

Радченко Ю.М., Гупало О.В., Єрьомін О.О., Грес Л.П., Штацький М.О.

Реконструкція камерної печі періодичної дії

Radchenko Yu.M., Gupalo O.V., Yeromin O.O., Gres L.P., Shtatskyi M.O.

Reconstruction of a chamber furnace

Мета. В роботі розглянуто питання реконструкції камерної печі періодичної дії з метою підвищення енергоефективності агрегату. **Методика.** Печі, що розглядається в роботі, працює при постійній температурі в робочій камері, опалюється природним газом та має номінальну продуктивність 100 кг/год. За проектом стіни печі двошарові: вогнетривкий шар 120 мм виконано з шамоту класу Б; теплоізоляційний шар 60 мм – з діатомової цегли. Для дослідження температурних полів та втрат теплоти через футеровку при експлуатації печі авторами розроблено двовірну математичну модель теплопровідності через плоску стінку для нестационарного температурного стану. **Результати.** З використанням математичної моделі виконано чисельні розрахунки для печі базової конструкції та трьох варіантів реконструкції її футеровки. Реконструкція передбачає заміну цегляної футеровки печі на футеровку, виконану з мулітокремнеземистого волокна МКРВ-340, товщиною 180, 120 та 60 мм, відповідно до варіанту реконструкції, що розглядається. Визначено зміну теплових втрат та розподілу температур в футеровці, обчислено витрати палива та його вартість, що витрачаються на покриття теплових втрат, а також масу та вартість футеровки. **Наукова новизна** роботи полягає у виявленому взаємозв'язку між конструктивними та експлуатаційними показниками печі, а **практична значущість** роботи – в розроблених рекомендаціях щодо вибору раціональної товщини шару футеровки печі із мулітокремнеземистого волокна в залежності від очікуваного терміну експлуатації теплового агрегату.

Ключові слова: камерна печі, акумуляція теплоти, вогнетривка футеровка, економія палива.

Objective. The paper considers the issue of a chamber furnace reconstruction for improving of their energy efficiency.

Methods. The chamber furnace is heated by natural gas and operates at a constant temperature in its working chamber. The nominal capacity of the furnace is 100 kg/h. According to the design, the furnace walls are two-layered: the refractory layer made of chamotte (B class) is 120 mm, and the heat-insulating layer made of diatomite bricks is 60 mm. To study the temperature fields and heat losses through the lining during the operation of the furnace, the authors developed a two-dimensional mathematical model of heat conduction through a flat wall for an unsteady-state temperature condition.

Findings. Using the mathematical model, numerical calculations were performed for the furnace of the basic design. It was considered three variants of the furnace lining reconstruction. Three variants of the furnace lining reconstruction were considered, which involved replacing the furnace brick lining with a lining made of ceramic fibre (MKRV-340), whose thickness was 180, 120, and 60 mm according to the number of the reconstruction opinion. As the results of the calculation are the heat losses of lining and the temperature distribution in the lining were determined. That made possible to assess the fuel consumptions which covered heat losses and the fuel costs as well as the weight and cost of the lining. The **scientific novelty** of the work is in the revealed relationship between the design and operational parameters of the furnace, and the **practical value** of the work is in the developed recommendations for choosing a rational thickness of the furnace lining layer of the ceramic fibre, depending on the expected operation life of the furnace.

Keywords: chamber furnace, heat accumulation, refractory lining, fuel economy.

Вступ

Підвищення енергоефективності металургійного обладнання є одним з першочергових завдань промисловості України.

Зниження питомої витрати палива при нагріванні металу в промислових печах можливо завдяки [1]:

- оптимізації і раціоналізації режимів нагрівання матеріалів [2-8];

- підвищення ефективності роботи пристроїв, що утилізують теплоту продуктів згоряння [9];

- зниження теплових втрат з робочого простору печі [10, 11] та інші.

Важливими чинниками при реалізації тих чи інших заходів є якісні, економічні та екологічні показники роботи теплового агрегату: рівномірність та стандартність нагрівання [1], питомі викиди шкідливих речовин та парникових газів до атмосфери, економічний ефект, термін окупності і таке інше. Але вирішальним аргументом для модернізації печі

залишається економічна ефективність запропонованих рішень.

Завданням даної роботи є розробка раціональної конструкції кладки камерної печі для виробництва сталевих відводів з метою зменшення питомого споживання природного газу.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Нагрівальні печі, що широко використовуються в металургії та машинобудуванні України, є енергоємними агрегатами, що обумовлене їх універсальністю з погляду теплової обробки і сортаменту металу. Але вони часто працюють в рамках застарілих технологій і, як правило, фізично зношені.

Зниження загальних обсягів виробництва призвело до того, що підприємства працюють не на повну потужність, або їх робота підпорядковується замовленнями на певний сортамент і об'єм виробництва. В таких умовах робота печей стає циклічною, після деякого часу роботи з проектною

© Радченко Ю.М. – к.т.н., доц. УДУНТ
Гупало О.В. – к.т.н., доц. УДУНТ
Єрьомін О.О. – д.т.н., проф. УДУНТ
Грес Л.П. – к.т.н., доц. УДУНТ
Штацький М.О. – аспірант УДУНТ

© Radchenko Yu. – c.t.s., docent USUST
Gupalo O. – c.t.s., docent USUST
Yeromin O. – d.t.s., profssor, USUST
Gres L. – c.t.s., docent USUST
Shtatskyi M. – PhD student at USUST



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

продуктивністю печі переводять на «тихий хід», або ж зовсім зупиняють їх роботу. В таких умовах футеровка печей починає працювати в перехідних режимах, при яких спостерігаються як нагрів футеровки, так і її глибоке охолодження. При цьому, на акумуляцію теплоти футеровкою, витрачається значна частка енергії, від тієї яка виділилася в робочій камері печі від спалювання палива. В подальшому вона розсіюється в навколишнє середовище, що призводить до перевитрати палива на теплову обробку одиниці продукції та додаткового теплового забруднення довкілля.

