

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБЕРТОВИХ ПЕЧЕЙ ЗА ВИКОРИСТАННЯ ВОГНЕТРИВІВ З ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Для термічної обробки сипких сировинних матеріалів в багатьох галузях промисловості використовуються обертові теплові агрегати. Однак на сьогодні коефіцієнт використання палива в обертових печах вкрай незначний. Так, наприклад, основна маса цементного клінкеру обпалюється в печах, тепловий ККД яких не перевищує 55...60 %. При цьому втрати тепла через корпус в навколишнє середовище досягають 20...35 % від загальної теплоти згоряння палива. Одним із основних факторів, що визначають теплову ефективність роботи, є величина теплового опору футерівки. Відсутність міцного термостійкого матеріалу зі значними теплоізоляційними властивостями визначила напрям робіт зі створення футерівки з підвищеним тепловим опором шляхом зміни конфігурації вогнетриву та створення комірки з введенням в неї додаткового теплоізоляційного матеріалу. Вказане рішення зменшує втрати тепла в навколишнє середовище та сприяє підвищенню енергоефективності обертових печей. В роботі досліджена теплова ефективність футерівки з різною конфігурацією вогнетриву для діючої обертової печі 4,5×80 м, що встановлена у високотемпературній зоні печі. Розроблена методика, програмне забезпечення та виконані числові розрахунки, які дозволяють визначити температуру та тепловий потік в футерівці з теплоізоляційним елементом та обґрунтувати вибір конфігурації вогнетриву. Визначено, що встановлення вогнетривів з теплоізоляцією в зоні максимальної температури дозволяє зменшити тепловий потік у навколишнє середовище на 26...54 %, а в цілому по печі до 36 %. Суттєвою перевагою вказаного рішення є той фактор, що підвищення енергоефективності печі не вимагає додаткових витрат палива, підвищення температури або збільшення ентальпії продуктів горіння. Отримані результати можуть бути використані для проектування новітнього та вдосконалення діючого обладнання, що дозволить підвищити енергоефективність печі та суттєво зменшити втрати тепла через корпус в навколишнє середовище.

Ключові слова: обертова піч, тепловий опір, футерівка, вогнетрив, теплоізоляція.

Вступ

Обертові теплові агрегати барабанного типу — обертові печі, знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості, де вони використовуються як основні пристрої в процесі обробки сипкого сировинного матеріалу [1]—[3]. Багато печей є унікальними не лише за розмірами, а й за складністю конструкції. Крім того, робота більшої частини таких апаратів відбувається в умовах високих температур, тисків, агресивних середовищ та підвищеної запиленості, що потребує спеціальних заходів щодо підвищення їх надійності, безпеки та довговічності [4]. Ефективність їхнього застосування значною мірою залежить від використання ефективних та раціональних конструктивних елементів, які мають забезпечити довгострокову та надійну роботу пічного агрегату.

Питання про стан обертових печей та перспективи їх розвитку є на сьогодні важливим науковим та виробничим завданням. Однак їх не можливо ефективно вирішувати, не розв'язавши питання про стан футерівки та методи спрямовані на її удосконалення [5].

У обертових печах втрати тепла через корпус в навколишнє середовище дуже значні і досягають 20...35 % від загальної теплоти згоряння палива. При цьому одним з основних факторів, що визначають теплову ефективність їхньої роботи, є величина теплового опору футерівки. Відсутність міцного термостійкого матеріалу зі значними теплоізоляційними властивостями визначила

напрямок робіт зі створення футерівки з підвищеним тепловим опором шляхом введення в неї додаткового теплоізоляційного матеріалу, що досягається за рахунок зміни форми вогнетриву [6], [7]. Наприклад, таким теплоізоляційним матеріалом може бути базальтне волокно (до 900°C), мулітокремнеземна вата (до 1300°C), або мулітокремнеземна вата з неорганічними добавками, яку можна використовувати за температури до 1600°C . У цьому випадку між вогнетривом і корпусом печі утворюється комірка, заповнена теплоізоляційним матеріалом.

Метою роботи є дослідження можливостей встановлення в обертову піч футеровки з фасонним вогнетривом різної конфігурації з урахуванням теплової ефективності шляхом, зменшення теплових втрат в навколишнє середовище.

