

УДК 66.041.491

**ЩЕРБИНА В. Ю.\***, ШВАЧКО Д. Г.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **ВПЛИВ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ФУТЕРІВКИ НА ТЕПЛООБМІН ОБЕРТОВИХ АПАРАТІВ**

*На прикладі обертової печі 4×60м розглядається питання підвищення теплового опору футерівки шляхом використання фасонного вогнетриву і встановлення в утворені комірки теплоізоляційного матеріалу, що зменшує втрат тепла через корпус, масу футерівки та печі в цілому і підвищити ефективність передачі тепла матеріалу. Розроблена математична модель, програмне забезпечення та виконані числові розрахунки які дозволяють визначити температурні поля в футерівці з теплоізоляційним елементом та обґрунтований вибір відповідного теплоізоляційного волокнистого матеріалу.*

*Визначено, що теплові втрати через корпус печі в навколишнє середовище зменшуються на 18–24%. За рахунок підвищення теплового опору футерівки можливо інтенсифікувати процес передачі тепла матеріалу на 1.5-8% безпосередньо в робочому об'ємі. Наявність комірок з додатковою теплоізоляцією сприяє виникненню теплових пульсацій, що мають осцилюючий характер та позитивно впливають на інтенсифікацію - та масообмінних процесів, що в загальному випадку сприяє підвищенню продуктивності теплового агрегату. Суттєвою перевагою вказаного рішення є той фактор, що підвищення енергоефективності печі не вимагає додаткових витрат палива, підвищення температури або збільшення ентальпії продуктів горіння.*

*Результати розрахунку приведені в електронному додатку до статті у вигляді відео файлу.*

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

**DOI:** 10.20535/2617-9741.2.2022.260342

\* Corresponding author: xpsm@ukr.net

Received 26 April 2022; Accepted 22 June 2022

**Постановка проблеми.** Для обробки сипких сировинних матеріалів в багатьох галузях промисловості використовуються обертові агрегати. До них відносяться гранулятори, сушарки, охолоджуючі барабани, обертові печі, кристалізатори та інше обладнання [1, 2, 3, 4]. В промисловості будівельних матеріалів обертові печі широко застосовують для термічної обробки. Це виготовлення клінкеру, вапна, керамзиту та інших.

Однак на сьогодні коефіцієнт використання палива в обертових печах вкрай незначний [2]. Так, наприклад, основна маса цементного клінкеру обпалюється в печах, тепловий ККД яких не перевищує 55-60 %. Тому завдання підвищення ефективності використання таких агрегатів є дуже актуальною, оскільки збільшення цих показників навіть у кілька відсотків дає істотний економічний ефект.

Питання про стан обертових печей та перспективи їх розвитку є на сьогоднішній день важливим науковим та виробничим завданням. Однак їх неможливо ефективно вирішувати, не розв'язавши питання про стан футерівки та методи спрямовані на її удосконалення.

Для вирішення цих питань ставиться завдання визначення температурних умов, при яких знаходиться вогнетрив у високотемпературній зоні обертової печі.

**Метою даної роботи** є дослідження еволюції та зміни температур в футерівці обертової печі виконаної з фасонних вогнетривів для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище та підвищення ефективності роботи за рахунок збільшення термічного опору футерівки.

**Аналіз попередніх досліджень.** Зазвичай використання високотемпературних агрегатів барабанного типу, особливо в промисловості будівельних матеріалів, реалізується на обладнанні з високим рівнем енерговитрат до яких відносяться суттєві витрати енергії та значне споживання палива. Вказане зумовлене умовами функціонування пічних агрегатів та дотриманням жорстких технологічних вимог до теплового режиму [1, 2]. Крім того проблема високої енергоємності посилюється низьким рівнем корисного використання енергетичних ресурсів. Тому, з метою впровадження енергоощадних технологій використовують наступні методи для удосконалення пічних агрегатів спрямовані на підвищення їх енергоефективності [5]:

- підігрів первинного повітря для горіння в рекуператорах різних конструкцій за рахунок тепла газів, що відходять, а також нагрівання вторинного повітря при його циркуляції між корпусом барабану і відповідними екранами [6]. Однак у цьому випадку потрібні додаткові витрати енергії для транспортування підігрітого повітря на значну відстань, особливо при встановленні рекуператорів біля завантажувальної ділянки печі, де відпрацьовані гази залишають робочий простір.

- регулювання параметрів факела з допомогою різного ступеня закрутки газоповітряної суміші [7], та забезпечення перерозподілу паливного потоку між центральним соплом та спрямованими під кутом до окремих направляючих сопел [8, 9, 10].

- факел спрямовується або розташовується якомога ближче до відкритої поверхні оброблюваного матеріалу [5, 11, 12], так як нагрівання матеріалу, відбувається в основному за рахунок випромінювання від факела, відкритої поверхні футеровки і пічних газів. При використанні наведених методів у шарі матеріалу виникають значні градієнти температур, які викликають недостатнє прогрівання внутрішніх шарів, тому такий підхід не забезпечує достатню рівномірність прогріву матеріалу.

- для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище через корпус обертової печі пропонується встановлювати захисні екрани навколо барабана. Така конструкція, відповідно розрахункових даних [13], дозволяє на 40-50% зменшити втрати теплоти в навколишнє середовище. Однак такий підхід не є ефективним так як сприяє суттєвому розігріву металевому корпусу печі, що суттєво зменшує його несучу здатність. Так при розігріванні до 450 °С модуль пружності сталі зменшується в 2 рази.

- встановлення додаткових теплообмінних пристроїв у робочій зоні печі до яких відносяться коміркові, ланцюгові, радіаційні, керамічні та інші типи теплообмінників. Використовуються для інтенсифікації теплообмінних процесів між газовим потоком та матеріалом, що обпалюється [14, 15] і зменшення втрат тепла з газами, що відходять. Основними недоліками вказаних технічних рішень є суттєве збільшення опору газовому потоку та кількості пилу, що виноситься з печі.

- збільшення теплового опору вогнетривів футерівки, що сприяє зменшенню витрат тепла через корпус печі [11, 16, 17, 18]. Досягається за рахунок зміни форми вогнетриву і введення в комірку додаткового волокнистого теплоізоляційного матеріалу.

Найбільш дієвим вирішенням питання підвищення енергоефективності обертових печей, на наш погляд, є збільшення теплового опору футерівки. Це рішення дає змогу без суттєвих доробок конструкції теплового агрегату зменшити втрати тепла в навколишнє середовище та поліпшити теплотехнічні властивості печі [16, 19]. Збільшення теплового опору досягається за рахунок зміни форми вогнетриву – створення відповідних комірок і введення в них додаткового волокнистого теплоізоляційного матеріалу. Вказане технічне рішення має наступні переваги – зменшення втрат тепла через корпус, збільшення передачі тепла матеріалу, зменшення маси футерівки та печі в цілому.