Вихід з ситуації, що склалася, полягає в реконструкції виробництва, створення нових економічно ефективних і екологічно безпечних технологій.

Одним з ефективних способів скорочення енерговитрат в цих умовах є вдосконалення теплового огорожування печей на основі застосування сучасних вогнетривких матеріалів для футерування [1, 12 – 16].

Конструкція і робота печі. Установка для виготовлення сталевих відводів являє собою комбінований агрегат (піч-прес) для нагрівання трубних заготовок з наступною деформацією на оправці. Типовий зовнішній вигляд установки наведено на рисунку 1.

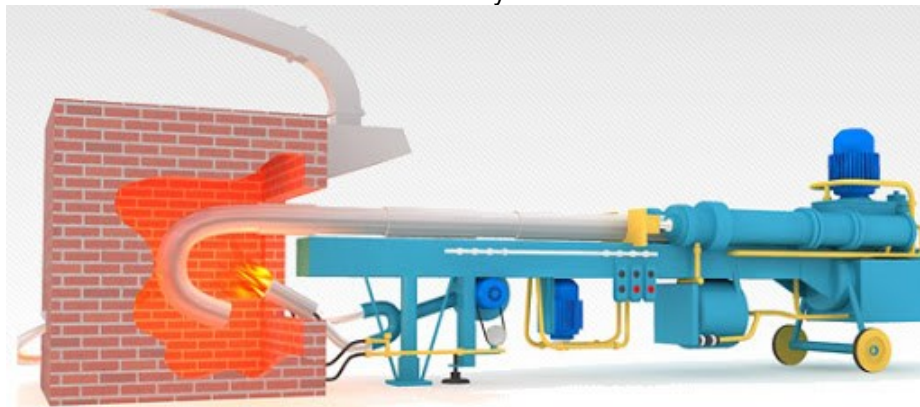


Рис. 1. Типова установка для виготовлення відводів.

Власне піч є прямокутною вогнетривкою камерою, викладеною з шамотної цегли, ізолюваною діатомовою цеглою. Трубні заготовки проштовхуються уздовж печі по штанзі, на кінці якої приварена спеціальна оправка у вигляді «рогу». Зусилля для проштовхування та деформації забезпечує спеціальний прес, який натискає на першу з трубок, що нанизані на штангу. Після деформації на оправці, готовий відвід крізь вікно видачі випадає з робочого простору печі, в той час, як наступна заготовка нанизується на штангу з боку пресу.

Піч працює в сталому тепловому режимі, тобто в робочому просторі підтримується постійна

температура, що забезпечує можливість проведення процесу деформації труби на оправці. Для виготовлення відводів з вуглецевої сталі ця температура складає 850 °С.

Піч опалюється природним газом, що спалюється в двохпроводному пальнику низького тиску, який розташований в торцевій стіні печі. Повітря для горіння палива подається за допомогою вентилятора. Видалення продуктів горіння з печі здійснюється через вікно посади, над яким розташований вентиляційний короб, з'єднаний із димовою трубою. Загальна характеристика печі наведена у таблиці 1.

Таблиця 1. Загальна характеристика печі.

Найменування	Од. вимір.	Показник
Довжина робочого простору	мм	1000
Ширина робочого простору	мм	400
Висота робочого простору	мм	1500
Паливо	природний газ	
Коефіцієнт використання палива	0,62	
Сортамент труб	мм	48,0...108,0×3,0...3,5
Температура труб при деформації	°С	850
Спосіб нагріву	відкритий нагрів продуктами згорання	
Тип опалювальних пристроїв	двохпроводний пальник	
Пристрій для підігрівання повітря	відсутній	
Максимальна продуктивність	кг/г	100,00

В сучасних умовах піч працює кожен день в одну зміну. Як впливає з досвіду експлуатації печі,

температура на внутрішній поверхні кладки досить швидко зростає до робочої (850 °С), а після

завершення роботи – піч охолоджується до наступного ранку природним шляхом.

Відомо, що кількість теплоти, яка акумулюється кладкою печі, визначається природою матеріалу, з якого вона побудована, його теплоємністю і товщиною.

У печі існуючої конструкції кладка виконана двошаровою. Для будівництва вогнетривкого шару використано шамотну цеглу класу Б, товщиною 120 мм, а для теплоізоляційного шару – діатомова цегла, товщиною 60 мм.

Шамот (марок ША, ШБ та ШВ) відноситься до алюмосилікатних вогнетривів, які містять окрім SiO_2 до 45% Al_2O_3 . Основною складовою шихти для виробництва шамотних вогнетривів є каолініт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [16]. Вогнетривкість шамотної цегли складає $T_{\text{огн}} = 1580 \dots 1750$ °С (не менше 1730 °С – ША, 1670 °С – ШБ, 1580 °С – ШВ). Температура початку деформації у шамоту низька (1170–1400 °С), проте, температурний інтервал між початком і кінцем деформації порівняно великий (200 °С і більше). Таким чином, гранична робоча температура складає $T_{\text{раб}} = 1200 \dots 1400$ °С. Термостійкість шамоту висока і залежить від складу і способу його виготовлення. При пластичному формуванні виробів вона складає 6 – 12 теплзмін, а при напівсухому пресуванні досягає 50 теплзмін.

