

¹І. В. Кузьо, ²Ю. П. Шоловій, ³Н. І. Магерус¹Національний університет «Львівська політехніка», ORCID: 0000-0001-9271-6505,
e-mail: Ihor.V.Kuzo@lpnu.ua²Національний університет «Львівська політехніка», ORCID: 0000-0003-0154-7983,
e-mail: Yurii.P.Sholovii@lpnu.ua³Національний університет «Львівська політехніка», ORCID: 0000-0003-1946-8503,
e-mail: Nadiia.I.Maherus@lpnu.ua

<https://doi.org/10.23939/istcipa2023.57>.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ОБЕРТОВИХ АГРЕГАТІВ

© Кузьо І. В., Шоловій Ю. П., Магерус Н. І., 2023

Мета роботи полягає у розробленні математичної моделі переміщення центру перерізу еліпсної обичайки в еліпсному бандажі для підвищення прямолінійності геометричної осі корпусу обертової печі в місці спирання, яка залежить від величин еліпсної підбандажної обичайки та бандажу, їх взаємного розташування на опорі, а також від орієнтування осей еліпсів поперечного перерізу обичайки один відносно одного на різних опорах. **Актуальність.** Якісне встановлення корпусу обертової печі визначається прямолінійністю його геометричної осі, причому не тільки в момент контролю, а й надалі – під час роботи агрегату. Очевидно, що за дотримання цієї умови можуть бути досягнуті оптимальні умови експлуатації агрегату, його надійність та довговічність. Однак на результати вимірювань і точність встановлення впливає така властивість об'єкта вимірювань, як відхилення форми корпусу від кругової циліндричної, особливо в місцях спирання. Нові підбандажні обичайки, що поставляються на монтаж, мають менші відхилення форми від кругової циліндричної, ніж ті, що були в експлуатації. Ці відхилення проявляються переважно як еліпсність чи овальність. Оскільки новий бандаж, як правило, не має інших спотворень форми, крім еліпсності, то для з'ясування картини слід розглянути переміщення центру перерізу еліпсної обичайки в еліпсному бандажі. **Методика.** Для поперечного перерізу опорного вузла з еліпсним бандажем та підбандажною обичайкою, використовуючи повний еліптичний інтеграл другого роду та його подачу у вигляді гіпергеометричного ряду, визначено координати центру еліпса перерізу обичайки в системі координат YOZ і надано детальний аналіз факторів та параметрів системи, що впливають на його положення. **Результати.** Положення геометричної осі корпусу в місці спирання залежить від величин еліпсності підбандажної обичайки та бандажу, їх взаємного розташування на опорі, а також від орієнтування осей еліпсів один відносно одного на різних опорах. Оскільки положення геометричної осі не залишається незмінним при обертанні корпусу, то оптимальним буде розташування центрів еліпсів розсіювання на одній прямій. **Наукова новизна.** Встановлено математичні залежності для визначення координат центру еліпса поперечного перерізу обичайки в системі координат YOZ , початок якої знаходиться в центрі кола умовного радіусу еліпса перерізу бандажу обертової печі. **Практична значущість.** Запропонована методика розрахунків дасть змогу у подальшому підвищити прямолінійність геометричної осі обертової печі, як в момент контролю, так і під час роботи агрегату.

Ключові слова: обертова піч, вісь обертання, прямолінійність геометричної осі, еліпсний поперечний переріз, бандаж, обичайка.

Вступ

Основна частина печі, що обертається як агрегат барабанного типу, – її корпус у вигляді металеві оболонки, звареної зі сталевих листів різної товщини. Від прямолінійності, жорсткості та міцності корпусу значною мірою залежить надійність роботи всієї печі. Робочими осями агрегатів

барабанного типу є вісь обертання та геометрична вісь корпусу. Геометрична вісь корпусу – лінія, що з'єднує послідовно розташовані центри тяжіння контурних кривих, утворених внутрішньою поверхнею корпусу в його поперечних перерізах. Вісь обертання печі, що обертається, – лінія, що з'єднує послідовно розташовані точки перетину осей обертання підбандажних обичайок із серединними площинами бандажів.