Використання волокнистого матеріалу обумовлене тим, що встановлення жорсткого теплоізоляційного матеріалу викликає додаткові термічні напруження за рахунок відмін коефіцієнтів лінійного розширення для різних матеріалів. Тому теплоізоляційним матеріалом можуть бути базальтоне волокно або мулітокремнеземна вата. Найбільшого зменшення теплових втрат можливо досягти при встановленні фасонних вогнетривів у найбільш високотемпературних зонах печі.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Для захисту металевому корпусу барабану печі від впливу високих температур він футерується вогнетривкою цеглою. Футерівка є елементом печі, який дає можливість здійснювати високотемпературні технологічні та теплотехнічні процеси при наявності механічних навантажень із збереженням, протягом тривалого часу геометричної форми робочої камери, механічної та будівельної міцності [1, 2, 11].

Разом із захисними функціями футерівка бере участь у тепловій роботі печі, знижуючи теплові втрати в навколишній середовище. У процесі роботи футерівка нагрівається розпеченими газами до температур, що перевищують температуру матеріалів, що оброблюються, і за один оберт печі відбувається контакт всієї поверхні футерівки з шаром матеріалу. Таким чином футерівка є теплообмінним регенератором, що випромінюванням і теплопровідністю передає матеріалу частину тепла [5, 12, 19]. Також при обертанні печі матеріал безперервно переміщується і тепло, що передається, сприймається більшою поверхнею, ніж у випадку нерухомого шару. При цьому футерівка піддається агресивним впливам – постійне стирання нагрітим матеріалом, та хімічна і термічна дії при кожному оберті печі.

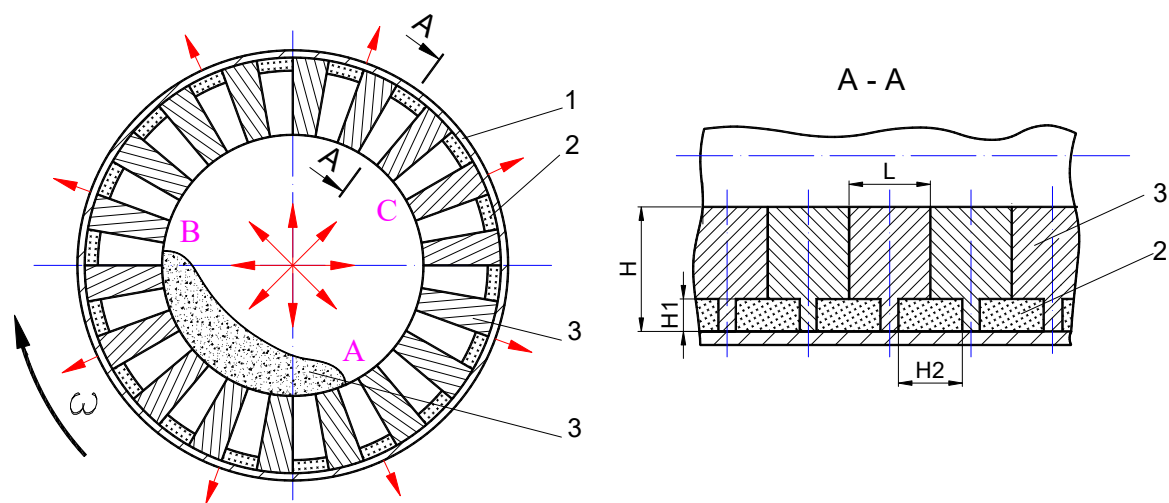
Теплові втрати в навколишнє середовище від корпусу печі залежать від теплопровідності та товщини вогнетриву, що застосовується. У обертових печах, що використовуються в промисловості будівельних матеріалів, втрати тепла в навколишнє середовище тільки через корпус печі досягають 20-25 % від загальної

теплоти спалювання. При цьому одним з основних факторів, що визначають теплову ефективність роботи печі є величина теплового опору футерівки.

#### **Постановка задачі.**

Обертвові печі мають недолік, який полягає в тому, що футерівку досить важко теплоізулювати. Пористий або м'який матеріал, прокладений між твердою вогнетривкою цеглою і зовнішнім металевим корпусом, легко стирається під час безперервного обертання печі. У практиці експлуатації печей зсув між футерівкою і корпусом печі при пуску може досягати 350 мм [5], що також заважає надійному кріпленню ізоляційного шару.

В роботі досліджується футерівка печі яка виконаної з фасонних вогнетривів в комірці яких встановлений волокнистий теплоізоляційний матеріал. Виконується аналіз еволюції та змін температурних полів, впливу обертання з урахуванням заповнення печі матеріалом який обпалюється. На рис. 1 приведений переріз печі виконаний у високотемпературній зоні та вказані умовні позначення для моделювання теплообміну.



*1 – металевий корпус печі; 2 – комірці з теплоізоляцією; 3 – вогнетриви футерівки; 4 – матеріал; H – висота вогнетриву; H1 – висота комірці; H2 – ширина комірці; L – ширина вогнетриву.*

**Рис. 1 – Схема теплообміну в перерізі обертвової печі**

Температура футерівки визначається виходячи з умов нестационарного теплообміну між теплоносієм, сировинним матеріалом, футерівкою в робочому просторі печі та теплообміном між металевим корпусом і навколишнє середовищем. Вогнетриви футерівки мають комірці заповнену волокнистим теплоізоляційним матеріалом. Сировинний матеріал покриває футерівку по дузі АВ. Дугою АСВ моделюється відкрита для газового потоку поверхня футерівки. Початок відліку систем координат знаходиться на перетині осей симетрії. Теплообмін розглядається до умови доки піч не виходить на квазістационарний тепловий режим, тобто коли температурний градієнт в даній точці не змінюється при зміні часу.

Відносно вибору теплоізоляційного матеріалу в комірці з теплоізоляцією потрібно зазначити наступне. Відсутність міцного термостійкого матеріалу з ефективними теплоізоляційними властивостями значною мірою визначало напрям робіт зі створення футерівки з підвищеним тепловим опором шляхом уведення в неї додаткового волокнистого теплоізоляційного матеріалу, що досягається за рахунок зміни форми вогнетриву [6, 16, 18, 20]. В даній роботі аналізується максимальна температура в комірці з теплоізоляцією при зменшенні товщини вогнетриву для вибору ефективного теплоізоляційного матеріалу.

**Опис математичної моделі.** Для моделювання нерівномірних температурних полів скористаємося загальними диференціальними рівняннями нестационарної теплопровідності для циліндричної системи координат [2, 21]. Оскільки довжина обертвової печі значно перевищує діаметр то осьова складова уздовж печі не враховується. Рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) \quad (1)$$

де  $T$  – температура, К;  $\lambda$  – теплопровідність, Вт/кг·К;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – питома теплоємність, Дж/кг·К;  $\tau$  – час, с;  $\varphi$  – кут відносно центру печі, рад;  $r$  – радіальна координата, м.

**Граничні умови.** Прийняті допущення та граничні умови більш ґрунтовно описані в роботі [22] тому вкажемо тільки основні з них та відмінні.