Шамотні вироби, що містять кислий оксид SiO_2 і амфотерний Al_2O_3 , є напівкислими вогнетривами і при високих температурах піддаються руйнівній дії основних шлаків, у тому числі і окалини, при контакті з якими утворюється легкоплавкі з'єднання.

За наявності водню в атмосфері печі шамотні вироби руйнуються внаслідок взаємодії їх з SiO_2 і домішками Na_2O , TiO_2 , MgO .

Завдяки поширеності початкової сировини і порівняно низькій вартості виробництва при досить високій якості виробів шамотні вогнетриви широко використовуються при будівнанні камерних нагрівальних печей.

При температурах до 1350 °С вони застосовуються для будівництва стін і склепіння нагрівальних печей, де служать протягом 2 – 3 років. Для футерування подин, із-за можливого контакту з окалиною, шамот застосовувати не можна. Відомо, що термічні печі можуть бути цілком виконані з шамоту і працюють без ремонту від 5 до 15 років [17].

Згідно тепловому режиму (див. таблицю 1), температура в печі не перевищує 850 °С. В цих умовах можливо використання легшого і менш теплоємного матеріалу ніж шамотна цегла класу Б. Зокрема, необхідними якостями володіють волокнисті вогнетриви (рисунк 2), які виробляються на основі вогнетривкого волокна мулітокремнеземістого складу [14, 15]. Вони характеризуються надзвичайними властивостями, зокрема: плита теплоізоляційна МКРП-340 може довгий час використовуватися при температурах 1150 °С, має щільність до 340 кг/м^3 , теплоємність 1,047 $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ і коефіцієнт теплопровідності 0,23 $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$; теплоізоляційні плити ШПГТ-450 мають температура застосування до 1260 °С, щільність 450 кг/м^3 , теплоємність 1,047 $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ і коефіцієнт теплопровідності 0,28 $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$; блоки вогнетривкі МКРФ-1 мають температуру тривалого застосування 1200 °С, щільність від 130 до 200 кг/м^3 , теплоємність 1,047 $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ і коефіцієнт теплопровідності 0,16 $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [13].



а) МКРП-340



б) ШПГТ-450

Рис. 2. Зовнішній вигляд волокнистих вогнетривких виробів.

Завдяки своїм теплофізичним характеристикам, вони дозволяють значно покращити показники різноманітного теплотехнічного устаткування. Так, в роботі [12] наголошується, що вживання волокнистих матеріалів для футерування печей дозволяє в порівнянні з цегельною кладкою знизити теплові втрати через футеровку на 20 – 30 %, скоротити у декілька разів час розігрівання печі, отримати економію енергії до 45 % в умовах періодичних зупинок печей. В той же час, до недоліків футеровок з волокнистих матеріалів можна віднести досить високу вартість, особливі вимоги до організації руху пічних газів (а саме обмеження за швидкістю руху

газів вздовж поверхні футеровки) та відносно низьку механічну міцність.

В роботі [13] проаналізовано економічну ефективність вживання футеровок з волокнистих матеріалів в камерних печах періодичної дії. Показано, що заміна традиційної кладки доцільна у випадку, коли піч перед завантаженням чергової садки охолоджується нижче температури 500 °С. Але відзначається, що у будь-якому випадку, остаточне рішення щодо заміни матеріалу футеровки необхідно приймати з урахуванням конкретних умов експлуатації технологічного обладнання та особливостей технологічного процесу виробництва.

Питання про вибір матеріалу та товщини кладки зазвичай вирішується з урахуванням теплового режиму роботи печі. Якщо подину, стіни і склепіння печі зробити невеликої товщини, то це приведе до великих втрат теплоти в навколишнє середовище і, крім того, будівельна міцність печі може виявитися недостатньою. При великій товщині кладки втрати теплоти будуть невеликими, але вартість печі зросте. Крім того, якщо піч працює періодично, то окрім теплоти, яка втрачається через кладку теплопровідністю, потрібно брати до уваги і теплоту, що витрачається на розігрівання кладки, яка встигає охолоджуватися.

При періодичних коливаннях температури в печі, найістотніше змінюється температура на внутрішній поверхні кладки. При цьому, через теплову інерцію шару цегли, в глибинних шарах кладки температура може практично не змінюватися.

Свого часу, в інженерних розрахунках товщину прогрітого (охолодженого) шару кладки зазвичай визначають за допомогою емпіричних формул [17]. В сучасних умовах розвитку обчислювальної

техніки такий підхід занадто архаїчний. Також, слід враховувати те, що відомі емпіричні формули було отримано для певного типу печей та матеріалів, з яких вони будувалися за тих часів. Тому слід спиратися на сучасні наукові методи технічної теплофізики, а саме чисельні рішення диференціальних рівнянь теплопровідності.

Методи дослідження

Як вже зазначалось, відомі інженерні методики дозволяють визначити кількості теплоти, яку акумулювала кладка, або товщину прогрітого шару кладки. Але вони дають узагальнені результати та не враховують особливості конкретної печі. У зв'язку з цим, в роботі був використаний чисельний метод розрахунку теплопровідності кладки [8], який дозволяє детально визначити розподіл температур по товщині стінок та кількість теплоти, що кладка накопичила.

Теплообмін у кладці визначається двохмірним диференціальним рівнянням теплопровідності:

$$C \cdot \frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

де C – питома теплоємність матеріалу кладки, Дж/(м³·К); λ – теплопровідність матеріалу, Вт/(м·К); x, y – просторові координати, м; τ – час процесу, с.

