

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.067>

27. Wang, X. F., Jin, B. S., Zhong, W. Q. (2009). Three-dimensional simulation of fluidized bed coal gasification, *Chem. Eng. Process*, vol. 48, pp. 695-705. DOI: 10.1016/j.ccep.2008.08.006
28. Xue, Q., Fox, R. O. (2014). Multi-fluid CFD modeling of biomass gasification in polydisperse fluidized-bed gasifiers, *Powder Technol.*, vol. 254, pp. 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.025>
29. Yu, G. B., Chen, J. H., Li, J. R., Hu, T., Wang, S., Lu, H. L. (2014). Analysis of SO₂ and NO_x emissions using two-fluid method coupled with eddy dissipation concept reaction sub model in circulating fluidized bed combustors, *Energy Fuels*, vol. 28, pp. 2227-2235. DOI: 10.1021/ef402341p
30. Zhou, W., Zhao, C. S., Duan, L. B., Chen, X. P., Liang, C. (2011a). Two-dimensional computational fluid dynamics simulation of nitrogen and sulfur oxides emissions in a circulating fluidized bed combustor, *Chem. Eng. J.*, vol. 173, pp. 564-573. DOI:10.1016/j.ccej.2011.07.083.
31. Desroches-Ducarne, E., Dolignier, J. C., Marty, E., Martin, G., Delfosse, L. (1998). Modelling of gaseous pollutants emissions in circulating fluidized bed combustion of municipal refuse, *Fuel*, col. 77, pp. 1399-1410. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00060-X).
32. Gomez-Barea, A., Leckner, B. (2010). Modeling of biomass gasification in fluidized bed, *Progress Energy Combust. Sci.*, vol. 36, pp. 444-509. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.12.002.
33. Xie, J., Zhong, W. Q., Jin, B. S., Shao, Y. J., Liu, H. (2014b). Three-dimensional Eulerian-Eulerian modeling of gaseous pollutant emissions from circulating fluidized bed combustors, *Energy Fuels*, vol. 28, pp. 5523-5533.

УДК 66.041.491

**ЩЕРБИНА В. Ю., д.т.н., професор; ШВАЧКО Д. Г., магістр, асистент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ФУТЕРІВЦІ ОБЕРТОВИХ АГРЕГАТІВ

Збільшення стійкості вогнетривкої футерівки обертових теплових агрегатах в є важливим заходом при підвищенні ефективності їх використання. В роботі виконаний розрахунок температурного режиму в футерівці заповненої матеріалом з використовується диференціального рівняння нестационарної теплопровідності. Числовий розрахунок здійснюється з використанням методу скінчених різниць по явній схемі. Для візуалізації і виведення графічної інформації використовуються програми на мові AutoLisp в середовищі AutoCAD. Рух матеріалу моделюється зміною значення коефіцієнту тепловіддачі до внутрішньої поверхні футерівки в місті його розташування, враховуючи його переміщення.

В процесі роботи обертової печі її футерівка витримує циклічну зміну температур. Так її внутрішня поверхня, при потраплянні під шар матеріалу, охолоджується до 1246 °С, в порівнянні з початковою 1465 °С. При цьому інтенсивна зміна температур, особливо в поверхневих шарах футерівки сприяє виникненню найбільших градієнтів, що викликає значні термічні напруження і в реалі може призвести до руйнування футерівки. Глибина шару проникнення змінної температури в футерівку, визначена по амплітуді коливань 0.01, знаходиться до глибини 70 мм, при загальній товщині футерівки 230 мм.

Результатом проведених досліджень є розробка математичної моделі, алгоритмів та програмного забезпечення для розрахунку і вивчення процесу нестационарного теплообміну в футерівці обертових агрегатів. Визначено еволюцію і розподіл температур та теплових потоків в футерівці. Отримані значення інтенсивності теплового потоку дозволяє характеризувати вплив технологічних параметрів роботи агрегату на температурний та тепловий режим футерівки та обертової печі в цілому.

Результати розрахунку також приведені в електронному додатку до статті у вигляді відео файлів.

Ключові слова: обертова піч, тепловий потік, теплопередача, вогнетривка футерівка, температура, амплітуда

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2020.208052

© Щербина В. Ю., Швачко Д. Г., 2020.

Постановка проблеми. Обертові теплові агрегати, або обертові печі, знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості де зазвичай використовуються для термічної обробки сипких матеріалів [1, 2, 6, 7–9]. Робота більшої частини таких апаратів вимагає спеціальних заходів по підвищенню їх надійності, безпеки та довговічності. Особливо це стосується футерівки печі яка призначена для зменшення втрат тепла в оточуюче середовище, захисту металевого корпусу від абразивної дії матеріалу та ефективного використання тепла в робочому просторі печі. Футерівка, та вогнетриви з яких вона виконана, є важливими елементами обертової печі, надійність яких суттєво впливає на продуктивність, безпеку роботи та забезпечення довгострокової і надійної роботи пічного агрегату.

Характерними особливостями стану футерівки є наявність зносу, розходження, випадання і зсув вогнетривів, тощо. Вогнетривкий матеріал, з якого виготовляється футерівка, може хімічно реагувати з матеріалами, що завантажуються в піч. Причинами швидкого виходу з ладу вогнетривів можуть бути, наприклад, розплавлення, виникнення додаткових термо-механічних навантажень або тепловий удар, що періодично отримують вогнетриви при експлуатації.

Аналіз показує, що збільшення стійкості вогнетривкої футерівки, тобто продовження строку її служби, є важливим заходом при підвищенні ефективності використання печей. Результатом цього є збільшення коефіцієнту використання, підвищення продуктивності, безпеки і безаварійності експлуатації високопродуктивних обертових печей та строку служби вогнетривкої футерівки. Тому робота, присвячена удосконаленню теоретичної моделі теплообміну в обертової печі є вкрай актуальною так як сприяє інтенсифікації її роботи та дає можливість реалізувати більш інтенсивні режими роботи теплового агрегату.

