отх}^r + (G_M^C - G_{пл}^{без}) \cdot C_{пл} \cdot (t_{отх}^r - t_{пл}) \quad (6)$$

Втрати тепла в навколишнє середовище через корпус, виходячи з теплового балансу складають [1, с. 83; 2, с. 135; 4, с. 204; 7, с. 28]:

$$Q_7 = Q - [Q_1 + Q_2 + Q_3(t_{отх}^r) + Q_4 + Q_5 + Q_6(t_{отх}^r)] \quad (7)$$

З іншого боку, втрати в навколишнє середовище через корпус можливо визначити відносно втрат по енергетичним зонам:

$$Q_j = \sum_{i=1}^I P_i = \frac{2\pi r}{\Pi_p} \sum_{i=1}^I \frac{T_{K1i} - T_{K2i}}{R_i} \cdot L_i; \quad R_i = \frac{\delta_{1i}}{\lambda_{1i}} + \frac{\delta_{2i}}{\lambda_{2i}(T_{K2i})} \quad (8)$$

$$\begin{cases} T_{K1i} = T_{K2i} \cdot [1 + R_i \cdot (3.5 + 0.062 \cdot T_{K2i})] \\ T_{K2i} = \frac{K_i \cdot (T_i^r - T_{K1i}) + C_b \cdot \left[\left(\frac{T_i^r + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{K1i} + 273}{100} \right)^4 \right]}{3.5 + 0.062 \cdot T_{K2i}} \\ C_b = \frac{5.68 \cdot K_b \cdot \varepsilon_w}{1 - (1 - \varepsilon_w) \cdot (1 - F_n)}, \quad K_i = \frac{0.418 \cdot \lambda_{ji}}{D_n} \cdot \left(\frac{\dot{E}_r - D_n}{v_r} \right)^{0.67} \quad i = 1 \dots 8 \end{cases} \quad (9)$$

де T_i^r – температури газу на границях зон; T_{K1i}, T_{K2i} – температура внутрішньої та зовнішньої поверхні футерівки по зонам; R_i – тепловий опір корпусу печі по зонам; δ_{ji} – товщина складників по корпусу (j) відносно енергетичних зон (i); λ_{ji} – теплопровідність складових по корпусу (j) відносно енергетичних зон (i).

Під час визначення температури газового потоку на межах зон використовуються відомі

рівняння зональних методів щодо технологічного методу, який досліджується [3, с. 390, 4, с. 187].

Практично завжди під час моделювання теплообміну в обертових печах, поле температур визначається через відомі потоки тепла. При цьому зональні рівняння теплового балансу будуть нелінійними відносно невідомих температур.

Таким чином, отримуємо замкнуту систему нелінійних рівнянь, у якій невідомі виділені курсивом. До них належать такі: витрата робочого палива R_s , температура газів $t_{отхг}$, що виходять із печі, температури $T_1 \dots, T_j$, позонні втрати тепла в навколишнє середовище P_i , та інші.

Отримана система нелінійних рівнянь вирішується ітераційним методом Ньютона. Температура на «гарячій» ($T_{к1г}$) та «холодній» ($T_{к2г}$) поверхнях футерівки визначається з підсистеми нелінійних рівнянь, які вирішуються методом дотичних. При цьому температура по межах зон T_i^{f1} визначається по відомих із зонального методу розрахунку співвідношеннях. Урахування значень теплового опору (R) в різних зонах печі дає можливість моделювати різну величину зносу вогнетриву та можливість встановлення теплоізоляційного шару футерівки.

Під час тестування математичної моделі було встановлено, що максимальна розбіжність у даних, отриманих у результаті чисельного експерименту та розрахунках приведених в [3, с. 390], не перевищує 8% по температурі газів, що відходять, і 10% щодо витрати палива.

Розрахунки проводились для обертової печі з виробництва цементу розміром 5x185 м, продуктивність 75 т/год. Для порівняння використовувалась базові вогнетриви футерівки енергетичних зон та вогнетриви з шаром додаткової теплоізоляції. Теплоізоляція виконана мулітокнеземною ватою з товщиною внутрішнього шару 50 мм щодо довжини вогнетриву.

Додаткова теплоізоляція моделюється ділянками заданої довжини в довільних зонах обертової печі. Витрати палива залишаються незмінними, тобто такі, як для базового варіанту. Результати залежності зміни продуктивності від зони, в яку укладається додаткова теплоізоляція, наведено на графіках рис. 1.