Результати дослідження

Зменшення теплових втрат печі в навколишнє середовище та маси футерівки досягається за рахунок встановлення фасонних вогнетривів у високотемпературній зоні печі, чим також забезпечується передача більшої кількості тепла оброблюваного матеріалу та зменшення маси теплового апарату [8], [9]. Для цього у вогнетривах, зі сторони корпусу, роблять комірки, які мають форму трапеції, заповненої теплоізоляційним матеріалом. При цьому величина верхньої основи трапеції збільшується у бік зменшення температури. Форма комірок зображена на рис. 1.

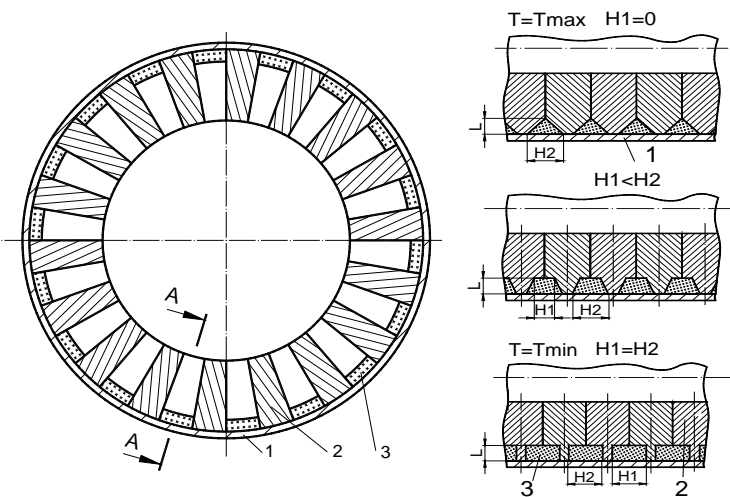


Рис. 1. Футерівка печі с фасонним вогнетривом: 1 — корпус печі; 2 — вогнетрив; 3 — комірка с додатковою теплоізоляцією; L — висота комірки; $H1$ — ширина верхньої основи комірки ($0 \dots H2$ мм); $H2$ — ширина нижньої основи комірки

Зменшення температур по довжині печі, вона збільшується і в кінці печі, де температура газового потоку зазвичай найнижча, набуває прямокутної форми $H1 = H2$. У цьому випадку тепла ефективність футерівки збільшується, а збільшення термічного напруження не є критичним і не викликає руйнування вогнетриву. Розв'язуючи поставлену задачу, необхідно враховувати, що під час роботи печі оброблюваний матеріал викликає часткове стирання футеровки і її товщина може зменшуватися на $60 \dots 75\%$ [2]. Тому висота комірки обмежена умовами зносу і становить $L = 60$ мм.

Для розрахунку температур та теплових потоків у корпусі теплового апарату використовувалася інтегрована система VESNA, розроблена на кафедрі ХПСМ КПІ ім. Ігоря Сікорського [10]. Вказана система призначена для моделювання гідродинамічних, теплових процесів та розрахунків на міцність з використанням методу скінчених елементів. У системі враховуються процеси лінійного та нелінійного деформування просторових комбінованих систем, виконаних з ізотропних та анізотропних матеріалів.

Розподіл температур газового потоку всередині печі показаний на рис. 2.

З погляду будівельної механіки в розрахунковому відношенні корпус обертової печі є тонкостінною циліндричною оболонкою, яка встановлена на декількох опорах. Опорними елементами є бандажі, встановлені на відповідні обичайки. Корпус печі має змінний поздовжній переріз, який визначається різною товщиною самого корпусу і футеровки [11]. Біля однієї з опорних станцій печі на корпус кріпиться зубчасте колесо приводу, яке передає обертовий момент та збільшує втрати тепла від корпусу в навколишнє середовище.

На рис. 1 показано вогнетривку цеглу, яка спирається на корпус за допомогою ніжки, утвореної за рахунок осередків. За механічних та теплових навантажень, що виникають під час роботи, така форма дає можливість краще зберегти механічну стійкість вогнетривкової цегли та забезпечити високу теплову ефективність.

Однак в ніжці вогнетриву з комірками, за рахунок збільшення градієнта температур, збільшуються температурні навантаження. Тому довжина верхньої основи трапеції $H1$ змінюється по довжині печі для виключення можливостей критичних температурних навантажень. У зоні максимальних температур вона мінімальна і при цьому $H1 = 0$ і комірка має трикутну форму. В інших зонах, зі зменшенням температур, вона збільшується.