Аналіз попередніх досліджень. Існує значна кількість досліджень з використанням математичних моделей теплової роботи обертових печей, але саме їх кількість і суттєві відмінності для однотипних печей вказують на їх недосконалість. Замкнута система рівнянь часто складається з спрощень і узагальнень для найважливіших фізико-хімічних процесів, особливо тепло- і масообміну, що часом спотворюють фізику процесу [1]. Недолік інформації пояснюється значною складністю і недостатньою вивченістю механізму теплопереносу в умовах чисельних технологічних процесів при роботі пічних агрегатів. Аналіз теплової роботи конкретних технологічних систем базується в основному на вивченні емпіричних даних та оцінці теплових балансів печей [5, 21–25]. Практична цінність такого підходу незначна, так як модель виявляється частковою і малопринятною при зміні умов розрахунку.

В літературі розглянуто багато моделей теплопередачі для числового дослідження футерівки обертових печей [13–20]. Автори користуються різними методами, та використовують математичні моделі, що описують теплообмін між газовим потоком, стінкою печі, шаром сипкого матеріалу та оточуючим середовищем:

- розроблена аналітична одномірна модель для прогнозування впливу різних змінних в печі на регенеративний теплообмін між стінкою та футерівкою обертової печі. Основою моделі є введення шару з постійною теплоємністю і нескінченною теплопровідністю в радіальному напрямку. Товщина цього шару визначається по проникненню тепла в нескінченною тіло [13,14];

- в роботі [15, 16] для визначення температур в футерівці застосовується ковзка сітка з використанням програмного забезпечення FLUENT. Температурні поля, отримані при рішенні задачі мають симетрію на ділянці нагріву та охолодження футерівки, тобто при входженні та виході її в контакт з матеріалом. Вказане не відповідає значенням фізичного експерименту;

- в роботі [17] використовується розроблена математична модель для прогнозу руху матеріалу в обертових циліндрах. Розрахунок базується на балансі маси та імпульсу з фізично заданими відомими вихідними умовами, а масова витрата та швидкість на поверхні матеріала можливо передбачити як функцію швидкості обертання, діаметра циліндра та ступеня наповнення;

- в роботах [18, 19, 20] запропонована розроблена математична модель в якій враховані профілі температури сипкого матеріалу, газу, вогнетривкої обертової печі. Використання рекомендується для розрахунку обертових теплових агрегатів з зовнішнім підігрівом і призначена для теоретичного визначення умов для поліпшення якості продукції з оптимізацією умов виробничого процесу з точки зору енергоспоживання. Однак у вказаній моделі не враховується не стаціонарність процесу, що моделюється числом обертів та не визначається час прогріву футерівки при виході на квазістаціонарний режим тобто в режим рекуперативного теплообміну.

Експериментальні дослідження процесу теплообміну між футерівкою печі та сипким матеріалом описані в роботах [7, 21–25]. Але експериментальний підхід не дає можливості вирішити проблему повністю. В цьому випадку відсутня узагальненість результатів. Тобто дані отримані в результаті конкретних досліджень можливо застосувати тільки до розглянутих апаратів з незначними змінами умов проведення експерименту, що не дає можливості оптимізувати параметри створюваних промислових апаратів і установок.

Метою даної дослідницької роботи є розробка та використання математичної моделі, яка дає можливість прогнозувати еволюцію, розподіл температур та теплових потоків в футерівці обертової печі заповненої матеріалом з дослідженням циклічності температурних впливів. Використовується розроблене програмне забезпечення та проводиться числовий аналіз отриманих результатів.

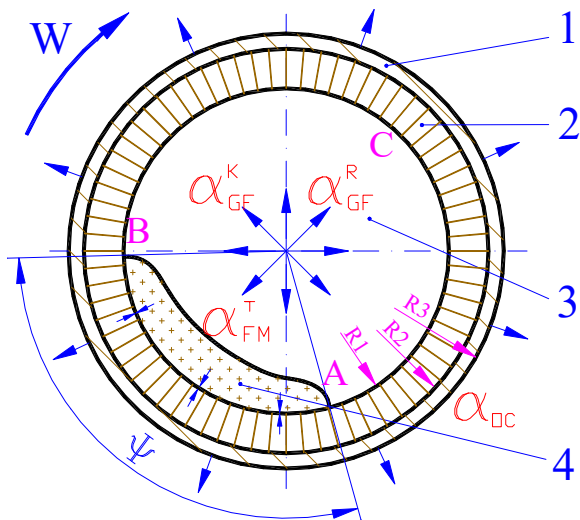
Виклад основного матеріалу.

Футерівку обертової печі можливо класифікувати як елемент, що має одночасно зовнішній і внутрішній нагрів – зв'язаний теплообмін, що потребує спільного рішення зовнішньої і внутрішньої задачі, при якому температура підлягає визначенню. Крім того відбувається досить складний процес передачі тепла при обертанні печі, особливо у внутрішній частині, де одночасно відбувається теплообмін за рахунок випромінювання та конвекції від газу до футерівки і матеріалу та теплопровідності між шаром сипкого матеріалу та футерівкою.

Зміна температури внутрішньої поверхні футерівки в часі носить циклічний характер після виходу печі на квазістаціонарний режим. Час циклу дорівнює часу повного оберту печі, який умовно ділиться на два періоди. У першому вогнетриві футерівки знаходиться в контакті з газовим потоком і поступово нагрівається, отримуючи від потоку тепло випромінюванням і конвекцією. При другому відбувається контакт вогнетривів з матеріалом, який нагрівається. В цей час температура поверхні вогнетривів зменшується. Коливання температури, що досягають на внутрішній поверхні вогнетривів футерівки, при вході і виході їх з-під шару матеріалу може досягати 150 °C – 250 °C [1, 3, 4], в залежності від швидкості обертання, кількості матеріалу, розташування енергетичної зони печі та інших факторів.

Постановка задачі.

В роботі виконаний розрахунок температурного режиму у вогнетривах футерівки при обертанні печі та



1 – металевий корпус печі; 2 – вогнетриви футерівки; 3 – газовий потік; 4 – матеріал;

Рис.1 – Передача тепла в обертовій печі

виконаний аналіз впливу частоти обертання при заповненні печі сировинним матеріалом. На рис. 1 показана схема перерізу печі з умовними позначеннями, що використовуються для моделювання теплообміну. Завдання, по визначенню температури футерівки, вирішується виходячи з умов теплообміну між сировинним матеріалом, теплоносієм і футерівкою у робочому просторі печі та теплообміну металевому корпусу з оточуючим середовищем. Сировинний матеріал покриває футерівку від впливу газового потоку на дузі АВ, що відповідає куту заповнення Ψ . Відкрита поверхня знаходиться на дузі АСВ. В подальших розрахунках точки А, В та С використовуються як контрольні для порівняння результатів розрахунку. Початок відліку знаходиться в центрі печі на перетині осей симетрії. Процес теплообміну розглядається до тих пір доки піч не виходить на квазістаціонарний тепловий режим.