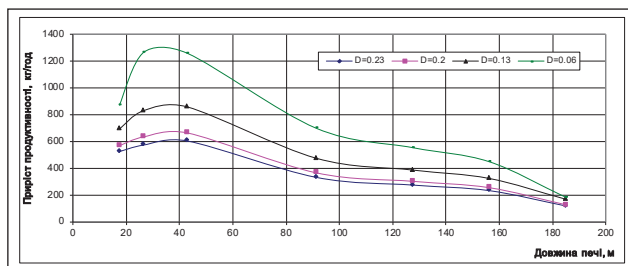


Рис. 1. Зміна продуктивності по енергетичних зонах

Розрахунок проводився для різного ступеню зношеності футерівки (товщини 0.23м, 0.2м, 0.13м, 0.06м). Як видно з графіка найбільший ефект дає встановлення додаткової теплоізоляції у високотемпературних зонах. Так, за стандартної футерівки і встановлення теплоізоляції в зоні максимальних температур (3–4), приріст продуктивності сягає 600 кг/год., а при зношеній – підвищується до 1300 кг/год. Це пов'язане зі збільшенням теплових втрат у навколишнє середовище при цьому режимі та збільшенням витрат палива і тепла на обпалювання матеріалу.

Якщо в зоні встановлюється додаткова теплоізоляція, то це зменшує теплові втрати в навколишнє середовище через корпус. Завдяки цьому можливе збільшення продуктивності.

На рис. 2 представлено залежності зміни продуктивності додаткової теплоізоляції від ступеня зношеності футерівки в різних зонах обертової печі.

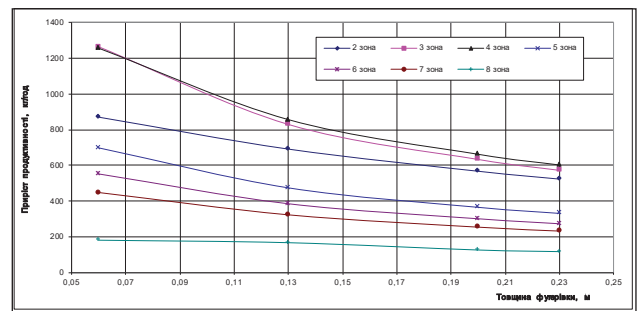
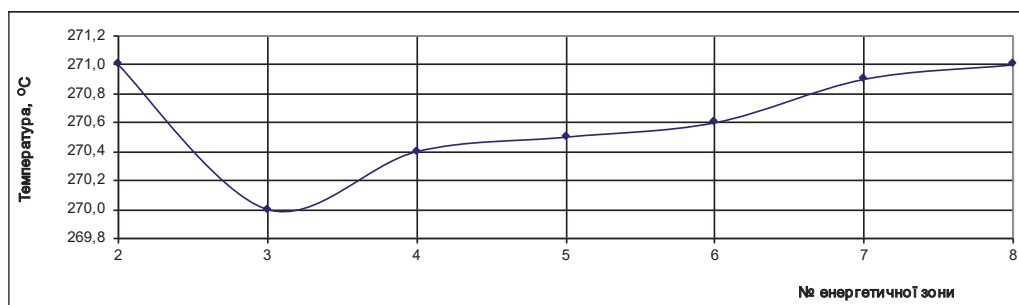


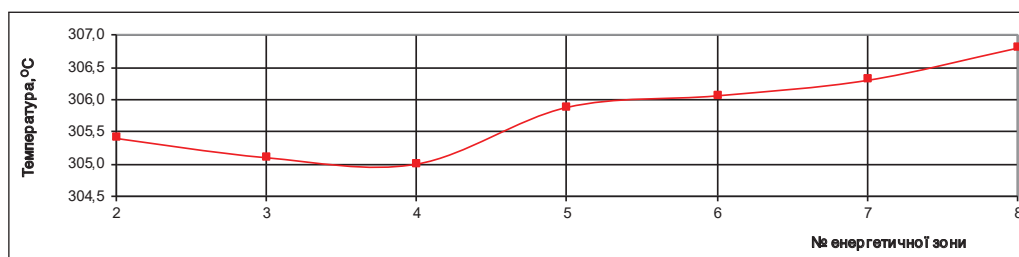
Рис. 2. Зміна продуктивності при зношенні футерівки

Із графіків видно, що під час установлення додаткової теплоізоляції в більш «холодних» зонах обертової печі приріст продуктивності буде зменшуватись. Під час використання теплоізоляції в 8-ій зоні максимальне значення приросту продуктивності буде 185 кг/год. за найбільшого зношення футерівки. Різниця приросту між футерівкою різного ступеню зношеності у цьому разі буде становити 70 кг/год.

Слід зазначити, що тепло, отримане за рахунок встановленої теплоізоляції, не може повністю використовуватись для оброблення матеріалу чи економії палива. Частково воно буде виходити з печі, підвищуючи температури газу, що відходить. На рис. 3 наведено дані розрахунку, які показують вплив додаткової теплоізоляції на температуру газів, що відходять за різного зношення футерівки. На осі ординат вказані температури, на осі абсцис – номери енергетичних зон.