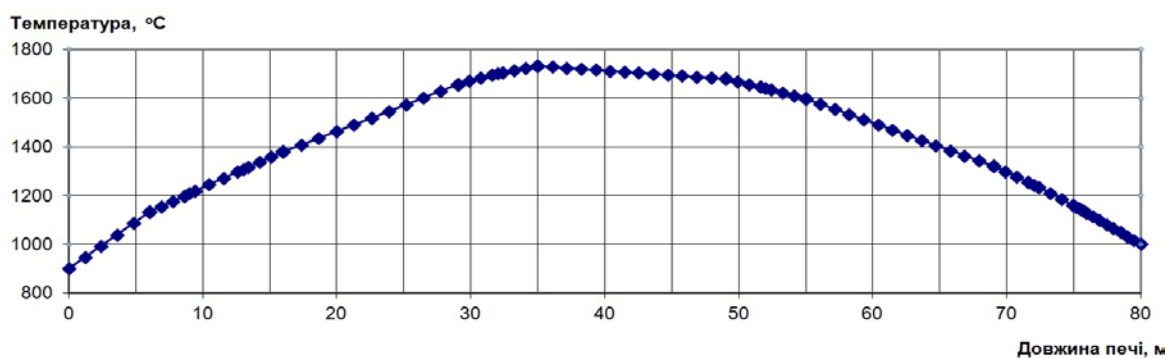


Рис. 2. Температура газопотоку всередині печі

В роботі досліджено обертову піч $4,5 \times 80$ м Криворізького цементного заводу зі зварним бандажем, розрахункова схема якого показана на рис. 3.

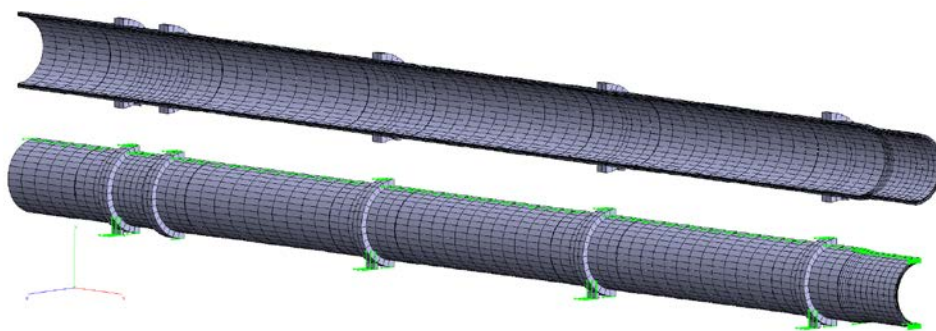


Рис. 3. Розрахункова схема

Для футерування печі використовується шамотний вогнетрив розмірами $230 \times 150 \times 74$ мм. Комірки з теплоізоляцією мають розмір $L = 60$ мм, $H_2 = 120$ мм. Коефіцієнт тепловіддачі від корпусу [9], [12] в навколишнє середовище становить $\alpha_{0,C} = 3,5 + 0,062t_K$.

Результати теплового розрахунку для внутрішньої поверхні футерівки та зовнішньої поверхні корпусу, за використання стандартного вогнетриву товщиною 230 мм, показано на рис. 4.