Опис математичної моделі. При вирішенні вказаної задачі використовується відоме диференціальне рівняння в частинних

похідних для нестационарної теплопровідності в циліндричній системі координат у двовимірній постановці [2, 11]. Осьова теплопровідність уздовж печі, не враховується, оскільки довжина обертової печі значно перевищує діаметр. Рівняння має вигляд:

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

де T – температура; a – коефіцієнт теплопровідності; τ – час; φ – кут відносно центру печі, r – радіальна координата.

Граничні умови, для рішення рівняння (1), задаються виходячи наступних припущень:

- контакт між футерівкою і матеріалом визначається кутом Ψ , величина якого залежить від кількості матеріалу та кута природного укусу сипкого матеріалу в динамічному стані;
- теплофізичні константи вогнетриву і металевго корпусу (щільність, теплоємність, теплопровідність, ступінь чорноти) є постійними в даному перетині печі і не залежать від температури, але вони можуть змінюватись відповідно до довжини енергетичних зон та печі в цілому;
- температура газового потоку (T_G) приймається постійною по перетину;
- температура матеріалу, що оброблюється (T_M) приймається сталою по перетину (без підігріву), в зв'язку з його постійним оновленням за рахунок надходження із сусідніх енергетичних зон;
- в зоні замикання кільця футерівки по кутовому напрямку діють наступні умови

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

- в місці контакту металевго корпусу та футерівки використовуються граничні умови 4 роду:

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

де λ_F, λ_K – коефіцієнт теплопровідності футерівки та внутрішньої металевго оболонки корпусу; T_F, T_{K1} – температура поверхні футерівки та корпусу;

- на зовнішній поверхні металевго корпусу ($r=R_3$) граничні умови записується у вигляді:

$$-\lambda_K \frac{\partial T_{KZ}}{\partial r} = \alpha_{ef} (T_{KZ} - T_{OC}), \quad (4)$$

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

- щільність теплового потоку на поверхні футерівки, відповідно закону Фур'є, визначається з виразу:

$$q = -\lambda_F \frac{\partial T_{FV}}{\partial n}. \quad (5)$$

де T_{FV} – температура внутрішньої поверхні футерівки; n – нормаль.

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

$$\alpha_{GF}^{KR} = \alpha_{GF}^K + \alpha_{GF}^R \quad (6)$$

де $\alpha_{GF}^K, \alpha_{GF}^R$ – складові теплообміну: конвективна та випромінювання.

Складову випромінювання коефіцієнта тепловіддачі від газу до футерівки, при умові $T_G > T_F$ знаходять з наступного виразу [2, 3]

$$\alpha_{GF}^R = \frac{5.68 \varepsilon_F}{T_G - T_F} \left[\varepsilon'_G \left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \varepsilon''_G \left(\frac{T_F}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

де T_G і T_F – температура газу та футерівки; ε_F – ступінь чорноти футерівки при $T=T_F$; $\varepsilon_G, \varepsilon'_G$ – ступінь чорноти газу при $T=T_G$.

Ступінь чорноти газового потоку при середній температурі газу:

$$\varepsilon'_G = (\varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O} - \Delta \varepsilon) + \varepsilon_T - (\varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O} - \Delta \varepsilon) \varepsilon_T. \quad (8)$$

де $\Delta\varepsilon$ – поправка на взаємне перекриття полос; ε_T – ступінь чорноти пилу в потоці; $\varepsilon_{CO_2}, \beta\varepsilon_{H_2O}$ – коефіцієнт випромінювання CO_2 і H_2O при середній температурі газів з урахуванням поправки на парціальний тиск H_2O .

Ступінь чорноти твердих пилу в газовому потоці:

$$\varepsilon_T = 1 - e^{-\frac{\gamma^* \tau^* T_G}{0,75 \cdot 273 \cdot \mu \cdot S}} \quad (9)$$

де μ – концентрація твердих частинок в газах; γ – густина частинок пилу в потоці; $S=0.9D$ – довжина шляху, що проходить енергія випромінювання.

Ступінь чорноти газового потоку при середній температурі футерівки:

$$\varepsilon_z'' = (\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}) + \varepsilon_T - (\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}) \cdot \varepsilon_T \quad (10)$$

Конвективну складову коефіцієнта тепловіддачі від газу до футерівки знаходять з наступного виразу [2]

$$\alpha_{GF}^K = \frac{Nu \cdot \lambda_G}{D_p} = \frac{0,418 \cdot Re^{0,67} \cdot \lambda_G}{D_p} = \frac{0,418 \cdot \lambda_G}{D_p} \left(\frac{\omega_G D_p}{\nu_G} \right)^{0,67} \quad (11)$$

де ω_G – швидкість газового потоку у вільному перерізі печі; D_p – внутрішній діаметр печі; ν_G, λ_G – в'язкість та теплопровідність газів.

Швидкість газів у вільному перерізі:

$$\omega_G = \frac{V_G B_M}{D_p^2 (1 - F_M / F_p)} \frac{T_G}{273} \quad (12)$$

де F_M, F_p – площа поверхні матеріалу та печі в перерізі; V_G – кількість газів на кг клінкера; B_M – продуктивність.

В'язкість та теплопровідність газів у вільному перерізі печі:

$$\nu_G(t) = V_G \left(\frac{V_{CO_2}}{\nu_{CO_2}} + \frac{V_{O_2}}{\nu_{O_2}} + \frac{V_{N_2}}{\nu_{N_2}} + \frac{V_{H_2O}}{\nu_{H_2O}} \right)^{-1} \quad (13)$$

$$\lambda_G(t) = \frac{V_{CO_2} \lambda_{CO_2} + V_{O_2} \lambda_{O_2} + V_{N_2} \lambda_{N_2} + V_{H_2O} \lambda_{H_2O}}{V_G} \quad (14)$$

Математична модель руху матеріалу вимагає окремого пояснення. Матеріал моделюється зміною значення коефіцієнту тепловіддачі до внутрішньої поверхні футерівки в місці його розташування:

$$-\lambda_F \frac{\partial T_{FV}}{\partial r} = \alpha_{FM} (T_{FV} - T_M), \quad (15)$$

де T_{FV} – температура внутрішньої поверхні футерівки; T_M – температура матеріалу; α_{FM} – коефіцієнт тепловіддачі між футерівкою та матеріалом.