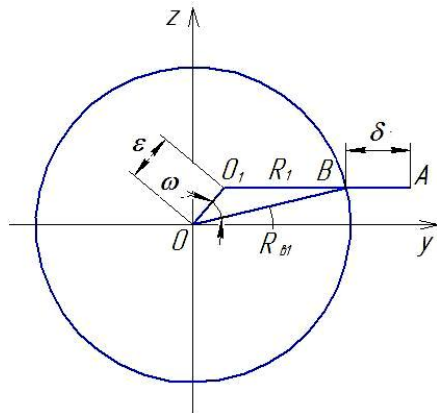


Рис. 1. Поперечний переріз корпусу та його розташування щодо опорної лінії

Fig. 1. Cross-section of the body and location relative to its reference line

Великогабаритні обертові печі використовують в багатьох виробничих процесах, включаючи сушіння, спалювання, нагрівання, охолодження, зволоження, кальцинацію та відновлення матеріалів. Сьогодні значну увагу приділено дослідженню процесів переміщення частинок матеріалу в обертових печах [1, 2] та поширенні температури у них [3, 4]. Однак ефективності роботи цих агрегатів також значною мірою залежить від монтажу, основним завданням якого є забезпечення прямолінійності робочих осей. Встановлення в проєктне положення фундаментних рам і вузлів опор створює всі передумови для дотримання цієї вимоги. Проте вимірювальні операції, пов'язані з контролем прямолінійності при монтажі корпусів, досить складні та відповідальні. Власне монтаж корпусу полягає у встановленні його на опорні вузли. Зважаючи на великі габаритні розміри агрегатів, проводиться встановлення окремих частин корпусу з подальшим стикуванням. Внаслідок жорсткості допустимих відхилень від прямолінійності геометричної осі корпусу контрольні-вимірювальні операції вимагають застосування відповідних методів та засобів контролю. Контроль прямолінійності осей здійснюють відносно закріплених опорних ліній чи стулочок. Традиційним є закріплення опорних ліній або стулочок поза агрегатом, незалежно від того, підлягає контролю порожня або цільна деталь [5, 6]. Про відхилення від прямолінійності судять за результатами вимірювання відстаней від опорної лінії або ступки до зовнішнього контура деталі і габаритних розмірів його поперечних перерізів.

На рис. 1 зображений поперечний переріз корпусу та розташування його відносно опорної лінії. Точка A – слід опорної лінії у площині перерізу; $O_1B=R_1$ – поточне значення радіус-вектора, кінець якого описує контур перерізу, що має випадкові відхилення від кругової форми; O_1 – центр тяжіння контурної кривої, що описує переріз; O – точка, що належить осі обертання деталі; $OB=R_{bi}$ – радіус обертання; ε – ексцентриситет центру тяжіння перерізу відносно осі обертання; ω – кут між ε та R_{bi} . Для трикутника OO_1B :

$$R_i^2 = \varepsilon + R_{bi}^2 - 2\varepsilon R_{bi} \cdot \cos\omega,$$

або

$$R_{bi}^2 - R_i^2 = \varepsilon \cdot 2R_{bi} \cdot \cos\omega - \varepsilon,$$

тоді

$$R_{bi} - R_i = \varepsilon \frac{2R_{bi} \cdot \cos\omega}{R_{bi} + R_i} - \frac{\varepsilon}{2R_{bi} + R_i}.$$

Якщо позначити $R_{bi} + R_i = \Delta$, отримаємо:

$$R_{bi} - R_i = \varepsilon \frac{1}{1 - \frac{\Delta}{2R_{bi}}} \cos\omega - \frac{\varepsilon}{2R_{bi} \cdot 1 - \frac{\Delta}{2R_{bi}}}.$$

Оскільки $\varepsilon \ll R_{bi}$ і на основі малості відношень $\frac{\Delta}{2R_{bi}}$ і $\frac{\varepsilon}{2R_{bi}}$ отримаємо:

$$R_{bi} = R_i + \varepsilon \cdot \cos\omega. \quad (1)$$

Щоб визначити непрямолінійність геометричної осі корпусу, необхідно виміряти значення l_{ei} в кожному із перерізів, що перевіряються. Для цього слід повертати корпус, вимірюючи значення l_{ei} через певні рівні кути повороту його деталі. При цьому l_{ei} буде змінюватися на:

$$\Delta l_i = R_{Bi} - R_{Bo}, \quad (2)$$

де R_{Bo} – значення радіуса обертання в початковий момент відрахування.