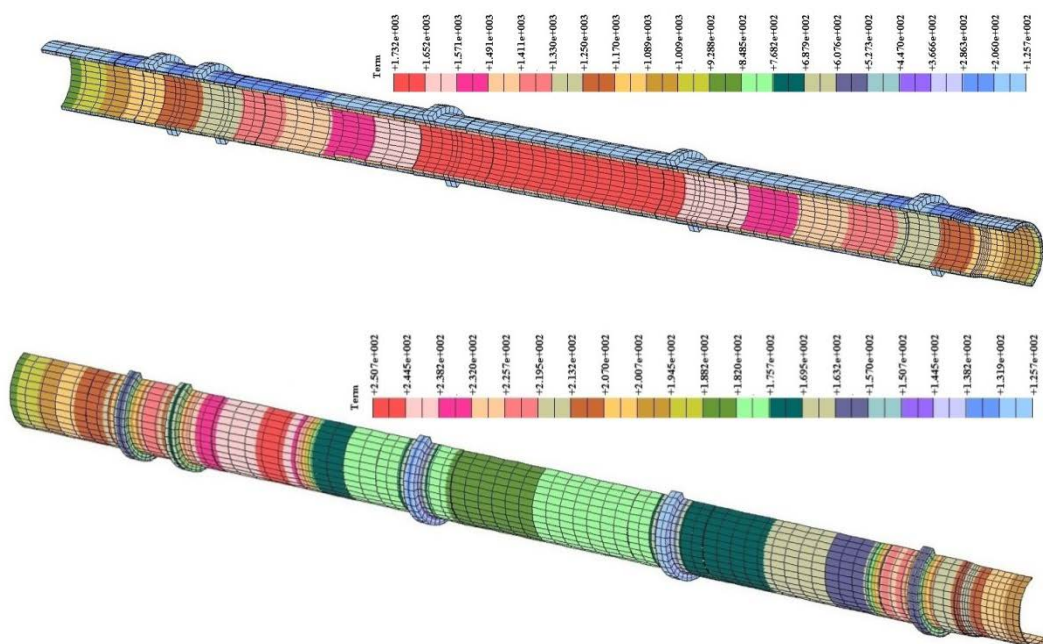


Рис. 4. Температура внутрішньої поверхні футерівки та корпусу печі

З рис. 4 видно, що температура корпусу печі змінюється від 200°C в зонах охолодження та екзотермічних реакцій до 270°C зони спікання. Зниження температури спостерігається в зоні встано-

влення бандажів та вінцевої шестерні за рахунок інтенсивнішого охолодження.

Встановлення футерівки з додатковою теплоізоляцією у високотемпературній зоні викликає зменшення температури до 250 °С. Результати розрахунку подано на рис. 5.

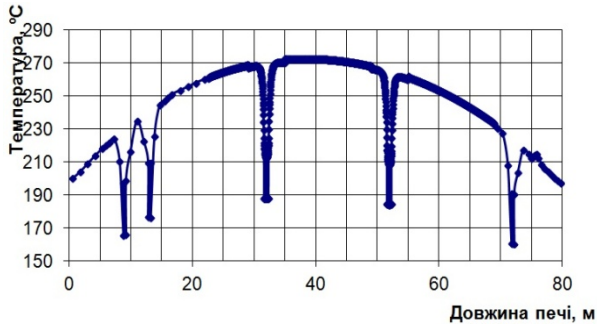


Рис. 5. Температура корпусу зі звичайним вогнетривом

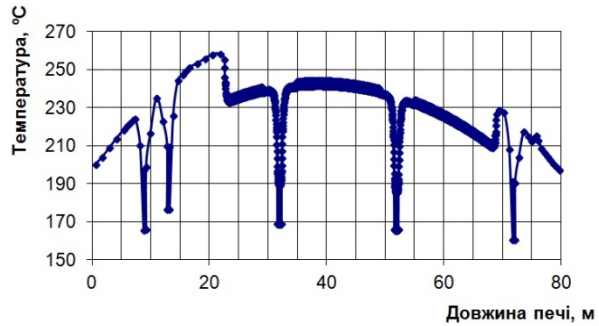


Рис. 6. Температура корпусу для вогнетриву з теплоізоляцією

В процесі роботи печі товщина футерівки змінюється за рахунок зносу від дії агресивного середовища. У роботі моделювалася ситуація, коли вогнетрив має розмір 230 мм — на початку кампанії печі, 160 мм та 120 мм — середина кампанії, 80 мм — кінець кампанії. На рис. 7 показані результати розрахунку температури корпусу печі за різної товщини футерівки та різної конфігурації комірок $H1 = 0$, $H1 = H2/2$, $H1 = H2$ в порівнянні з базовим вогнетривом.

Зі зношенням вогнетриву температура корпусу підвищується, так за товщини футерівки 230 мм (початок кампанії печі) вона становить 250 °С, після зносу до 80 мм (кінець кампанії) — підвищується до 370 °С. У разі встановлення футерівки з фасонним вогнетривом початкова температура становить від 170 °С до 210 °С, залежно від форми комірки з теплоізоляцією, а кінцева не перевищує 270 °С. Істотне зменшення температур пояснюється великим впливом комірки з теплоізоляцією на тепловий опір футерівки печі.