При рішенні (1), уводимо допущення:

1. контакт між футерівкою і матеріалом залежить від його кількості та кута природного укусу;
2. теплофізичні константи вогнетриву, теплоізоляційного матеріалу та корпусу є постійними в даному перетині печі;
3. температура газового потоку  $T_G$  та матеріалу, що оброблюється  $T_M$  приймається постійною по перетину.

Граничні умови в зоні замикання кільця футерівки мають наступний вид:

$$T|_{\varphi=0} = T|_{\varphi=2\pi}; \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi}|_{\varphi=0} = \frac{\partial T}{\partial \varphi}|_{\varphi=2\pi}; \quad (2)$$

4. на ділянці контакту футерівки та металевго корпусу:

$$T_F|_{r=R_2} = T_{K1}|_{r=R_2}; \quad \lambda_F \frac{\partial T_F}{\partial r}|_{r=R_2} = \lambda_K \frac{\partial T_{K1}}{\partial r}|_{r=R_2}, \quad (3)$$

де  $\lambda_F, \lambda_K$  – коефіцієнт теплопровідності футерівки та металевої оболонки корпусу, Вт/кг·К;  $T_F, T_{K1}$  – температура поверхні футерівки та корпусу, К;

5. на ділянці контакту футерівки та теплоізоляційного матеріалу:

$$T_F|_{r=H1, H2} = T_{IZ}|_{r=H1, H2}; \quad \lambda_F \frac{\partial T_F}{\partial r}|_{r=H1, H2} = \lambda_{IZ} \frac{\partial T_{IZ}}{\partial r}|_{r=H1, H2}, \quad (4)$$

де  $\lambda_{IZ}$  – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу, Вт/кг·К;  $T_{IZ}$  – температура поверхні теплоізоляційного матеріалу, К;

6. на зовнішній поверхні металевго корпусу виконуються граничні умови 3 роду:

$$\lambda_K \frac{\partial T_{KZ}}{\partial r} = \alpha_{ef} (T_{KZ} - T_{OC}), \quad (5)$$

де  $T_{KZ}$  – температура зовнішньої поверхні корпусу, К;  $T_{OC}$  – температура навколишнього середовища, К,  $\alpha_{ef} = 3.5 + 0.062 \cdot T_K$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі від корпусу печі та навколишнім середовищем, що враховує конвективну складову та складову випромінювання [1, 2].

Коефіцієнт тепловіддачі до внутрішньої поверхні футерівки, не покритої матеріалом, від газового потоку визначають за залежністю:

$$\alpha_{GF}^{KR} = \frac{5.68 \varepsilon_F}{T_G - T_F} \left[ \varepsilon'_G \left( \frac{T_G}{100} \right)^4 - \varepsilon_G^n \left( \frac{T_F}{100} \right)^4 \right] + \frac{0.418 \cdot \lambda_G}{D_p} \left( \frac{\omega_G D_p}{\nu_G} \right)^{0.67} \quad (6)$$

де  $T_G$  и  $T_F$  – температура газу та футерівки, К;  $\varepsilon_F$  – ступінь чорноти футерівки при  $T = T_F$ ;  $\varepsilon_r, \varepsilon_G$  – ступінь чорноти газу при  $T = T_G$ ;  $\omega_G$  – швидкість газового потоку у вільному перерізі печі, м/с;  $D_p$  – внутрішній діаметр печі, м;  $\nu_G$  – в'язкість газів, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_G$  – теплопровідність газів, Вт/кг·К.

Коефіцієнт тепловіддачі між футерівкою та матеріалом визначається з залежності [2, 22, 24]

$$\alpha_{FM}^T = \sqrt{60 n \lambda_F C_F \gamma_F} \cdot I \cdot (L_{DF} + L_{DM}) \frac{T_G - T_M}{T_F - T_M} \quad (7)$$

де  $\lambda_F, C_F, \gamma_F$  – теплопровідність, теплоємність та щільність вогнетривів;  $n$  – число обертів печі в хвилину;  $I$  – параметр  $I = 0.135$ ;  $L_{DM}, L_{DF}$  – довжина вільної дуги матеріалу та футерівки, м.

При розрахунках враховується переміщення (рух) матеріалу вздовж внутрішньої поверхні футерівки. Враховується зміна положення матеріалу в залежності від швидкості обертання теплового апарату. Зміщення на кут  $\Delta\varphi$  визначається як функція часу перебування матеріалу на відповідних вузлах футерівки.

**Початкові умови.** Задаються з рішення стаціонарної задачі з вказаними граничними умовами без врахування матеріалу:

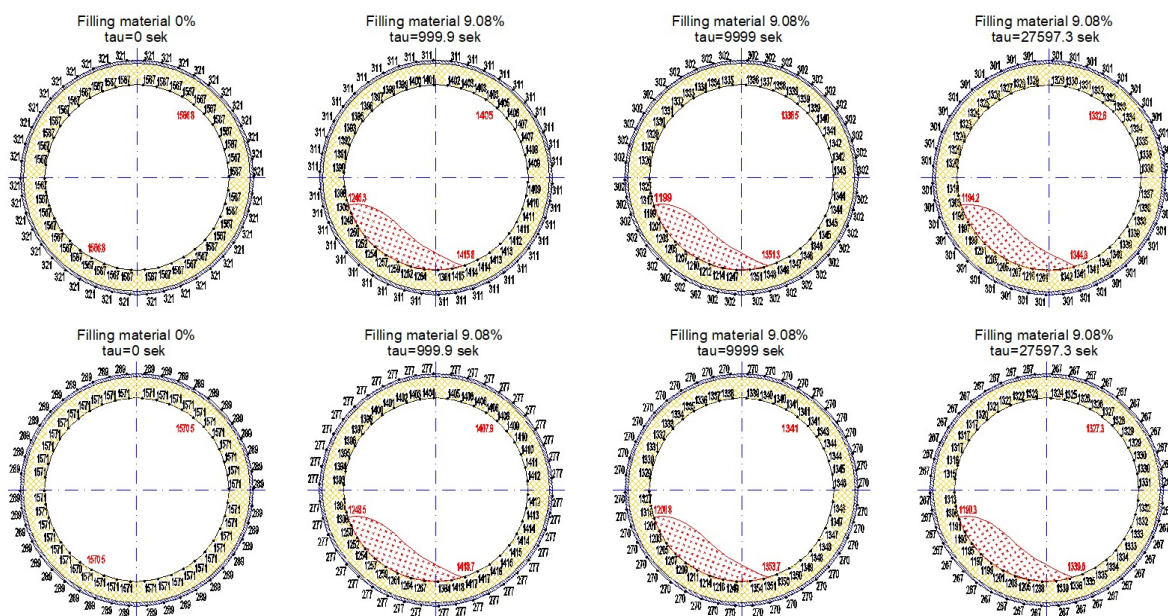
$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (8)$$

Розрахунок рівнянь виконувався ітераційним методом скінчених різниць з застосуванням явної схеми. Програмне забезпечення для реалізації числових моделей виконано на мові C++, а для графічної інформації і візуалізації використовувались розроблені програми ALisp в системі ACAD.