Перехід від системи диференціальних рівнянь до системи алгебраїчних виконано за методом теплового балансу розрахункового вузла [18].

$$t_{i,j}^{k+1} = t_{i,j}^k + \frac{\Delta Fo_{i,j}}{\lambda_{i,j}} \cdot \left(2t_n \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot \Delta + t_{i-1,j}^k \cdot \frac{2\lambda_{i-1,j} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i-1,j} + \lambda_{i,j}} + t_{i+1,j}^k \cdot \frac{2\lambda_{i+1,j} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i+1,j} + \lambda_{i,j}} + \right. \\ \left. 2t_{i,j+1}^k \cdot \frac{2\lambda_{i,j+1} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j}} - t_{i,j}^k \cdot \left(2\alpha_{\Sigma} \cdot \Delta + \frac{2\lambda_{i-1,j} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i-1,j} + \lambda_{i,j}} + \frac{2\lambda_{i+1,j} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i+1,j} + \lambda_{i,j}} + 2 \frac{2\lambda_{i,j+1} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j}} \right) \right) \quad (2)$$

де $t_{i,j}^{k+1}$ – температура вузла, °С; k – номер вузла по часу; i – номер вузла по координаті x ; j – номер вузла по координаті y ; Δ – крок по координаті, м; α_{Σ} – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); $\Delta Fo_{i,j}$ – аналог числа Фур'є вузла i,j .

$$\Delta Fo_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j} \cdot \Delta \tau}{C_{i,j} \cdot \Delta^2}, \quad (3)$$

тут $\Delta \tau$ – крок по часу, с; $\lambda_{i,j}$ – коефіцієнт теплопровідності вузла i,j , Вт/(м·К); $C_{i,j}$ – питома теплоємність матеріалу вузла i,j , Дж/(м³·К).

По розробленій математичній моделі була складена комп'ютерна програма.

Розрахунки виконували на рівномірній сітці по явній схемі, дотримуючись умови сталості $\Delta Fo \leq 1/(2 \cdot \Delta Bi + 4)$. Обчислення виконували за

умов, доки не з'являлись ознаки циклічних коливань температур кладки у часі.

Втрати теплоти від зовнішньої поверхні печі та тепло, що акумульовано футеровкою, розраховували на основі визначеного розподілу температури в кладці.

Результати досліджень та їх обговорення

За допомогою комп'ютерної програми, що розроблена авторами, виконано серію розрахунків.

Розрахунки втрат теплоти кладкою існуючої печі.

Для базових умов роботи (120 мм – вогнетрив, 60 мм – теплова ізоляція), визначили розподіл температури в кладці, кількість теплоти, що акумульована кладкою, та втрати теплоти до навколишнього середовища.

Температурна діаграма розігрівання бічної стінки печі (на вісі симетрії) представлена на рис. 4.

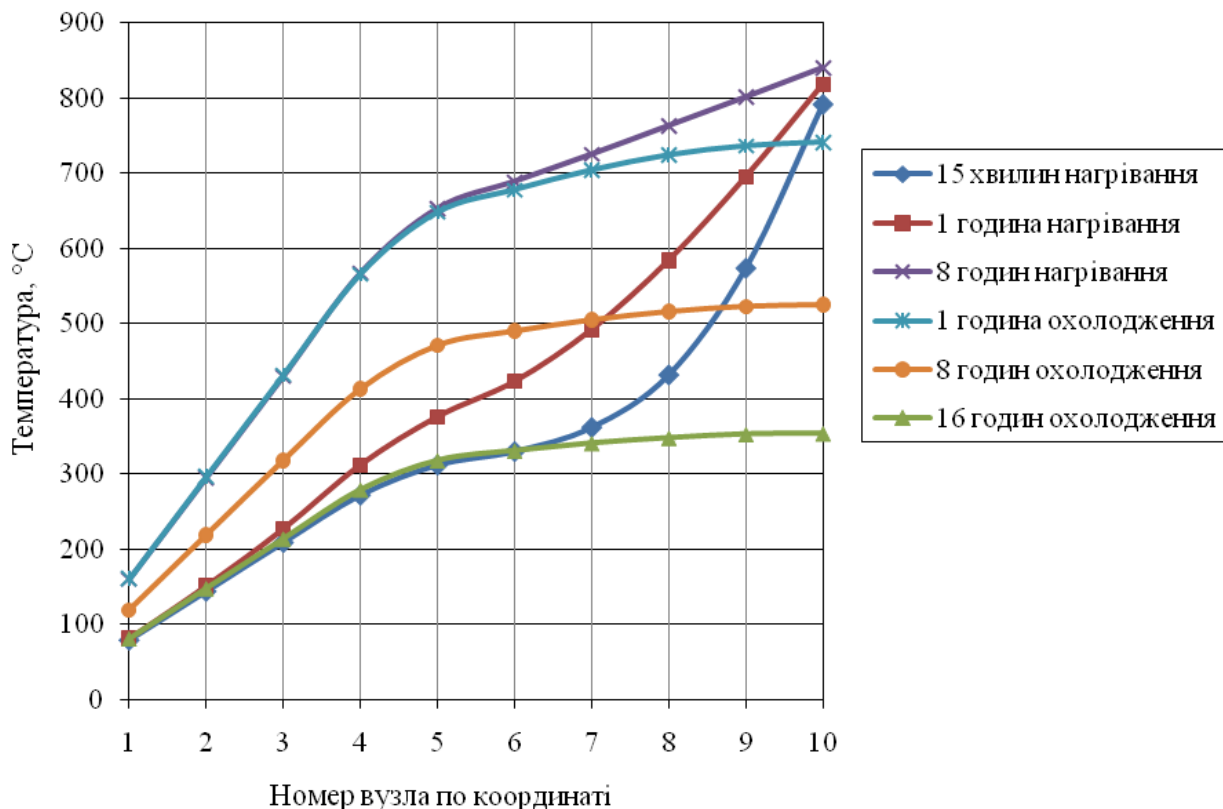


Рис. 4. Температурна діаграма розігріву /охолодження бокової стінки з цегли.