Крок кута повороту, що відраховується від осі OY :

$$\alpha = \omega + \alpha_0, \quad (3)$$

де α_0 – значення кута повороту в той момент, коли ε збігається з OB .

Положення центра обертання перерізу відносно опорної лінії:

$$\Delta l_i + l_b + R_{Bo} = R_0 + \varepsilon \cdot \cos(\alpha - \alpha_0). \quad (4)$$

Після введення позначень $\Delta l_i + l_b = l_i$; $\varepsilon \cdot \cos \alpha_0 = y$; $\varepsilon \cdot \sin \alpha_0 = z$ і $R_i - R_{Bo} = \Delta R$ вираз (4) набуде такого вигляду:

$$l_i = \Delta R + y \cdot \cos \alpha_i + z \cdot \sin \alpha_i, \quad (5)$$

де $i=1, 2, 3, \dots, n$ – число точок контуру, в яких відраховані величини l_i . Вирішуючи рівняння (5) для випадку множинної регресії способом найменших квадратів, отримаємо нормальні рівняння:

$$\begin{aligned} n\Delta R + \cos \alpha \cdot y + \sin \alpha \cdot z - l &= 0; \\ \cos \alpha \cdot \Delta R + \cos^2 \alpha \cdot y + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot z - l \cdot \cos \alpha &= 0; \\ \sin \alpha \cdot \Delta R + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot y + \sin^2 \alpha \cdot z - l \cdot \sin \alpha &= 0. \end{aligned}$$

$$\Delta R = \frac{l}{n}; \quad y = \frac{2(\varepsilon \cdot \cos \alpha)}{n}; \quad z = \frac{2(\varepsilon \cdot \sin \alpha)}{n}. \quad (6)$$

Після підстановки значень ΔR , y та z у рівняння (5) визначають значення l_i , а потім положення центру перерізу відносно опорної лінії. Однак положення центру перерізу, а також величини прямолінійності осі будуть визначені з похибкою, що дорівнює величині ексцентриситету ε . Для визначення цієї похибки слід зафіксувати кілька опорних прямих (щонайменше дві). У всіх випадках необхідний хоча б один поворот корпусу на кут 2π .

Під час монтажу можливість повороту корпусу на кут, більший $\pi/2$ або кратний йому, відсутня. Тому виділити значення ε з результатів вимірювань неможливо. У зв'язку з цим воно увійде до значення методичної систематичної похибки як складова частина, яка залежить від недосконалості методики вимірювання.

Якісне встановлення корпусу визначають прямолінійністю його геометричної осі, причому не тільки в момент контролю, а й надалі – під час роботи агрегату, особливо печі, що обертається. Очевидно, що за дотримання цієї умови можуть бути досягнуті оптимальні умови експлуатації агрегату, його надійність та довговічність.

Однак при фіксуванні опорних ліній або ступок поза корпусом у разі відсутності можливості повороту на результати вимірювань і точність встановлення впливає така властивість об'єкта вимірювань, як відхилення форми корпусу від кругової циліндричної. Насамперед це стосується відхилень форми в місцях спірання. Допустимі значення відхилень залежно від діаметра корпусу становлять 6...10 мм, допустимі значення відхилень від прямолінійності геометричної осі корпусу ± 3 мм [5].

Підвищення точності контролю та встановлення корпусу може бути досягнуто за рахунок ослаблення впливу систематичної похибки v_s . Її можна зменшити до значення, співрозмірного зі значеннями складових випадкових похибок, за рахунок перенесення опорної лінії всередину корпусу. Запропоновані у роботах [5, 6] метод та засоби контролю дають змогу досягти цього. Метод контролю прямолінійності геометричної осі корпусу полягає в знаходженні центрів тяжіння контурних кривих, утворених внутрішньою поверхнею корпусу в його поперечних перерізах, і подальшій перевірці їх взаємного розташування. Засоби контролю, що слугують для реалізації методу, є комплектом приладів, що складаються з шукача центру тяжіння контурних кривих поперечних перерізів оптичного або лазерного приладу для закріплення опорної прямої, приймальних пристроїв і набору стійок для встановлення приладів у корпусі. За допомогою шукача центру тяжіння форму по-

перечного перерізу відображають у вигляді конхкоїди. Центр тяжіння контурної кривої знаходять як центр тяжіння конхкоїди. Опорну лінію закріплюють центрами тяжіння контурних кривих двох поперечних перерізів. Таким чином вдається виключити вплив форми корпусу на точність вимірювань і визначити вплив ексцентриситету за рахунок розбіжності осі обертання з центром тяжіння перерізу. Похибки v_z із систематичних перетворюються в квазівипадкові. Точність контролю прямолінійності у цьому випадку відповідає вимогам (1).