Коефіцієнт тепловіддачі між футерівкою та матеріалом визначається з залежності [2, 3, 9]

$$\alpha_{FM}^T = \sqrt{60n\lambda_F C_F \gamma_F} \cdot I \cdot (L_{DF} + L_{DM}) \frac{T_G - T_M}{T_F - T_M} \quad (16)$$

де λ_F, C_F, γ_F – теплопровідність, теплоємність та щільність вогнетривів футерівки; n – число обертів печі в хвилину; I – конструктивний параметр (для печі $D=4.5$ м, $I=0.135$); L_{DF}, L_{DM} – довжина вільної дуги футерівки та матеріалу.

При розрахунках враховується переміщення матеріалу вздовж внутрішньої поверхні футерівки. Зміна положення залежить від швидкості обертання та кількості матеріалу. Зміщення на кут $\Delta\varphi$ відбувається після визначення по ітераціям сумарного проміжку часу, за який відбувається вказане переміщення.

При визначенні інтенсивності теплового потоку в зоні точки А, приведеної на рис.1, зазначимо, що досліджуючи рух сипкого матеріалу в обертових апаратах на фізичних моделях [23–25,] можливо

спостерігати, що матеріал в цій точці не повністю прилягає до футерівки, а «перекочується» залишаючи шпарини, які дозволяють футерівці одночасно контактувати з газовим потоком та частинками матеріалу. Тому для визначення тепловіддачі на інтервалі 0.1, від довжини дуги АВ, використовується коефіцієнт тепловіддачі який отримують апроксимуючи значення α_{GF}^R та α_{FM}^T . Тобто від зони відкритої футерівки до зони повного заповнення матеріалом.

Початкові умови, при $\tau = 0$, задаються температурою по товщині вогнетривів футерівки та корпусу, визначені з рішення стаціонарної задачі, яка описує теплопередачу з граничними умовами приведеними вище без врахування матеріалу, тобто:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (17)$$

На основі викладених методів розрахунку розроблений пакет програм, призначений для визначення температури та величини теплового потоку в футерівці обертової печі. Числовий розрахунок здійснюється ітераційно з використанням методу скінчених різниць по явній схемі [11]. В програмних модулях виконаних та алгоритмічній мові програмування C++ реалізовані числові моделі, а програми для візуалізації і виведення графічної інформації виконані на функціональній мові AutoLisp в середовищі AutoCAD. При порівнянні результатів розрахунків з фактичними й дослідними даними [3, 5, 14, 15, 18, 21], отримані результати не дають різких відхилень, які виходять за межі допустимих при практичному застосуванні.

Результати розрахунків. Для апробації отриманої математичної моделі та алгоритмів для розрахунку температурних полів використовувались геометричні розміри печі 4x60м. Температура газового потоку $T_G=1650$ °С, температура матеріалу, що оброблюється $T_M=1200$ °С, швидкість обертання печі становить 3.5 об/хв. Корпус печі включає футерівку, виконану з шамотного вогнетриву товщиною 0.23 м, та металеву сталеву оболонку – 0.03 м. Ступінь заповнення матеріалом становить 4,88 %, що відповідає куту $\Psi=72$ ° (рис. 1). При розрахунках використовувалась сіткова область, що включає 836 вузлів по колу, 31 вузол відносно загальної товщини корпусу.

Загальний характер розподілу температур в стінці обертової печі приведено на рис. 2.

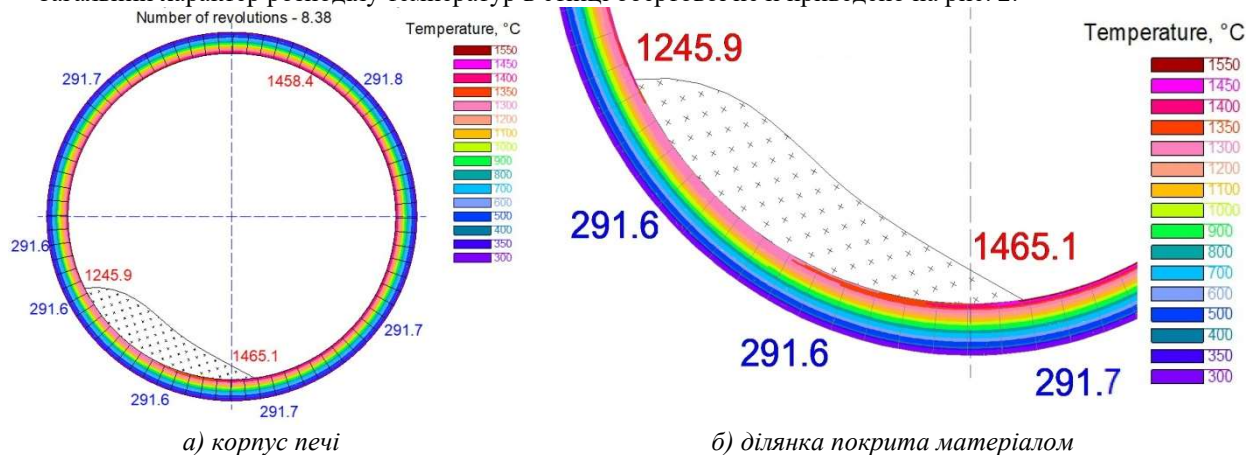


Рис.2 – Розподіл температур по стінці корпусу (сіткова модель показана спрощено)

З наведених даних видно, що внутрішня поверхня футерівки отримує тепло від газового потоку і прогрівається. На рис. 2а показано, що температура на внутрішній поверхні вища, і зменшується у напрямку до зовнішньої поверхні корпусу. На ділянці футерівка-матеріал частина тепла від футерівки потрапляє в матеріал який має меншу температуру. Тому температура на поверхні футерівки зменшується. Тобто футерівка виконує роль регенератора теплоти. Шар футерівки, який знаходиться на певній відстані від поверхні не так інтенсивно реагує на наявність матеріалу, і деякий час частково зберігає попередню температуру, що відображено на рис. 2б.