Розрахунки показали, що піч виходить на сталий циклічний режим роботи починаючи з третьої доби тижня. Тобто кожного ранку піч знаходиться у тепловому стані. Температура поверхні кладки з середини – на рівні 350 – 360 °С, а з зовні – 80 – 85 °С. У той же час, за дві неробочі доби (субота та неділя) піч повністю охолоджується.

Підрахунок теплових втрат за робочу зміну (8 годин) показав, що втрати теплоти теплопровідністю через кладку складають 37,4 МДж, а теплота, що акумулюється кладкою досягає 126,9 МДж. До початку нової робочої зміни, ця акумульована теплота продовжує втрачатися у повітря цеху в кількості 72,6 МДж.

Для компенсації цих витрат потрібно спалювати природного газу:

$$b = \frac{Q_{\text{сум}}}{\eta \cdot Q_n^p} = \frac{164,3 \cdot 10^6}{0,62 \cdot 34,5 \cdot 10^6} = 30,73 \text{ м}^3,$$

де $Q_{\text{сум}} = 164,3 \cdot 10^6$ МДж – сумірні втрати теплоти кладкою печі; $\eta = 0,62$ – коефіцієнт використання

палива в печі; $Q_n^p = 34,5 \cdot 10^6$ Дж/м³ – теплота згоряння природного газу.

Розрахунки втрат теплоти кладкою печі по проектним варіантам

При виборі матеріалу для футерування печі спиралась на рекомендації виробників сучасних вогнетривких матеріалів.

Спочатку розраховували варіант, для якого була обрана плита теплоізоляційна МКРП-340 товщиною 180 мм (три шари по 60 мм). По першому варіанту геометрія печі не змінюється, як зовні, так і з середини.

Потім, враховуючи технічну характеристику матеріалу та спираючись на попередні результати розрахунків, обчислили ще два варіанти, для яких прийняли товщину плити 120 мм та 60 мм.

В такому випадку, при незмінних зовнішніх розмірах печі, дещо зростають габарити її внутрішньої камери. Користь такого рішення в тому, що збільшення внутрішніх розмірів зменшить вірогідність пошкодження кладки при аварійній ситуації.

Розподіл температур по товщині стінки під час її розігріву та охолодження наведено на рис. 6.

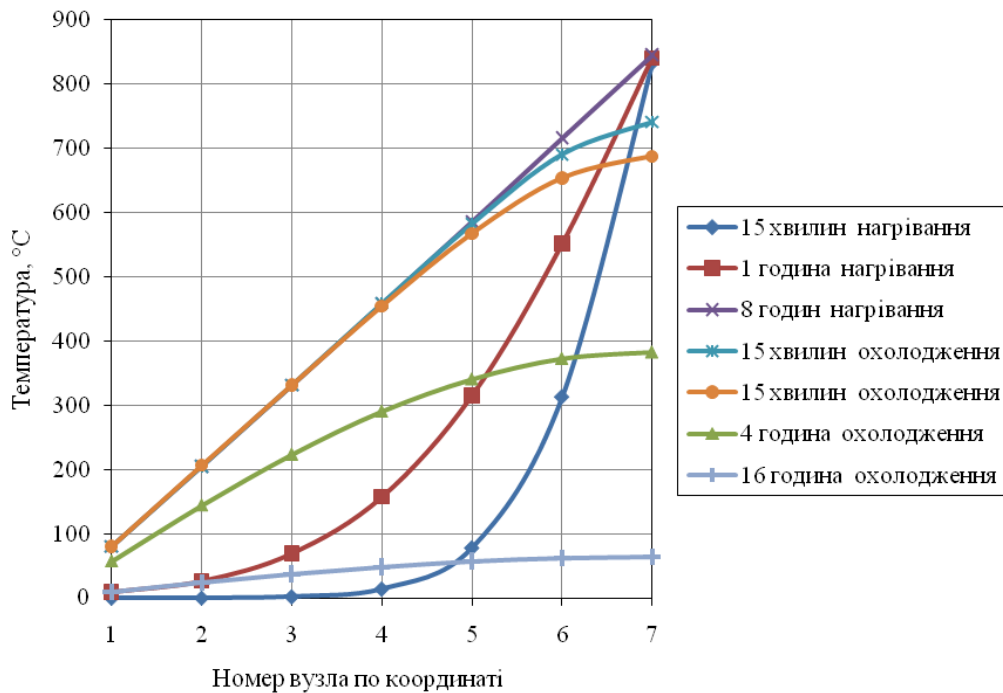


Рис. 6. Температурна діаграма розігріву та охолодження бокової стінки (1-й варіант МКРП-340 180 мм).

Футеровка з МКРП-340 (товщина 180 мм) працює в сталому циклічному режимі з першої робочої доби. Температура поверхонь кладки в кінці робочої зміни складає: зовні – 80 – 85 °С, з середини – 840 – 845 °С. За вихідні – також повністю вихолодає.

Зменшення товщини шару МКРП призводить до суттєвого підвищення теплових втрат

теплопровідності, при відносно незначному скороченні кількості акумульованої теплоти. Крім того, значно зростає температура зовнішніх поверхонь. Для стін товщиною 60 мм – ця температура сягає 200 – 205 °С, що неприпустимо за умов техніки безпеки.

Узагальнені дані за варіантами, що розглядаються, представлено на рис. 7, 8 та в таблиці 2.