**Результати розрахунків.** Розрахунок виконувався для пічного агрегату з обертовою піччю 4x60м Криворізького цементного заводу.

Температура газового потоку становить  $T_G=1650$  °С, температура оброблюваного матеріалу  $T_M=1200$  °С, піч обертається зі швидкістю 3.5 об/хв. Комірка з теплоізоляцією (рис.1) має наступні розміри – висота комірки  $H1=40$  мм, ширина  $H2=90$  мм. Ширина шамотного вогнетриву  $L=150$  мм. При роботі печі вогнетрив зношується і товщина футерівки зменшується і відповідно складає  $H=230, 190, 150, 110, 80$  мм. Теплоізоляційний матеріал мулітокремнеземна вата МКРР-130 з наступними теплофізичними характеристиками  $\lambda_{IZ}=0.18$  Вт/кг·К,  $c_{IZ}=1.047$  кДж/кг·К,  $\rho_{IZ}=130$  кг/м<sup>3</sup>. Ступінь заповнення матеріалом становить 9,04%. Металева стальна оболонка – 0.03 м.

На рис. 2 наведені результати розрахунку температури внутрішньої поверхні футерівки та металевого корпусу печі впродовж виходу теплового агрегату на стаціонарний режим роботи. Порівнюються температури для базової футерівки та футерівки з теплоізоляційною коміркою.



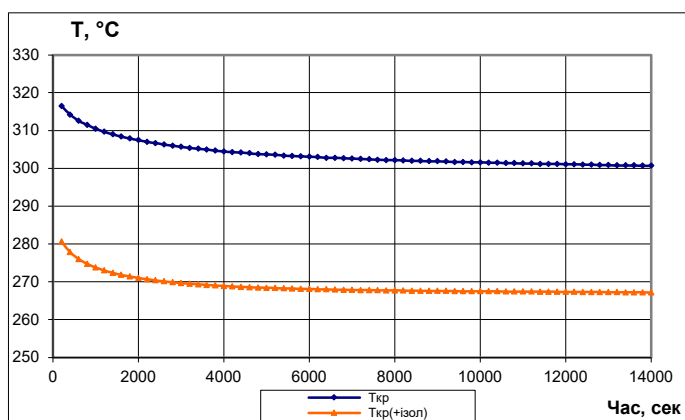
а) – термін роботи 0 хв; б) – термін роботи 166 хв; в) – термін роботи 400 хв; г) – термін роботи 460 хв;

**Рис. 2 – Температура футерівки та корпусу**

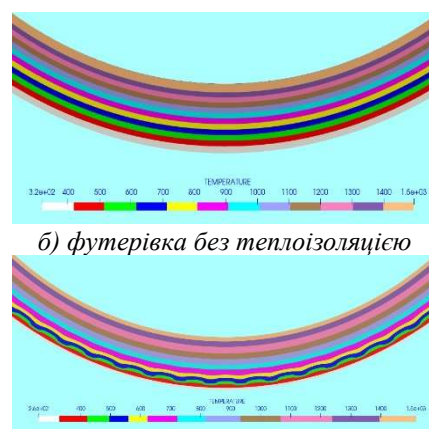
З наведених даних видно, що відповідно початковим умовам внутрішня поверхня футерівки прогрівається без матеріалу отримуючи тепло від газового потоку. При цьому температура футерівки становить  $T_{\Phi}=1567$  °С, зовнішнього корпусу  $T_{\text{КР}}=321$  °С. Для теплоізолюваної футерівки  $T_{\Phi}=1571$  °С корпусу  $T_{\text{КР}}=289$  °С відповідно. Після потрапляння матеріалу відбуваються зміни теплових полів і температура футерівки та корпусу печі зменшується за рахунок передачі частини тепла матеріалу. За деякий термін часу, при якому відбувається перехід на квазістаціонарний режим, температура внутрішнього шару

футерівки зменшується до  $T_{\Phi}=1194.2-1344.8$  °С, корпусу  $T_{\text{КР}}=301$  °С, для футерівки з теплоізоляцією  $T_{\Phi}=1190.3-1339.6$  °С,  $T_{\text{КР}}=267$  °С.

На рис. 3а зображена еволюційна зміна температури зовнішнього металевого корпусу та поле температур після виходу на квазістаціонарний режим в звичайній – рис. 3б і теплоізольованій футерівці рис. 3в.



а) зміна температури корпусу печі



б) футерівка без теплоізоляції

в) футерівка з теплоізоляцією

Рис. 3 – Вихід печі на квазістаціонарний тепловий режим

З отриманих результатів розрахунку можливо зробити висновок, що перехід на квазістаціонарний режим відбувається приблизно через 2.5-3.0 годин роботи, що відповідає експериментальним дослідженням, при обертанні 3.5 об/хв та кількості матеріалу, що становить 9% від живого простору печі.

В наступних розрахунках будемо аналізувати дані отримані після виходу печі на квазістаціонарний режим роботи.

Для визначення типу волокнистого теплоізоляційного матеріалу розглянуті температури в комірці з теплоізоляцією. На рис. 4 приведені ізолінії полів температур для вогнетривів різного ступеня механічного стирання Н, визначені по границі контакту вогнетрив – теплоізоляція. На рис. 5 вказані значення максимальної температури.

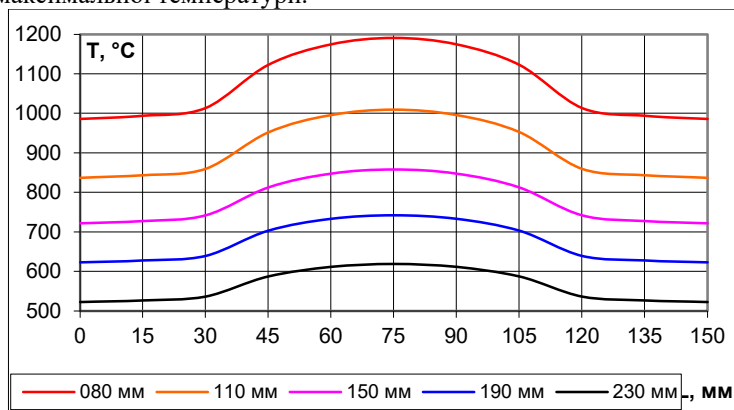


Рис. 4 – Температура в комірці з теплоізоляцією

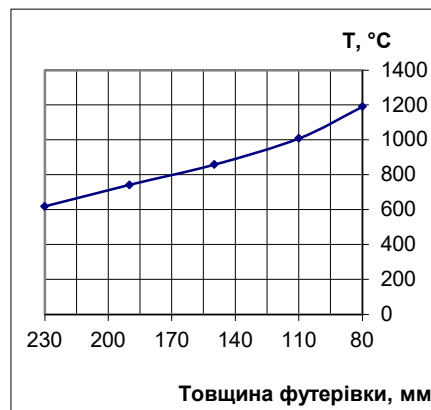
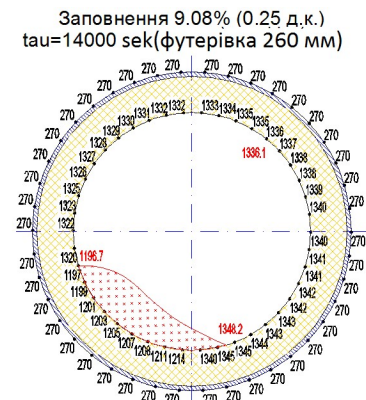