Теплові втрати від корпусу печі суттєво збільшуються зі зношуванням вогнетриву. Для звичайного вогнетриву вони змінюються від 4230 Вт/м², за товщини футерівки 230 мм, до 9950 Вт/м², за товщини — 80 мм. З використанням фасонного вогнетриву теплові втрати зменшуються, особливо в кінці кампанії печі і становлять для комірок $H1 = 0$ — 5250 Вт/м², $H1 = H2/2$ — 4900 Вт/м², $H1 = H2$ — 4458 Вт/м².

На рис. 8 подано результати інтегрального розрахунку ефективності використання футерівки з додатковою теплоізоляцією за рахунок зменшення теплового потоку в навколишнє середовище.

Порівняння проводилося з базовою футерівкою, виконаною вогнетривом стандартної конструкції. Як видно з графіка, встановлення вогнетривів з теплоізоляцією в зоні максимальних температур дозволяє зменшити тепловий потік у навколишнє середовище на 26...54 %, а в цілому по печі — до 36 %.

Отримані дані дозволяють аналізувати умови роботи футерівки та визначати ефективність її використання у разі зміни конструктивних розмірів та фізико-механічних властивостей вогнетривів і теплоізоляції.

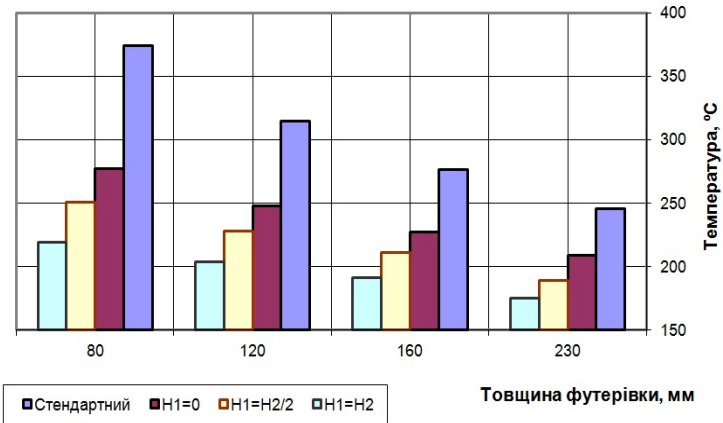


Рис. 7. Температура корпусу у разі зміни товщини футерівки



Рис. 8. Ефективність використання фасонного вогнетриву

Висновки

Розроблено вогнетрив з підвищеним тепловим опором, запропоновано форми комірок з теплоізоляцією та визначено можливі енергетичні зони обертової печі для його встановлення. Запропоноване конструктивне рішення дозволяє забезпечити термічну стійкість футерівки, зменшити масу печі та теплові втрати у навколишнє середовище.

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок про доцільність застосування футерівки зі збільшеним тепловим опором за рахунок зміни форми вогнетриву. Використання футерівки з теплоізоляцією дозволяє зменшити втрати тепла через корпус до 36 %, за рахунок чого підвищити енергоефективність теплового агрегату. До того ж, завдяки радіаційному теплообміну збільшується тепловий потік до відкритої поверхні матеріалу від нагрітої футерівки.

Суттєвою перевагою вказаного рішення також є той фактор, що підвищення енергоефективності печі не вимагає додаткових витрат палива, підвищення температури або збільшення ентальпії продуктів горіння.