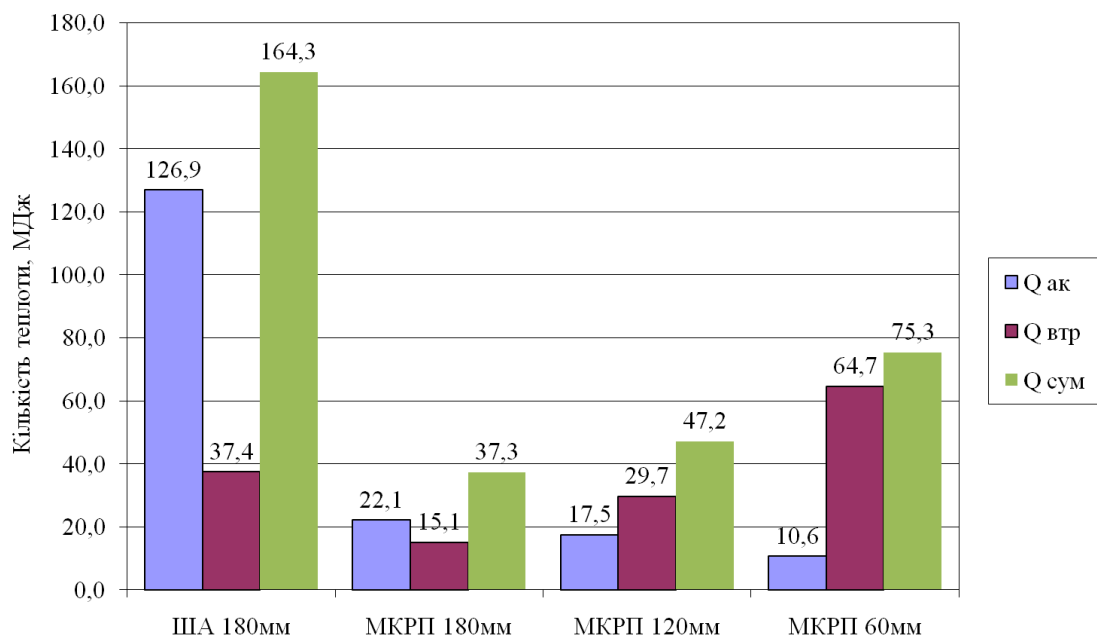


Рис. 7. Добові втрати теплоти піччю для базової та реконструйованої футеровок: Qак – кількість теплоти, акумульована футеровкою; Qвтр – втрати теплоти теплопровідністю; Qсум – сумарні теплові втрати футерівкою.

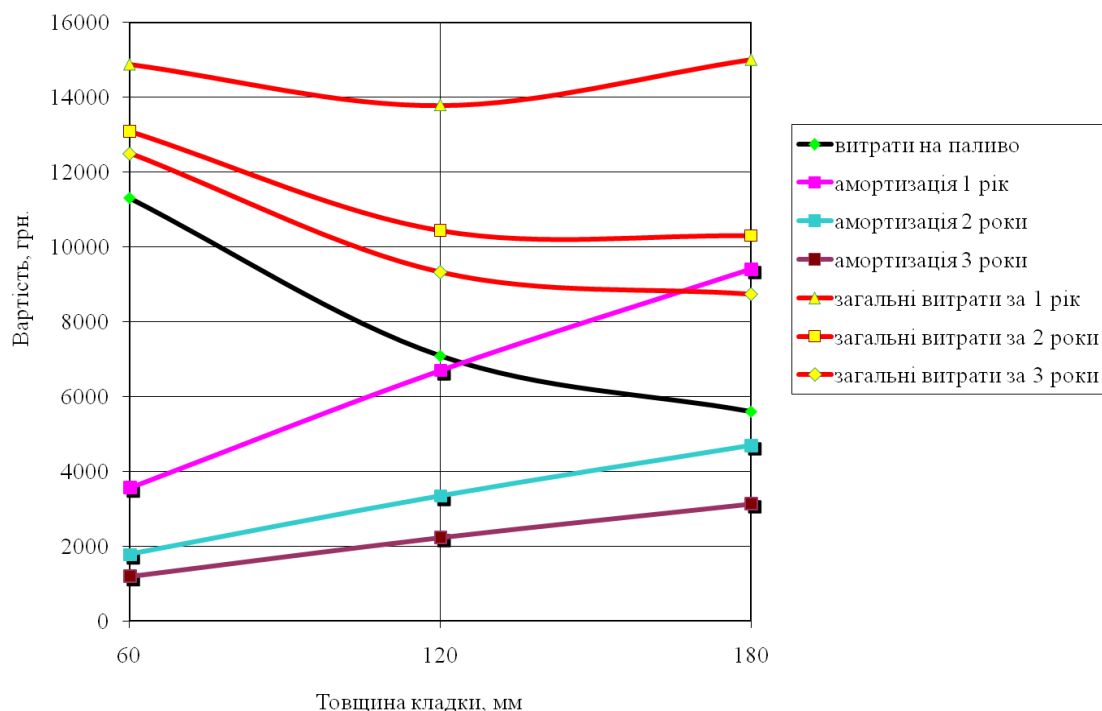


Рис. 8. Загальні витрати на холостий хід печі.

Таблиця 2. Показники роботи печі за варіантами, що розглядаються.