Рис. 5 – Максимальна температура

Відповідно геометрії футерівки (рис.1) вогнетрив має розмір  $L=150$  мм. Комірка з теплоізоляцією  $H_2=90$  мм,  $H_1=40$  мм. З рис. 4 видно, що на ділянці з теплоізоляцією температура, за рахунок теплового опору футерівки підвищується та має максимальне значення в центрі комірки. У вогнетриві значення температури зменшується. Максимальні температури, в залежності від висоти вогнетриву (рис. 5) змінюються від 619.3 °С на початку кампанії печі до 1190.6 °С в кінці кампанії. Для вибору ефективного теплоізоляційного матеріалу потрібно враховувати, що базальтове волокно має температуру експлуатації близько  $T_E=700$  °С, супертонке базальтове волокно –  $T_E=900$  °С, мулітокремнеземна вата МКРР-130 –  $T_E=1100-1200$  °С, мулітокремнеземна вата з неорганічними добавками можливо використовувати при температурі до  $T_E=1600$  °С. В даному

випадку можливе використання теплоізоляції МКРР-130. Слід зазначити, що в енергетичних зонах з меншою температурою більш доцільно, виходячи з економічних показників, застосовувати інший волокнистий теплоізоляційний матеріал, наприклад базальтове волокно.

Характер розподілу температур в робочій зоні обертової печі, при наявності оброблюваного матеріалу, приведено на рис. 6. На графіках вздовж осі ординат приведені температури °С, вздовж вісі абсцис кут відносно центру печі, в градусах. Футерівка виконана фасонним вогнетривом заповненим волокнистим теплоізоляційним матеріалом МКРР-130. Розглядається зміна товщина футерівки – 260, 190, 150, 110 та 80 міліметрів.



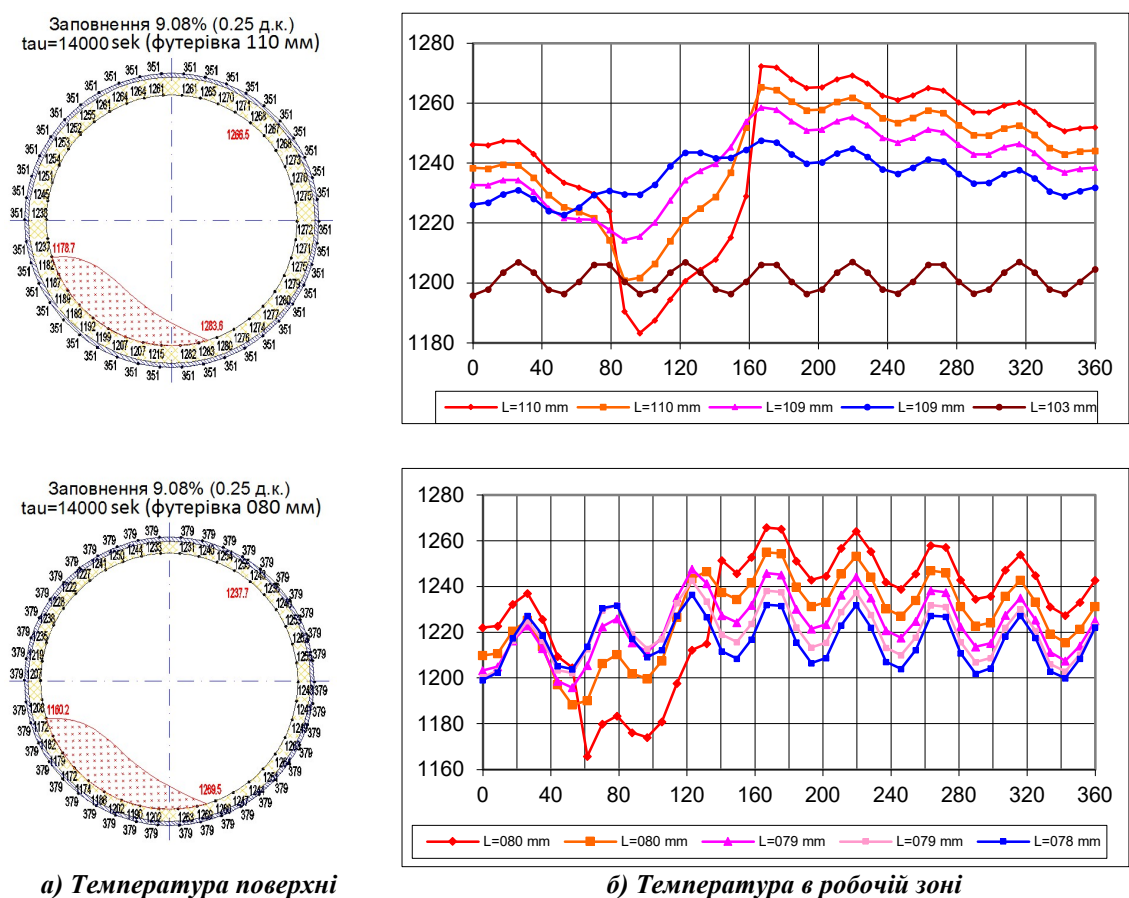


Рис. 6 – Температура робочої зони обертової печі (продовження)

З рисунків видно, що при зменшенні товщини футерівки зростає роль теплових пульсацій які мають осцилюючий характер та істотно впливають на інтенсифікацію тепло- та масообмінних процесів [25, 26]. Вказане явище пов'язане зі зростанням швидкостей протікання хімічних та дифузійних реакцій. Вважається, що осцилюючий температурний режим, що виникає при пульсаційному нагріванні, інтенсифікує циркуляційні потоки в сипких матеріалах, наприклад шихті, що оброблюється в обертових печах. Такий режим особливо ефективний при сушінні, тобто при потраплянні зволоженого матеріалу в зону підігріву обертової печі. У високотемпературних зонах, в загальному випадку, це сприяє підвищенню продуктивності теплового агрегату. Однак більш детальний аналіз питання ефективності процесу теплових пульсацій виходить за рамки даної роботи.

Значення температур в контрольній точці А футерівки печі показані на рис. 7.