На рис. 3 показано розрахований розподіл температури на поверхні та всередині корпусу і щільність теплового потоку з внутрішньої поверхні футерівки. На графіках кут обертання відраховується по годинниковій стрілці відносно осі ОХ.

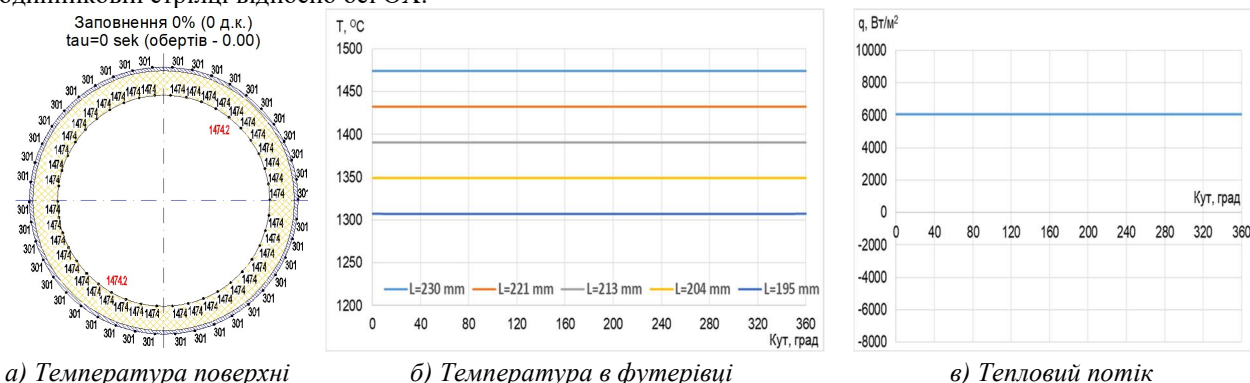


Рис.3 – Рішення для визначення початкових умов ($\tau = 0$)

На рис.3 приведено рішення стаціонарної задачі теплопровідності яке відповідає початковим умовам (17) та граничним умовам наведеним в (2)-(14). Фізично це рішення моделює роботу обертової печі без завантаження матеріалом. З рисунків видно, що в початковий момент часу температура внутрішньої поверхні футерівки $T_{FV}=1474.2$ °С, зовнішньої поверхні металевого корпусу $T_{KZ}=301.1$ °С, щільність теплового потоку між газом та футерівкою становить $q_r=6067$ Вт/м².

На рис.4 показані результати розрахунків по визначенню значень температур у корпусі печі та щільності теплового потоку на внутрішній поверхні футерівки при $\tau=9.0$ секунди, тобто 0.53 обертів печі.

З рис. 3 та рис. 4 видно, що на початку обертання печі температура ділянки футерівки вільної від матеріалу рівномірно прогріта до максимальної величини. Після контакту футерівки з матеріалом починається перерозподіл температур в поверхневих шарах, величина яких вказана на графіку.

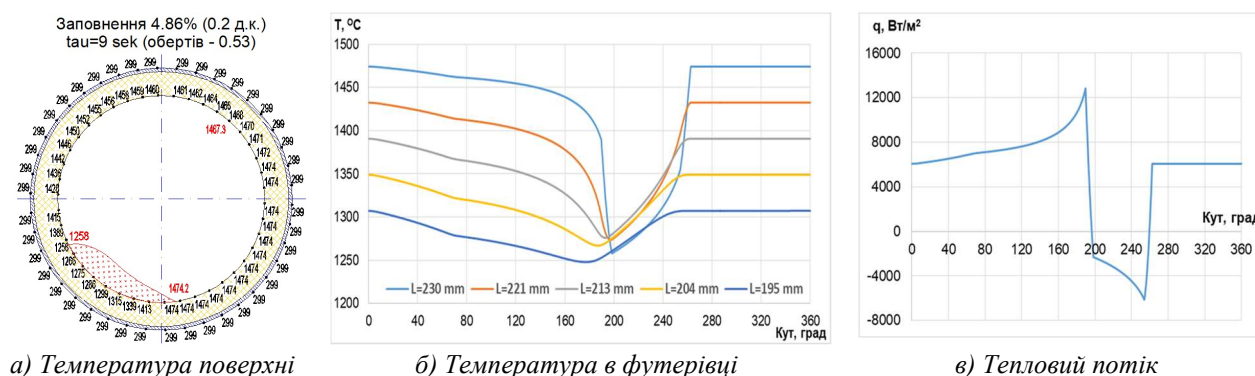


Рис.4 – Температура корпусу на 9.0 секунді (0.53 обертів)

При потраплянні під шар матеріалу температура футерівки різко зменшується, що пояснюється різницею температур і відповідно зміною теплового потоку. В наступні секунди знаходження футерівки під матеріалом її температура продовжує зменшуватись, але характер зміни більш повільний. При виході з під матеріалу (точка В, рис.1) температура становить 1258 °С. Під час подальшого обертання, та потраплянні футерівки в газовий потік відбувається повторний нагрів, що також викликає зміну величини теплового потоку. Числові дані для щільності теплового потоку показані на графіку 4б.

На рис.4 показані результати рішення задачі для часу 60.3 секунди, що відповідає 3.52 кількості обертів печі.