Варіант	Кількість газу на покриття добоових втрат теплоти, м³/добу	Річний обсяг спожитого газу, м³/рік	Вартість спожитого газу, грн/рік	Маса кладки печі, кг	Вартість вогнетривів, грн./т	Вартість матеріалу кладки, грн.
ША 180 мм	19,054	2743,73	24693,6	860,0	8000,0	6880,0
МКРП 180 мм	4,322	622,37	5601,3	215,4	43644,0	9402,0
МКРП 120 мм	5,473	788,17	7093,5	153,4	43644,0	6695,0
МКРП 60 мм	8,732	1257,36	11316,3	81,6	43644,0	3561,0

Аналіз результатів свідчить, що заміна кладки з цегли на футеровку з плити МКРП-340 економічно доцільна в усіх випадках. Проте, на вибір раціонального варіанту впливає очікуваний термін служби печі. Так з графіка 8 випливає, що при кампанії печі більше трьох років, збільшення товщини стін зверх 180 мм знижує загальні витрати на покриття збитків холостого ходу печі. При кампанії до двох років, збільшення товщини стін зверх 120 мм не дає будь якого помітного ефекту. При терміні служби футеровки в один рік – спостерігається чіткий мінімум витрат при товщині кладки в 120 мм.

В той же час слід зазначити, що картина може змінюватися при змінах тривалості робочого часу, вартості матеріалів і, головним чином, вартості природного газу.

Висновки

Зменшення питомих витрат палива при нагріванні металу в камерних печах можливо за рахунок зниження теплових втрат робочого простору.

Аналіз теплової роботи печі показав, що вона експлуатується в циклічному режимі. Це пов'язано з неповним завантаженням підприємства замовленнями на постачання трубної продукції.

Циклічний режим роботи печі приводить до збільшення впливу теплоти, що акумулюється кладкою, на показники її роботи.

Проаналізовано можливість повної заміни футеровки печі. Оскільки температура в робочій камері печі не перевищує 850 °С, то замість цегли марки ШБ та теплоізоляції з діатому, запропоновано використання вогнетривкого плитового матеріалу МКРП-340, що володіє необхідними робочими властивостями.

Заміна кладки з цегли на футеровку з плити МКРП-340 економічно доцільна в усіх випадках. Проте, на вибір раціонального варіанту впливає термін служби футерування печі.

При кампанії печі більше трьох років, збільшення товщини стін з МКРП-340 веде до зниження загальних витрат на покриття збитків холостого ходу печі. При кампанії до двох років, збільшення товщини стін зверх 120 мм не дає будь якого помітного ефекту. При строку служби футеровки в один рік – спостерігається чіткий мінімум витрат при товщині кладки в 120 мм.

Картина може змінюватися при змінах тривалості робочого часу, вартості матеріалів і, головним чином, вартості природного газу.

Перелік посилань

1. Ясногор В. И., Ерёмин А. О., Гупало О. В., Матухно О. В. Конструирование нагревательных печей нового поколения. *Energetické procesy 2017 : Zborník vedeckých prác*. Košice, 2017. P. 153–160
2. Ginkul S. I., Biryukov A. B., Ivanova A. A., Gnatiev P. A. Predictive mathematical model of the process of metal heating in walking-beam furnaces. *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. P. 15–21. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0619-9>
3. Varga A., Kizek J., Rimár M., Fedák M., Čorný I., Lukáč L. Modeling of heat flux in a heating furnace. *Computation*. 2023. Vol. 11. No. 7, 144. <https://doi.org/10.3390/computation11070144>
4. Huang H., Zheng Z., Yao J., Zhang L., Bu S., Xu F., Xu W., Ding H. The quantitative study on the influence of operating parameters upon thermal performance of heating furnace. *ASME. J. Thermal Sci. Eng. Appl.* February 2023. Vol. 15. No. 2, 021001. <https://doi.org/10.1115/1.4055768>
5. Andreev S. System of energy-saving optimal control of metal heating process in heat treatment furnaces of rolling mills. *Machines*. 2019. Vol. 7. No. 3, 60. <https://doi.org/10.3390/machines7030060>
6. Bao Q., Zhang S., Guo J., Zhengguang X., Zhenquan Z. Modeling of dynamic data-driven approach for the distributed steel rolling heating furnace temperature field. *Neural Comput. & Applic.* 2022. Vol. 34, 8959–8975. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-06917-y>
7. Bao Q., Zhang S., Guo J., Ding D., Zhang Z. Hierarchical structure optimal setting approach for production indexes of the rolling heating furnace temperature field. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2023. Vol. 45. No. 1. P. 1663–1681. <https://doi.org/10.3233/JIFS-223441>
8. Rimar M., Kulikov A., Fedak M., Yeromin O., Sukhyi K., Gupalo O., Belyanovskaya E., Berta R., Smajda M., Ratnayake M. R. Mathematical model of a heating furnace implemented with volumetric fuel combustion. *Processes*. 2020. Vol. 8. No. 4, 469. <https://doi.org/10.3390/pr8040469>
9. Soroka B. Novel trends of development and perfection the modern heat exchangers. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2024. Vol. 80. No. 2. P. 54–65. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2019.07>
10. Wang Sz., Gu J., Miao W., Cheng Gl., Liu Kq., Fang Mh., Huang Ch. Heat transfer analysis of several industrial furnace lining refractory structures. *Rare Metal Materials And Engineering*. 2009. Vol. 38. P. 1259–1262
11. Kostur K. Mathematical model for optimisation of a thicknesses of furnace lining. 18th International Carpathian Control Conference (ICCC), Sinaia, Romania, May 28–31, 2017. P. 52–57
12. Губинский В. И., Згура А. А., Красин А. В. Опыт применения волокнистых материалов для футеровки печей трубного производства. *Металлургическая теплотехника : сб. науч. трудов НМетАУ*. Т. 9. Днепропетровск : НМетАУ, 2003. 197 с.
13. Еремин А. О., Шемет Т. Н., Еремина О. Л. Энергосбережение в термических камерных печах с глубоким охлаждением кладки между нагревами металла. *Металлургическая теплотехника : сб. науч. трудов НМетАУ*. Днепропетровск : ЧП Грек О.С., 2006. 364 с.
14. ЧП «НПКФ «Энергоресурс», г. Запорожье. URL: www.enresurs.com
15. Industrial furnace lining. Web-site of TOB "Інвентум Україна". URL: <https://inventum.com.ua/en/futervovka-pechi.html>
16. Gupalo O., Yeromin O., Kabakova L., Kulikov A., Sukhyi M., Romanko Y. Study of the efficiency of using renewable hydrogen in heating equipment to reduce carbon dioxide emissions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1156, 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012035>
17. *Металлургические печи : Теория и расчеты / Губинский В. И., Тимошпольский В. И., Ольшанский В. М. та інш.* Минск : Белорусская наука. В 2-х т. Т. 2. 2007. 832 с.
18. Бровкин В. Л. Численные методы в инженерных расчетах. Днепропетровск : НМетАУ, 2014. 108 с.