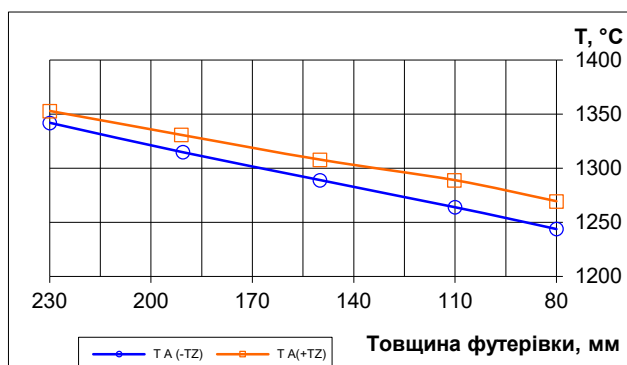


Рис. 7 – Температура т.А футерівки печі

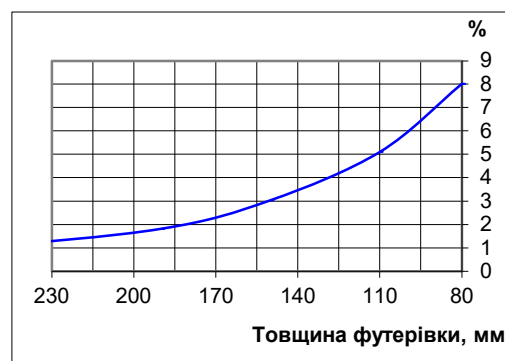


Рис. 8 – Ефективність теплопередачі



У вказаній позиції відбувається повний прогрів футерівки за час оберту і сировинний матеріал покриває футерівку та починається теплообмін між вогнетривами і матеріалом. По мірі механічного стирання футерівки температура в т.А зменшується в зв'язку із загальним зменшенням теплового опору. З графіка видно, що температура в точці А має більші значення при наявності футерівки з теплоізоляцією. Різниця температур становить від 14 до 26 °С в залежності від міри стирання футерівки. За рахунок цього, при використанні футерівки з теплоізоляцією, тепловий потік до матеріалу зростає на 1.5-8%, що показано на рис. 8. Таким чином додаткова теплоізоляція дає можливість не тільки зменшити втрати теплоти в навколишнє середовище через корпус печі але і інтенсифікувати процес передачі тепла матеріалу за рахунок створення відповідного температурного поля в робочому об'ємі печі шляхом збільшення теплового потоку з напрямку нагрітої кладки до матеріалу на ділянці контакту [15]. Крім того, завдяки радіаційному теплообміну, збільшується тепловий потік до відкритої поверхні матеріалу від більш нагрітої футерівки.

Втрати тепла через корпус печі в навколишнє середовище представлено на рис. 9.

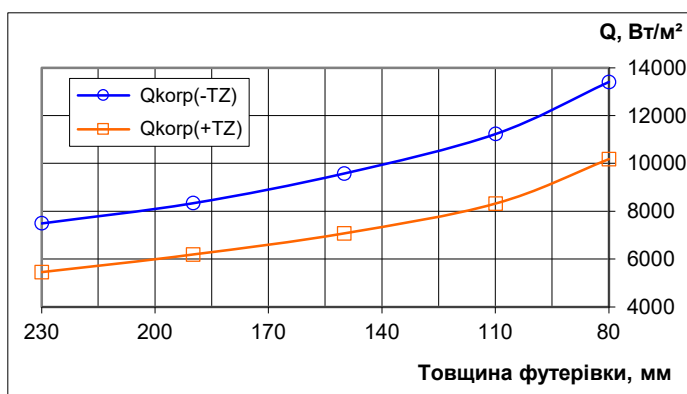


Рис. 9 – Тепловий потік від корпусу печі

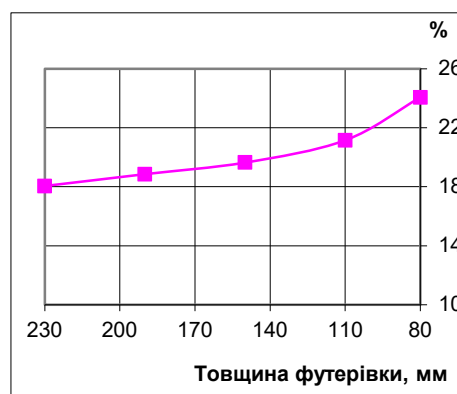


Рис. 10 – Ефективність використання

З графіків видно, що теплові втрати від корпусу печі суттєво збільшуються у міру зношування вогнетриву. Так при товщині футерівки 230 мм (початок кампанії печі) вона становить 7500 Вт/м², після зношування до 80 мм (кінець кампанії) підвищується до 13410 Вт/м². Встановлення футерівки з фасонним вогнетривом сприяє зменшенню теплових втрат до 5457 Вт/м² та 10183 Вт/м² відповідно.

Ефективність використання вогнетривів з додатковою теплоізоляцією, відносно зменшення теплових втрат навколишнє середовище показана на рис. 10. Зіставлення проводилося для базової футерівки з стандартною конструкцією вогнетриву. Графік наочно показує, що використання вогнетривів з теплоізоляцією в зоні максимальних температур зменшує теплові витрати в навколишнє середовище на 18–24%.

**Висновки.** Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок про доцільність застосування футерівки зі збільшеним тепловим опором за рахунок зміни форми вогнетриву та введення в комірки додаткового волокнистого теплоізоляційного матеріалу. Використання даного технічного рішення дозволяє зменшити втрати тепла через корпус, збільшити кількість тепла, що передається матеріалу в робочій зоні, зменшити масу футерівки та печі в цілому та підвищити енергоефективність теплового агрегату.

Теплові втрати через корпус печі в навколишнє середовище зменшуються на 18–24%. Підвищення теплового опору футерівки також дає можливість інтенсифікувати процес передачі тепла матеріалу на 1.5-8% за рахунок створення відповідного температурного поля в робочому об'ємі шляхом збільшення теплового потоку на ділянці безпосереднього контакту футерівки та матеріалу. Крім того завдяки радіаційному теплообміну збільшується тепловий потік до відкритої поверхні матеріалу від більш нагрітої футерівки.

Наявність комірок з додатковою теплоізоляцією сприяє виникненню теплових пульсацій, що мають осцилюючий характер та впливають на інтенсифікацію тепло- та масообмінних процесів, що в загальному випадку сприяє підвищенню продуктивності теплового агрегату.

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

**Перспективи подальших досліджень.** В подальшому планується промоделювати процес поступового заповнення печі матеріалом та моделювати зміну числа обертів печі.

Результати основних розрахунків наведені у вигляді відео файлів в додатку до статті.