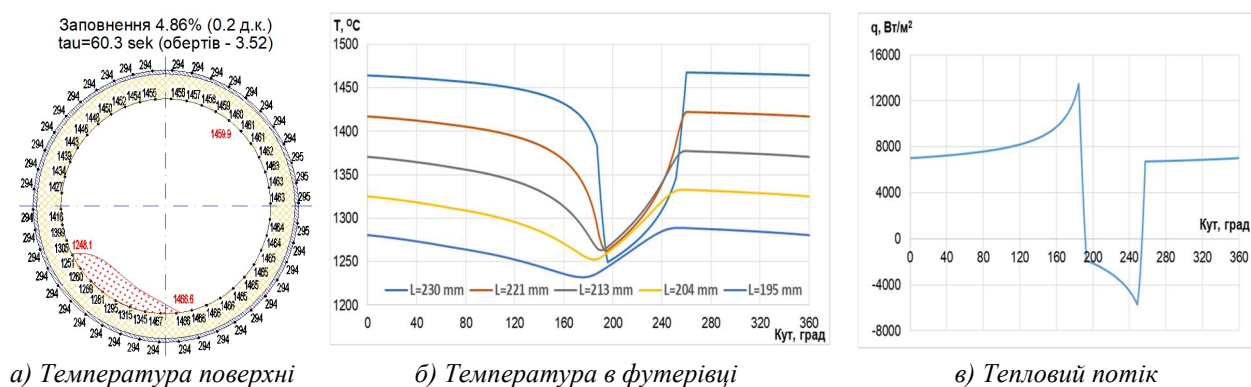


Рис.5 – Температура корпусу при виході на квазістаціонарний режим

З приведених графіків видно, що в процесі обертання печі, ділянка футерівки яка виходить з-під шару матеріалу (точка В на рис.1) починає контактувати з газовим потоком, що призводить до послідовного підвищення температури. В момент виходу температура футерівки зростає досить стрімко, після чого приріст температури сповільнюється. Потрапляючи в точку А (показана на рис.1) футерівка досягає рівня початкової температури. Вказане явище пояснює сутність процесу рекуперації теплоти футерівкою. Таким чином внутрішня поверхня футерівки печі нагрівається газовим потоком, а при потраплянні під шар матеріалу - охолоджується. Амплітуда температурних коливань становить 218.7 °С. Значення інтенсивності теплового потоку, приведені на рис. 5в, дозволяє характеризувати вплив технологічних параметрів роботи агрегату на температурний та тепловий режим футерівки та оберткової печі в цілому.

З рис. 5б чітко видно, що в місцях входу футерівки під матеріал і виходу її з-під шару матеріалу температура змінюється найбільш інтенсивно. Амплітуда зміни в цих місцях найбільша, що сприяє виникненню найбільших градієнтів і відповідно термічних напружень. Найбільші, за значенням коливання температури, знаходяться на зовнішній поверхні футерівки, що показано на графіках.

Потрібно зазначити, що періодичні знакозмінні температурні коливання призводять до руйнування поверхневого шару вогнетриву в залежності від глибини їх проникнення [11,12]. Це пов'язано з безупинною роботою печі з річним коефіцієнтом використання 0,94–0,96. Як наслідок протягом одного року вогнетрив футерівки печі витримує близько 500 тис. таких знакозмінних циклів. Вказана особливість може слугувати характеристикою режиму експлуатації та терміну роботи футерівки.

Глибина шару проникнення змінної температури в футерівку визначається як відношення на якому амплітуда коливань температури становить 0.01 від амплітуди коливання на поверхні. Можливо визначити, що в цьому випадку зміна температури відбувається на глибині до 70 мм, при загальній товщині футерівки 230 мм. Шари футерівки, що знаходяться глибше, мають суттєво менші коливання температури.

Слід зазначити, що температура внутрішньої поверхні футерівки, в порівнянні з пачю без матеріалу, суттєво змінюється. Так для точки В вона зменшилась на 228.4 °С, для точки А – на 15.8 °С, точки С 9.2 °С. Температура зовнішньої поверхні металевого корпусу зменшилась на 9.4 °С, що пояснюється передачею частини тепла матеріалу який обпалюється.

Дані по значенням температур в контрольних точках А та В та значення теплового потоку для різного числа обертів наочно показують, яким чином під пач виходить на квазістаціонарний режим, тобто виникає стаціонарне поле температур, де температурний градієнт в даній точці не змінюється з часом. Аналіз даних температурних полів та теплового потоку показує, що вихід на режим відбувається після 3-4 оберту печі.

Отримані при розрахунках результати також наведені у вигляді відео файлів в електронному додатку до статті.

Висновки.

1. Розроблена математична модель для дослідження процесу нестационарного теплообміну в футерівці оберткових агрегатів враховуючи матеріал, що обробляється.
2. Використовуючи метод скінчених різниць розроблено методику, алгоритми та програмне забезпечення для розв'язання задач нестационарної теплопровідності в циліндричній системі координат для розрахунку барабанних теплових агрегатів.
3. Проведені числові розрахунки та визначено еволюцію і розподіл температур та теплових потоків в футерівці оберткових печей.

4. На основі аналізу інтенсивності зміни теплових потоків досліджена можливість визначення ефективності рекуперації тепла футерівкою, що дозволяє характеризувати вплив технологічних параметрів на температурний та тепловий режим футерівки та обертової печі в цілому.

5. Визначена глибина проникнення та амплітуда знакозмінних температурних коливань які призводять до руйнування поверхневого шару вогнетривів футерівки за рахунок виникнення термічних напружень.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому планується промоделювати процес заповнення печі матеріалом та визначити вплив ефекту зношення футерівки при роботі обертової печі.

Список використаної літератури

1. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 2 / Под ред. В. Г. Лисиенко. Москва, Теплотехник, 2004. 592 с.
2. Щербина В. Ю. Развитие теории та усовершенствования технологических процессов при производстве строительных материалов у высокотемпературных агрегатах: диссертация ... доктора технических наук: 05.17.08 // Щербина Валерій Юрійович; Київ, 2017. 393 с.
3. Ходоров Е. И. Печи цементной промышленности. Москва, Изд.лит. по ст-ву, 1968. 453с.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. Fabian Herz, Eckehard Specht, Abdulkadir Abdelwahab, Modeling and Validation of the Siderite Decomposition in a Rotary Kiln, Energy Procedia, Volume 120, 2017, Pages 524-531, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.193>.
8. Li, X. and Wang, T., (2005) Analysis of Energy Savings by Painting the Calcining Kiln Surface, ECCS Report 2005-06, Energy Conversion and Conservation Center, University of New Orleans, submitted to CII Carbon, LLC, June
9. Aainaa Izyan Nafsun, Fabian Herz, Eckehard Specht, Viktor Scherer & Siegmart Wirtz (2016) Heat Transfer Experiments in a Rotary Drum for a Variety of Granular Materials // Experimental Heat Transfer, 29:4, 520-535, DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2015.1036180>.
10. 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>.
11. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
12. Щербина В. Ю. Моделирование возможности образования сколов в огнеупорах футеровки вращающейся печи // Огнеупоры и техническая керамика. 2011, № 9, с. 26-30.
13. Sri Silvia Agustini, Andreas Queck & Eckehard Specht (2008) Modeling of the Regenerative Heat Flow of the Wall in Direct Fired Rotary Kilns, Heat Transfer Engineering, 29:1, 57-66, DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630701677171>.
14. Xiao Yan Liua Eckehard Spechtb Temperature distribution within the moving bed of rotary kilns: Measurement and analysis // Process Intensification Volume 49, Issue 2, February 2010, Pages 147-150, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.01.008>.
15. Zexuan Zhang, Ting Wang. Investigation of Combustion and Thermal-Flow Inside a Petroleum Coke Rotary Calcining Kiln With Potential Energy Saving Considerations // J. Thermal Sci. Eng. Appl. Mar 2013, 5(1): 011008 (10 pages), DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4007914>.
16. Zhao, L., and Wang, T., 2009, "Investigation of Potential Benefits of Using Bricks of High Thermal Capacity and Conductivity in a Rotating Calcining Kiln," ASMEJ. Thermal Sci. Eng. Appl., 1 (1), p. 011009.10.1115/1.3192772, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3192772>.