а) товщина футерівки 230 мм



б) товщина футерівки 60 мм

Рис. 3. Температура газів, що відходять з печі

Виходячи з наведених графіків, можна зробити висновок, що під час використання теплоізоляції найменша температура газового потоку, що відходить з печі, буде досягнута тоді, коли додаткова теплоізоляція знаходиться у високотемпературних зонах. Якщо ж вона встановлена в «холодних» зонах, то температура газового потоку має майже такі значення, як для обертової печі без додаткової теплоізоляції.

Виходячи з наведених графіків, можна зробити висновок, що під час установлення додаткової теплоізоляції у високотемпературних зонах температура газового потоку, що виходить із печі, буде мінімальною. У разі встановлення в низькотемпературних зонах температура газового потоку збільшується і частина тепла відходить із газом. Тобто ефект економії палива або підвищення продуктивності майже не спостерігається. Останнє пояснюється підтриманням у високотемпературній зоні нормального теплового режиму, який вимагає для підвищення продуктивності за умов зменшення термоопору футерівки збільшення витрат палива. За рахунок цього на виході з зони ентальпія газового потоку збільшується, проте додатково отримане тепло у підготовчих зонах використовується вкрай не ефективно.

Висновки. Під час дослідження ефективності використання печі з додатковою теплоізоляцією було встановлено, що її використання в зоні випалювання дає можливість зменшити

втрати тепла до 4–6%. При цьому збільшується продуктивність печі, а економія палива при незмінній продуктивності може складати до 2 тис. тон умовного палива. Загалом, застосування у високотемпературних зонах додаткової теплоізоляції збільшує ефективність використання печі до 9%.

Приріст тепла, що спостерігається по печі, пояснюється більш повним використанням палива, чим досягається зменшення його ентальпії в підготовчих зонах. За рахунок цього температура газів, що відходять із печі, зменшується, а коефіцієнт використання палива збільшується.

Таким чином, проведений аналіз дає можливість визначити вплив додаткової теплоізоляції на тепловий процес у печі. У результаті його можна зробити висновок, що збільшення теплоопору футерівки, покладеної в зонах високих температур, дозволяє підвищити ефективність теплового використання обертової печі. Причому суттєвою перевагою вказаного методу є той фактор, що збільшення продуктивності печі не вимагає підвищення температури і збільшення ентальпії продуктів горіння.

У подальшому планується дослідження механізму встановлення теплоізоляційного шару у вогнетриві футерівки, визначення оптимальної теплової ефективності та напружено-деформованого стану для виключення можливостей руйнування.

Список літератури:

1. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справочное издание: в 2 кн. / под ред. В.Г. Лисиенко. Москва: Теплотехник, 2004. Кн.1. 688 с.
2. Таймасов Б.Т. Технология производства портландцемента: учеб. пособие. Шымкент, Изд-во ЮКГУ, 2003. 297 с.
3. Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности: 2-е изд., доп. и перераб. Ленинград. Стройиздат. [Ленингр. отд-ние], 1968. 456 с.: ил.
4. Щербина В.Ю. Розвиток теорії та удосконалення технологічних процесів при виробництві будівельних матеріалів у високотемпературних агрегатах: дисертація ... доктора технічних наук: 05.17.08. Київ, 2017. 398 с.
5. Сахаров О.С., Щербина В.Ю., Чжан Юлінь(), Бобах В.В. Моделирование влияния формы огнеупора на тепловую эффективность футеровки вращающейся печи. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009. № 4/10(40). С. 58–65.
6. Шариков Ю.В., Маркус А.А. Математическое моделирование тепловых полей во фрагменте футеровки вращающейся печи. Москва: Металлург, 2013. № 12. 25 с.
7. Щербина В.Ю., Сахаров О.С., Самиленко Ю.В., Бобах В.В. Дослідження термомеханічних навантажень в обертовій печі з вихровим теплообмінником. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2009. № 6. С. 26–33.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

Приведенная математическая модель для уточненного расчета технологических параметров вращающихся печей зональным методом. Исследованы возможности повышения энергоэффективности путем установления слоя теплоизоляции в футеровке. Выполнены расчеты тепловой эффективности при установке дополнительной теплоизоляции в различных энергетических зонах вращающейся печи. Установлено, что увеличение теплового сопротивления футеровки уменьшает расход теплоты в процессе производства на 9%.

Ключевые слова: вращающаяся печь, температура, теплоизоляция, газовый поток, футеровка.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF ROTARY HEAT GENERATORS

The given mathematical model for the specified calculation of technological parameters of rotary kilns by the zonal method. The possibilities of increasing energy efficiency by establishing a layer of thermal insulation in the lining are investigated. Performed calculations of thermal efficiency when installed additional thermal insulation in different energy zones of the rotary kiln. It was established that increasing the thermal resistance of the lining reduces heat consumption in the production process by 9%.

Key words: rotary furnace, temperature, thermal insulation, gas flow, lining.