**Список використаної літератури**

1. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Вращающиеся печи: теплагехника, управление и экология: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 2 / Под ред. В. Г. Лисиенко. - М.: Теплагехник, 2004.- 592 с.
2. Щербина В.Ю. Розвиток теорії та удосконалення технологічних процесів при виробництві будівельних матеріалів у високотемпературних агрегатах: дисертація ... доктора технічних наук: 05.17.08 // Щербина Валерій Юрійович; - Київ, 2017. -393 с.
3. Lanyue Zhang, Zhaochen Jiang, Fabian Weigler, Fabian Herz, Jochen Mellmann, Evangelos Tsotsas PTV measurement and DEM simulation of the particle motion in a flighted rotating drum // Powder Technology Volume 363, 1 March 2020, Pages 23-37, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.035>
4. Lanyue Zhang, Zhaochen Jiang, Fabian Weigler, Fabian Herz, Jochen Mellmann, Evangelos Tsotsas PTV measurement and DEM simulation of the particle motion in a flighted rotating drum // Powder Technology Volume 363, 1 March 2020, Pages 23-37, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.035>
5. Троценко Л.Н. Особенности конструкции и тепловой работы вращающихся печей и перспективные направления их усовершенствования // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2016. № 4. С. 61-70. URI: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/159158>
6. Щербина В. Ю., Лобко С. С., Васильченко Г. Н., Лелека С. В. О повышении энергоэффективности вращающихся печей // Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6», 1 – 2 грудня 2016 року, м. Київ. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. С. 376-380. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/20392>
7. Трусова И.А., Менделеев Д.В., Ратников П.Э. Выбор горелочного устройства при производстве клинкера во вращающихся печах // Литье и металлургия. 2011. № 1. С. 124-126.
8. Цкитишвили Э.О., Троценко Л.Н., Пикашов В.С. Регулирование параметров факела как средство экономии топлива при обжиге извести // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2013. № 1. С. 57- 64.
9. Троценко Л.Н., Пикашов В.С. Система регулирования температурного режима вращающейся печи // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2015. № 5-6. С. 88- 92.
10. Троценко Л.Н., Пикашов В.С., Виноградова Т.В. Повышение эффективности нагрева и обжига сыпучих материалов во вращающихся печах // Металлург. и горноруд. пром-сть. 2014. № 5. С. 101-104.
11. Хрестоматія енергосбереження: Справ. / Под ред. В.Г.Лисиенко. М.: Теплотехник, 2003. 688 с.
12. Детков С.П., Еринов А.Е. Тепловые процессы в печных агрегатах алюминиевой промышленности. Киев : Наук. думка, 1987. 270 с.
13. Колодяжный В.С., Губинский М.В., Перерва Я. и др. Разработка эффективного способа теплоизоляции металлургических агрегатов // Труды XVI Междунар. конф. «Теплотехника и энергетика в металлургии», Днепропетровск, Украина, 4-6 окт. 2011 г. Днепропетровск: Нац. металлург. акад. Украины, 2011. С. 107-108.
14. 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.
15. Ленцов И.А. Тепловой баланс вращающейся печи для обжига известняка и его анализ // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту. Сер. Технічні науки. 2014. Вип. 29. С. 103-115.
16. Shcherbina V., Shvachko D., Borshchik S. 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),2019, pp.36-41. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.189169>
17. Шариков Ю.В., Маркус А.А. Математическое моделирование тепловых полей во фрагменте футеровки вращающейся печи / Металлург. 2013. № 12, с. 23-26.
18. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г., Підвищення енергоефективності обертових теплових агрегатів / ВЧЕНІ ЗАПИСКИ ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО Серія: Технічні науки Том 29 (68), Ч.2, № 4, 2018, стр. 68-72. URL:[http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/4\\_2018/part\\_2/15.pdf](http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/4_2018/part_2/15.pdf)
19. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г., Ефименко Е.А., Дослідження напружено-деформованого стану обертового теплового агрегату // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2018. № 1. С. 65-71, DOI: <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2018.143382>
20. Швачко Д.Г., Щербина В.Ю. Методика оперативного розрахунку теплового режиму в фасонному вогнетриві // Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №1(18), 2019, с. 102-109. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171193>
21. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

22. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г. Моделирование процесса нестационарного теплообмена в футеровке оборотных агрегатов / Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №2(19), 2020, с. 20-31. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2020.208052>
  23. Fabian Herz Prozess modellierung von direkt befeuerten Drehrohröfen zur Beurteilung der thermischen Belastung des Feuerfestmaterials // Keramische Zeitschrift volume 70, pages26–35(2018) DOI: <https://doi.org/10.1007/s42410-018-0003-1>
  24. F. Herz, I. Mitov, E. Specht & R. Stanev (2015) 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, 174-188, DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2013.854283>
  25. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества: Учебное пособие. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. 136 с.
  26. Островский Г.М. (ред.), Абиев Р.Ш., Александров В.М., и др. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. II.-СП б.: НПО «Профессионал», 2006. 916 с.
- 

*Valerii Shcherbina, Denys Shvachko*

### **THE EFFECT OF THERMAL INSULATION OF THE LINING ON THE HEAT EXCHANGE OF ROTATING APPARATUSES**

*Rotary kilns are used in many industries to process bulk raw materials. In the building materials industry, rotary kilns are widely used for heat treatment. However, the fuel utilization factor in rotary kilns is extremely low. Thus, the bulk of cement clinker is fired in furnaces, the thermal efficiency of which does not exceed 55-60%. Therefore, the task of increasing the efficiency of such units is extremely relevant. In operating furnaces, heat losses to the environment only through the furnace body reach 20-25% of the total heat of combustion. In this case, one of the main factors determining the thermal efficiency of furnace operation is the value of thermal resistance of lining.*

*The aim of the work is to study the evolution and temperature changes in the rotary kiln lining made of shaped refractory to reduce heat losses to the environment and improve the efficiency by increasing the thermal resistance of the lining. The increase in thermal resistance is achieved by changing the shape of the refractory by creating appropriate cells and introducing additional fibrous insulating material into them.*

*A mathematical model and software have been developed and numerical calculations have been carried out to determine non-stationary temperature fields in the lining with a thermal insulating element and to substantiate the choice of an appropriate thermal insulating fibrous material.*

*Analyzing the calculation results, it is possible to conclude about the expediency of using a lining with increased thermal resistance. The use of this technical solution makes it possible to reduce heat losses through the housing by 18-24%, to increase the amount of transferred material in the working zone by 1.5-8% due to the creation of an appropriate temperature field in the working volume, and to reduce the mass of the lining and the furnace as a whole. and increase the energy efficiency of the thermal unit.*

*The presence of cells with additional thermal insulation contributes to the emergence of thermal pulsations having oscillatory character and affecting the intensification of heat and mass exchange processes, which in general contributes to the performance of the thermal unit.*

*A significant advantage of this method is also the fact that increasing the energy efficiency of the furnace does not require additional fuel consumption, increasing the temperature or increasing the enthalpy of the combustion products.*