17. Jochen, M., Eckehard, S., Xiaoyan L. (2004) Prediction of Rolling Bed Motion in Rotating Cylinders, *AIChE Journal*, 50, pp. 2783-2793, DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.10266> .
18. Herz, F.: Entwicklung eines mathematischen Modells zur Simulation thermischer Prozesse in Drehrohröfen. PhD Thesis University Magdeburg, Docupoint Verlag GmbH, Magdeburg, 2012 (ISBN 978-386912-075-1).
19. Fabian Herz Prozess modellierung von direkt befeuerten Drehrohröfen zur Beurteilung der thermischen Belastung des Feuerfestmaterials // *Keramische Zeitschrift* volume 70, pages 26–35 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1007/s42410-018-0003-1>.
20. Rayko Stanev, Iliyan Mitov, Eckehard Specht, Fabian Herz. Geometrical characteristics of the solid bed in a rotary kiln // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 49, 1, 2014, 82-89, URL: <https://dl.uctm.edu/journal/node/j2014-1/14-Raiko%20Stanev-82-89.pdf>.
21. Dhanjal, S.K., Barr, P.V. & Watkinson, A.P. The rotary kiln: An investigation of bed heat transfer in the transverse plane. *Metall and Materi Trans B* 35, 1059–1070 (2004). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-004-0062-0>.
22. 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>.
23. A.I. Nafsunab, F. Herzae, E. Spechta, H. Komossac, S. Wirtzc, V. Schererc, X. Liud Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters // *Chemical Engineering Science* Volume 160, 16 March 2017, Pages 346-353, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.005>
24. A.I. Nafsun F. Herz Experiments on the temperature distribution in the solid bed of rotary drums // *Applied Thermal Engineering* Volume 103, 25 June 2016, Pages 1039-1047, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.128>.
25. Wei-Ning Wu, Xiao-Yan Liu, Zhou Hu, Fabian Herz, Eckehard Specht. Measurement of the local material depth in a directly-heated pilot rotary kiln based on temperature fields // *Powder Technology* Volume 330, 1 May 2018, Pages 12-18, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.005>.

Надійшла до редакції 18.04.2020

Shcherbina V. Yu., Shvachko D. G.

MODELING OF THE PROCESS OF NON-STATIONARY HEAT EXCHANGE IN THE LINING OF A ROTATING UNIT

Rotating heat units, or rotary kilns, are widely used in many industries where they are used for heat treatment of bulk materials. The efficiency of use largely depends on the reliable operation of the main structural elements. This is especially true of the lining of the furnace, the reliability of which significantly affects the performance, safety and long-term and reliable operation of the furnace unit. Therefore, the work devoted to the improvement of the theoretical model of heat exchange in a rotary kiln is extremely relevant as it contributes to the intensification of its work and makes it possible to implement more intensive modes of operation of the heat unit.

The calculation of the temperature regime in the lining of the rotating furnace and filled with the processed material is performed. The differential equation for non-stationary thermal conductivity is used. Numerical calculation is performed iteratively using the finite difference method according to an explicit scheme. AutoLisp programs in the AutoCAD environment are used to visualize and display graphical information. The movement of the material is modelled by changing the value of the heat transfer coefficient to the inner surface of the lining in the place where it is located. This takes into account the movement of the material along the inner surface of the lining. The change in position depends on the speed of rotation and the amount of material. The shift of the material layer by the angle $\Delta\varphi$ occurs after determining by iteration the total time period for which the indicated displacement occurs.

At the beginning of the rotation of the furnace, the temperature of the lining area free of material is evenly heated to the maximum value. After contact of the lining with the material begins the redistribution of temperatures in the surface layers. The inner surface of the lining of the furnace is heated by a gas stream, and when it gets under the layer of material - is cooled to 1246 °C, compared with the initial 1465 °C. At the time of exit, the temperature of the lining rises quite rapidly, after which the temperature rise slows down. After one revolution, the lining reaches the initial temperature level. This phenomenon explains the essence of the process of heat recovery by lining. In general,

the amplitude of temperature fluctuations on the outer surface of the lining is 218.7 °C. At the same time intensive change of temperatures promotes emergence of the largest gradients and accordingly thermal stresses especially in a zone where there is a processed material. The depth of penetration of the variable temperature into the lining is defined as the ratio at which the amplitude of temperature fluctuations is 0.01 from the amplitude of oscillations on the surface. It is possible to determine that in this case the temperature change occurs at a depth of up to 70 mm, with a total lining thickness of 230 mm. The layers of the lining, which are deeper, have significantly smaller temperature fluctuations.

Determining the intensity of heat flow allows to characterize the influence of technological parameters of the unit on the temperature and thermal regime of the lining and the rotary kiln as a whole. Analysis of the data of temperature fields and heat flux shows that the output to the quasi-stationary heat regime occurs after 4-5 revolutions of the furnace.

The result of this research is the development of a mathematical model, algorithms and software for calculating and studying the process of non-stationary heat transfer in the lining of rotating units. Numerical calculations are performed and the evolution and distribution of temperatures and heat fluxes in the lining are determined. The depth of penetration and the amplitude of alternating temperature fluctuations that lead to the destruction of the surface layer of the lining refractorines due to thermal stresses are determined.

The results of the calculation are also given in the electronic appendix to the article in the form of video files.