References

1. Iasnogor, V. I., Eremin, A. O., Gupalo, O. V., & Matukhno, O. V. (2017). Konstruirovaniye Nagrevatelnykh Pechei Novogo Pokoleniya. *Energetické Procesy 2017*. Košice, 153–160
2. Ginkul, S. I., Biryukov, A. B., Ivanova, A. A., & Gnatiev, P. A. (2018). Predictive Mathematical Model of the Process of Metal Heating in Walking-Beam Furnaces. *Metallurgist*, 62, 15–21. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0619-9>
3. Varga, A., Kizek, J., Rimár, M., Fedák, M., Čorný, I., & Lukáč, L. (2023). Modeling of Heat Flux in a Heating Furnace. *Computation*, 11 (7), 144. <https://doi.org/10.3390/computation11070144>
4. Huang, H., Zheng, Z., Yao, J., Zhang, L., Bu, S., Xu, F., Xu, W., & Ding, H. (2023). The Quantitative Study on the Influence of Operating Parameters Upon Thermal Performance of Heating Furnace. *ASME. J. Thermal Sci. Eng. Appl.* 15 (2), 021001. <https://doi.org/10.1115/1.4055768>
5. Andreev, S. (2019). System of Energy-Saving Optimal Control of Metal Heating Process in Heat Treatment Furnaces of Rolling Mills. *Machines*, 7 (3), 60. <https://doi.org/10.3390/machines7030060>
6. Bao, Q., Zhang, S., Guo, J., Zhengguang, X., & Zhenquan, Z. (2022). Modeling of Dynamic Data-driven Approach for the Distributed Steel Rolling Heating Furnace Temperature Field. *Neural. Comput. & Applic.* 34, 8959–8975 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00521-022-06917-y>
7. Bao, Q., Zhang, S., Guo, J., Ding, D., & Zhang, Zh. (2023). Hierarchical Structure Optimal Setting Approach for Production Indexes of the Rolling Heating Furnace Temperature Field. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 45 (1), 1663–1681, 2023. <https://doi.org/10.3233/JIFS-223441>
8. Rimar, M., Kulikov, A., Fedak, M., Yeromin, O., Sukhyi, K., Gupalo, O., Belyanovskaya, E., Berta, R., Smajda, M., & Ratnayake, M. R. (2020). Mathematical Model of a Heating Furnace Implemented with Volumetric Fuel Combustion. *Processes*, 8 (4), 469. <https://doi.org/10.3390/pr8040469>
9. Soroka, B. (2024). Novel Trends of Development and Perfection the Modern Heat Exchangers. *Energy Technologies & Resource Saving*, 80 (2), 54–65. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2019.07>
10. Wang, Sz., Gu, J., Miao, W., Cheng, Gl., Liu, Kq., Fang, Mh., & Huang, Ch. (2009). Heat Transfer Analysis of Several Industrial Furnace Lining Refractory Structures. *Rare Metal Materials and Engineering*, 38, 1259–1262.

11. Kostur, K. (2017). Mathematical Model for Optimisation of a Thicknesses of Furnace Lining. 18th International Carpathian Control Conference (ICCC), Sinaia, Romania, May 28-31, 2017, 52-57
12. Gubinskii, V. I., Zgura, A. A., & Krasin, A. V. (2003). Opyt primeneniia voloknistykh materialov dlia futerovki pechei trubnogo proizvodstva. Metallurgicheskaya teplotekhnika. Sbornik nauchnykh trudov NMeTAU, Vol. 9. Dnepropetrovsk: NMeTAU
13. Eremin, A. O., Shemet, T. N., & Eremina, O. L. (2006). Ehnergoberezhenie v termicheskikh kamernykh pechakh s glubokim okhlazhdeniem kladki mezhdu nagrevami metalla. Metallurgicheskaya teplotekhnika. Sbornik nauchnykh trudov NMeTAU. Dnepropetrovsk: ChP Grek O.S.
14. CHP "NPKF "Ehnergoresurs", Zaporozhe. Retrieved from <http://www.enresurs.com>
15. Industrial furnace lining. Web-site of "Inventum" company. URL: <https://inventum.com.ua/en/futerovka-pechi.html>
16. Gupalo O., Yeromin O., Kabakova L., Kulikov A., Sukhyi M., & Romanko Y. (2023). Study of the Efficiency of Using Renewable Hydrogen in Heating Equipment to Reduce Carbon Dioxide Emissions. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1156, 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012035>
17. Gubinskii, V. I., Timoshpolskii, V. I., Olshanskii, V. M. et al. (2007). Metallurgicheskie pechi : Teoriia i raschety. Minsk : Belorusskaya nauka. Vol. 2
18. Brovkin, V. L. (2014). Chislennyye metody v inzhenernykh raschetakh. Dnepropetrovsk: NMeTAU

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 20.02.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.05.2024