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

#### **References**

1. Lisienko V. G. Vrashchayushchiesya pechi: teplotekhnika, upravlenie i ehkologiya: spravochnoe izdanie: v 2 kn / V.G. Lisienko, YA.M. Shchelokov, M.G. Ladygichev; red. V.G. Lisienko. - Moskva: Teplotekhnika, 2004. Kn.2.- 592 s, 24sm.
2. Shcherbina V. Yu. Rozvytok teorii ta udoskonalennia tekhnolohichnykh protsesiv pry vyrobnytstvi budivelnnykh materialiv u vysokotemperaturnykh ahrehatakh: dySSERTatsiya ... doktora tekhnicheskyykh nauk: 05.17.08 // Shcherbina Valerii Yuriiovych; Kyiv, 2018. -393 s.
27. Lanyue Zhang, Zhaochen Jiang, Fabian Weigler, Fabian Herz, Jochen Mellmann, Evangelos Tsotsas PTV measurement and DEM simulation of the particle motion in a flighted rotating drum // Powder Technology Volume 363, 1 March 2020, Pages 23-37, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.035>
28. Lanyue Zhang, Zhaochen Jiang, Fabian Weigler, Fabian Herz, Jochen Mellmann, Evangelos Tsotsas PTV measurement and DEM simulation of the particle motion in a flighted rotating drum // Powder Technology Volume 363, 1 March 2020, Pages 23-37, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.035>

5. Trotsenko L.N. Osobennosti konstruksyy y teplovoi raboty vrashchaiushchykh pechei y perspektivnye napravleniya ykh usovershenstvovaniya // *Энерготехнологии y resursosberezheniye*. 2016. №4. S. 61-70. URI: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/159158>
6. Shcherbyna V. Yu., Lobko S. S., Vasylychenko H. N., Leleka S. V. O povyshenyyu enerhoefektyfnosti vrashchaiushchykh pechei // *Mizhnarodna naukova konferentsiia «Materialy dlia roboty v ekstremalnykh umovakh – 6»*, 1 – 2 hrudnia 2016 roku, m. Kyiv. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2016. S. 376-380. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/20392>
7. Trusova Y.A., Mendeleev D.V., Ratnykov P.Э. Vybor horelochnoho ustroystva pry proyzvodstve klynkera vo vrashchaiushchykh pechakh // *Lyte y metallurhiya*. 2011. # 1. S. 124-126.
8. Tskytyshvyly Э.О., Trotsenko L.N., Pykashov V.S. Rehulyrovanye parametrov fakela kak sredstvo ekonomyy toplyva pry obzhyhe yzvesty // *Энерготехнологии y resursosberezheniye*. 2013. # 1. S. 57- 64.
9. Trotsenko L.N., Pykashov V.S. Systema rehulyrovaniya temperaturnoho rezhyma vrashchaiushcheisia pechy // *Энерготехнологии y resursosberezheniye*. 2015. # 5-6. S. 88- 92.
10. Trotsenko L.N., Pykashov V.S., Vynohradova T.V. Povysheniye efektyvnosti nahreva y obzhyha syruchykh materialov vo vrashchaiushchykh pechakh // *Metallurh. y hornorud. prom-st.* 2014. # 5. S. 101-104.
11. Khrestomatiya enerhosberezheniya: Sprav. / Pod red. V.H.Lysyenko. M.: Teplotekhnika, 2003. 688 s.
12. Detkov S.P., Erynov A.E. Teplovye protsessy v pechnykh ahrehatakh aliumynyevoi promyshlennosti. Kyev : Nauk. dumka, 1987. 270 p.
13. Kolodiaznyi V.S., Hubynskyi M.V., Pererva Ya. y dr. Razrabotka efektyvnogo sposoba teployzoliatsyy metallurhicheskyykh ahrehatov // *Trudy XVI Mezhdunar. konf. «Teplotekhnika y enerhetyka v metallurhiyu»*, Dnepropetrovsk, Ukraina, 4-6 okt. 2011 h. Dnepropetrovsk: Nats. metallurh. akad. Ukrainy, 2011. S. 107-108.
14. Shcherbyna V.Yu. Sakharov O.S., Samylenko Yu.V., Bobakh V.V. Doslidzhennia termomekhanichnykh navantazhen v obertovii pechi z vykhrovyim teploobminnykom / *Naukovi visti NTUU "KPI"*. 2009. # 6. S. 26-33.
15. Lentsov Y.A. Teplovoi balans vrashchaiushcheisia pechy dlia obzhyha yzvestniaka y eho analiz // *Visnyk Pryazov. derzh. tekhn. un-tu. Ser. Tekhnichni nauky*. 2014. Vyp. 29. S. 103-115.
29. Shcherbina V., Shvachko D., Borshchik S. 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)*, 2019, pp. 36-41. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.189169>
17. Sharykov Yu.V., Markus A.A. Matematycheskoe modelirovaniye teplovykh polei vo frahmente futerovky vrashchaiushcheisia pechy / *Metallurh.* 2013. # 12, s. 23-26.
18. Shcherbyna V.Yu., Shvachko D.H., Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti obertovykh teplovykh ahrehativ / *VChENI ZAPYSKY TAVRIISKOHO NATSIONALNOHO UNIVERSYTETU IMENI V.I. VERNADSKOHO Seriia: Tekhnichni nauky Tom 29 (68), Ch.2, # 4, 2018, str. 68-72.* URL:[http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/4\\_2018/part\\_2/15.pdf](http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/4_2018/part_2/15.pdf)
19. Shcherbyna V.Yu., Shvachko D.H., Efymenko E.A., Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu obertovoho teplovoho ahrehatu // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut"*. Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia. 2018. # 1. S. 65-71, DOI: <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2018.143382>
20. Shvachko D.H., Shcherbyna V.Yu. Metodyka operatyvnoho rozrakhunku teplovoho rezhymu v fasonnomu vohnetryvi // *Visnyk NTUU «KPI im. Ihoria Sikorskoho»*. Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia. #1(18), 2019, s. 102-109. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171193>
21. Samarskyi A.A., Vabyshcheych P.N. Vychyslytelnaia teploperedacha. M: Edytoryal URSS, 2003. 784 s.
22. Shcherbyna V.Yu., Shvachko D.H. Modeliuvaniya protsesu nestatsionarnoho teploobminu v futerivtsi obertovykh ahrehativ / *Visnyk NTUU «KPI im. Ihoria Sikorskoho»*. Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia. #2(19), 2020, s. 20-31. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2020.208052>
23. Fabian Herz Prozess modellierung von direkt befeuerten Drehrohröfen zur Beurteilung der thermischen Belastung des Feuerfestmaterials // *Keramische Zeitschrift volume 70, pages26–35(2018)* DOI: <https://doi.org/10.1007/s42410-018-0003-1>
24. F. Herz, I. Mitov, E. Specht & R. Stanev (2015) 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, 174-188, DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2013.854283>
25. Promtov M.A. Mashyny y apparaty s ymпульсным энергетическим воздействием на обрабатываемые вещества: Учебное пособие. М.: «Yzdatelstvo Mashynostroeniye-1», 2004. 136 p.
26. Ostrovskiy H.M. (red.), Abyev R.Sh., Aleksandrov V.M., y dr. Noviy spravochnyk khymyky y tekhnoloha. Protsessy y apparaty khymycheskyykh tekhnolohiyi. II-SP b.: NPO «Professyonal», 2006. 916 p.