Keywords: rotary kiln, heat flux, heat transfer, refractory lining, temperature, amplitude

References

1. Lisienko V. G. Vrashchayushchiesya pechi: teplotekhnika, upravlenie i ehkologiya: [Rotary kilns: heat engineering, control and ecology:] spravochnoe izdanie : v 2 kn / V.G. Lisienko, Ya.M. Shchelokov, M.G. Ladygichev; pod red. V.G. Lisienko. - Moskva: Teplotekhnika, 2004. Kn.1.- 688 s.
2. Shcherbyna V. Yu. Rozvytok teorii ta udoskonalennia tekhnolohichnykh protsesiv pry vyrobnytstvi budivelnnykh materialiv u vysokotemperaturnykh ahrehatakakh: dysertatsiia ... doktora tekhnicheskyykh nauk: 05.17.08 Shcherbyna Valerii Yuriiovych; Kyiv, 2017. -393 s.
3. Khodorov E. Y. Pechy tsementnoi promyshlennosti. Moskva, Yzd.lyt. po st-vu, 1968. 453 s.
4. Shvachko, D., and Shcherbyna, V. (2019). "Metodyka operatyvnoho rozrakhunku teplovoho rezhymu v fasonnomu vohnetryvi", *Visnyk NTUU "KPI imeni Ihoria Sikorskoho"*. Seriya: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozbezhehennia, no 1, pp. 102-109. DOI:<http://dx.doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171193>.
5. Shcherbina V., Shvachko D., Borshchik S. (2019) Heat exchange simulation in energy zones of a rotarykiln 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>.
6. 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>.
7. Fabian Herz, Eckehard Specht, (2017) Abdulkadir Abdelwahab, Modeling and Validation of the Siderite Decomposition in a Rotary Kiln, *Energy Procedia, Volume 120, Pages 524-531*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.193>.
8. Li, X. and Wang, T., (2005) Analysis of Energy Savings by Painting the Calcining Kiln Surface, ECCC Report 2005-06, Energy Conversion and Conservation Center, University of New Orleans, submitted to CII Carbon, LLC, June
9. Aainaa Izyan Nafsun, Fabian Herz, Eckehard Specht, Viktor Scherer & Siegmart Wirtz (2016) Heat Transfer Experiments in a Rotary Drum for a Variety of Granular Materials // *Experimental Heat Transfer*, 29:4, 520-535, DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2015.1036180>.
10. Shcherbyna, V., Shvachko, D., and Yefymenko, Ye. (2018). "Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu obertovoho teplovoho ahrehatu", *Visnyk NTUU "KPI imeni Ihoria Sikorskoho"*. Seriya: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozbezhehennia, no 1, pp. 65-72. DOI:<http://dx.doi.org/10.20535/2306-1626.1.2018.143382>.
11. Samarskiy A. A., Vabyshhevykh P. N. Vyshyslytel'naja teploperedacha. M: Edytoryal URSS, 2003. 784 s.
12. Shcherbyna V. Ju. Modelyrovanye vozmozhnosti obrazovaniya skolov v oghneuporakh futerovky vrashhajushhejsja pechy // *Oghneupory y tekhnicheskaja keramyka*. 2011, #9, s. 26-30.

13. Sri Silvia Agustini, Andreas Queck & Eckehard Specht (2008) Modeling of the Regenerative Heat Flow of the Wall in Direct Fired Rotary Kilns, *Heat Transfer Engineering*, 29:1, 57-66, DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630701677171>.
14. Xiao Yan Liua Eckehard Spechtb (2010) Temperature distribution within the moving bed of rotary kilns: Measurement and analysis // *Process Intensification* Volume 49, Issue 2, February, Pages 147-150, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.01.008>.
15. Zexuan Zhang, Ting Wang. Investigation of Combustion and Thermal-Flow Inside a Petroleum Coke Rotary Calcining Kiln With Potential Energy Saving Considerations *J. Thermal Sci. Eng. Appl.* Mar 2013, 5(1): 011008 (10 pages), DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4007914>.
16. Zhao, L., and Wang, T., 2009, "Investigation of Potential Benefits of Using Bricks of High Thermal Capacity and Conductivity in a Rotating Calcining Kiln," *ASMEJ. Thermal Sci. Eng. Appl.*, 1 (1), p. 011009.10.1115/1.3192772, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3192772>.
17. Jochen, M., Eckehard, S., Xiaoyan L. (2004) Prediction of Rolling Bed Motion in Rotating Cylinders, *AIChE Journal*, 50, pp. 2783-2793, DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.10266>.
18. Herz, F.(2018) Entwicklung eines mathematischen Modells zur Simulation thermischer Prozesse in Drehrohröfen. PhD Thesis University Magdeburg, Docupoint Verlag GmbH, Magdeburg, 2012 (ISBN 978-386912-075-1).
19. Fabian Herz Prozess modellierung von direkt befeuerten Drehrohröfen zur Beurteilung der thermischen Belastung des Feuerfestmaterials *Keramische Zeitschrift* volume 70, pages26–35 DOI: <https://doi.org/10.1007/s42410-018-0003-1>.
20. Rayko Stanev, Iliyan Mitov, Eckehard Specht, Fabian Herz. (2014) Geometrical characteristics of the solid bed in a rotary kiln *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 49, 1, 82-89, URL: <https://dl.uctm.edu/journal/node/j2014-1/14-Raiko%20Stanev-82-89.pdf>.
21. Dhanjal, S.K., Barr, P.V. & Watkinson, A.P. (2004) The rotary kiln: An investigation of bed heat transfer in the transverse plane. *Metall and Materi Trans B* **35**, 1059–1070. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-004-0062-0>.
22. 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>.
23. A. I. Nafsunab, F. Herzae, E. Spechta, H. Komossac, S. Wirtzc, V. Schererc, X. Liud (2017) Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters *Chemical Engineering Science* Volume 160, 16 March 2017, Pages 346-353, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.005>
24. A. I. Nafsun F. Herz (2016) Experiments on the temperature distribution in the solid bed of rotary drums *Applied Thermal Engineering* Volume 103, 25 June 2016, Pages 1039-1047, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.128>.
25. Wei-Ning Wu, Xiao-Yan Liu, Zhou Hu, Fabian Herz, Eckehard Specht. (2018) Measurement of the local material depth in a directly-heated pilot rotary kiln based on temperature fields *Powder Technology* Volume 330, 1 May 2018, Pages 12-18, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.005>.