Отримані результати можуть бути використані для проектування новітнього та вдосконалення діючого обладнання, що дозволить підвищити енергоефективність печі та суттєво зменшити втрати тепла через корпус в навколишнє середовище.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому планується визначення напружено-деформованого стану футерівки та вогнетриву відповідної конфігурації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М. Б. Генералов, В. П. Александров, и В. В. Алексеев, *Энциклопедия машиностроения. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств*, т. IV-12. М., РФ: Машиностроение, 2004, 832 с.
- [2] A. Boateng, and Rotary Kilns, *Transport Phenomena and Transport Processes*, Elsevier Publication, Oxford, 2008.
- [3] K. E. Peray, *The Rotary Cement Kiln*, 2-nd Edition, Chemical Publishing Co Inc., New York, 1986.
- [4] В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, и М. Г. Ладыгичев, *Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология*, справочное изд., в 2-х кн. Книга 2, В. Г. Лисиенко, Ред. М., РФ: Теплотехник, 2004, 592 с.
- [5] Л. Н. Троценко, «Особенности конструкции и тепловой работы вращающихся печей и перспективные направления их усовершенствования», *Энерготехнологии и ресурсосбережение*, № 4, с. 61-70, 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/159158>.
- [6] V. Shcherbina, D. Shvachko, and S. Borshchik, "Heat exchange simulation in energy zones of a rotary kiln with change of heat resistance of the body," *Technology audit and production reserves*, № 6/1 (50), pp. 36-41, 2019. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.189169>.
- [7] В. Ю. Щербина, і Д. Г. Швачко, «Вплив теплоізоляції футерівки на теплообмін обертових апаратів», *Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, № 2 (21), с. 22-33, 2022. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260342>.
- [8] F. Herz, I. Mitov, E. Specht, and R. Stanev, "Influence of the Motion Behavior on the Contact Heat Transfer Between the Covered Wall and Solid Bed in Rotary Kilns," *Experimental Heat Transfer*, 28:2, pp. 174-188, 2015. <https://doi.org/10.1080/08916152.2013.854283>.
- [9] В. Ю. Щербина, і Д. Г. Швачко, «Методика оперативного розрахунку теплового режиму в фасонному вогнетриві», *Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, №1 (18), с. 102-109, 2019. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171193>.
- [10] О. С. Сахаров, В. Ю. Щербина, О. В. Гондях, і В. І. Сівецький, *САПР. Інтегрована система моделювання технологічних процесів і розрахунку обладнання*. Київ, Україна: ТОВ «Поліграф», 2006, 156 с.
- [11] Fabian Herz, "Prozess modellierung von direkt befeuerten Drehrohröfen zur Beurteilung der thermischen Belastung des Feuerfestmaterials," *Keramische Zeitschrift*, vol. 70, pp. 26-35, 2018. <https://doi.org/10.1007/s42410-018-0003-1>.
- [12] В. Ю. Щербина, і Д. Г. Швачко, «Моделювання процесу нестационарного теплообміну в футерівці обертових агрегатів», *Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, № 2 (19), с. 20-31, 2020. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2020.208052>.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.10.2022

Щербина Валерій Юрійович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, e-mail: xpsm@ukr.net ;

Швачко Денис Григорович — аспірант кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, e-mail: max_shmag@ukr.net .

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

V. Yu. Scherbyna¹
D. G. Shvachko¹

Increasing the Energy Efficiency of Rotating Furnaces when Using Refreshments with Thermal Insulation

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute”

Rotary heating units are used in many industries for the thermal treatment of bulk raw materials. However, today the utilization rate of fuel in rotary kilns is extremely low. So, for example, the bulk of the clinker is fired in kilns, the thermal efficiency of which does not exceed 55...60 %. In this case, heat losses through the housing to the environment reach 20...35 % of the total heat of combustion of the fuel. One of the main factors determining the thermal efficiency of work is the value of the thermal resistance of the lining. The absence of a strong heat-resistant material with significant heat-insulating properties determined the direction of work on creating a lining with increased thermal resistance by changing the configuration of the refractory and creating a cell for introducing additional heat-insulating material into it. This solution reduces heat loss to the environment and improves the energy efficiency of rotary kilns. In this paper, the thermal efficiency of the lining with different refractory configurations for an operating rotary kiln 4.5×80 m installed in the high-temperature zone of the kiln was studied. A technique, software, and numerical calculations have been developed to determine the temperature and heat flux in a lining with a heat-insulating element and justify the choice of refractory configuration. It has been determined that the installation of refractories with thermal insulation in the zone of maximum temperatures makes it possible to reduce the heat flux into the environment by 26...54 %, and in the furnace as a whole by up to 36 %.

A significant advantage of this solution is the fact that increasing the energy efficiency of the furnace does not require additional fuel consumption, temperature increase or increase in the enthalpy of combustion products. The results obtained can be used to design new and improve existing equipment, which will improve the energy efficiency of the furnace and significantly reduce heat loss through the casing to the environment.

Keywords: rotary kiln, thermal resistance, lining, refractory, thermal insulation.

Shcherbina Valerii Yu. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Chemical, Polymer and Silicate Engineering, e-mail: xpsm@ukr.net ;

Shvachko Denys G. — Post-Graduate Student of the Chair of Chemical, Polymer and Silicate Engineering, e-mail: max_shmag@ukr.net