Мета

Мета роботи полягає у розробленні математичної моделі переміщення центру перерізу еліпсної обичайки в еліпсному бандажі для підвищення прямолінійності геометричної осі корпусу оберткової печі в місці спирання, яка залежить від величин еліпсності підбандажної обичайки та бандажу, їх взаємного розташування на опорі, а також від орієнтування осей еліпсів поперечного перерізу обичайки один відносно одного на різних опорах.

Методика проведення дослідження

Досягнута точність контролю прямолінійності не завжди гарантує встановлення корпусу з необхідною точністю. Встановлено, що положення геометричної осі корпусу, як і осі обертання, не залишається незмінним під час роботи агрегату. Знаходження закономірності зміни положення центрів тяжіння поперечних перерізів у місцях спирання корпусу дозволить вжити відповідних заходів підвищення точності встановлення корпусу при монтажі.

Нові підбандажні обичайки, що поставляються на монтаж, мають менші відхилення форми від кругової циліндричної, ніж ті, що знаходилися в експлуатації. Можна вважати, що ці відхилення допустимі і проявляються переважно як еліпсність чи овальність. Оскільки новий бандаж, як правило, не має інших спотворень форми, крім еліпсності, то для з'ясування картини слід розглянути переміщення центру перерізу еліпсної обичайки в еліпсному бандажі.

Результати дослідження та їх обговорення

На рис. 2 зображено поперечний переріз опорного вузла печі, що обертається, причому бандаж і підбандажна обичайка, які розташовані в ньому, – еліпсні.

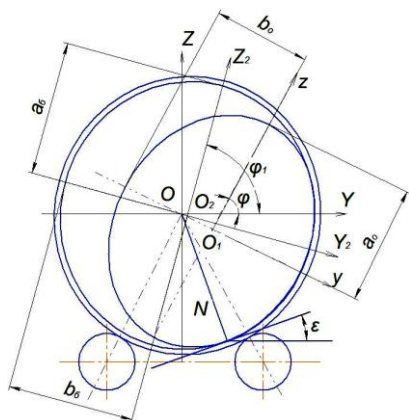


Рис. 2. Поперечний переріз опорного вузла з еліпсним бандажем та підбандажною обичайкою

Fig. 2. Cross-section of a support node with an elliptical bandage and a sub-bandage casing

Великі і малі осі еліпсів відповідно позначені a_0 і b_0 – для бандажу і a_1 і b_1 – для обичайки. Центр O кола умовного радіуса внутрішньої поверхні перерізу бандажу збігається з початком нерухомої системи координат YOZ , а центр еліпсного перерізу бандажу O_2 – з початком рухомої системи координат $Y_2O_2Z_2$. Тут φ та φ_1 – кути повороту обичайки та бандажу відповідно. Оскільки $a_0 > b_0$ внаслідок наявності підбандажного проміжку, то в процесі обертання печі кут повороту обичайки φ випереджає кут повороту бандажу φ_1 . Лінійне відставання бандажу від обичайки дорівнюватиме різниці довжини еліпса перерізу бандажу L_{e0} і довжини еліпса перерізу обичайки L_{e1} . В результаті сил тертя відбувається накатування обичайки на внутрішню поверхню бандажу. Якщо кут тертя ε прийняти рівним куту накатування, то коефіцієнт тертя $f_0 = tg\varepsilon$. Деталі опорних вузлів сучасних оберткових печей виготовляють достатньо жорсткими, і обидва перерізи в цьому випадку вважають такими, що не деформуються.

Умовний радіус еліптичного перерізу бандажа визначають згідно із залежністю $R_y = L_{e\phi}/2\pi$, де $L_{e\phi}$ – довжина еліпса перерізу бандажу. У прийнятій системі координат довжину дуги кривої виражають залежністю:

$$L = \int_0^y \sqrt{1 + (Z')^2} dy. \tag{7}$$

Із канонічного рівняння еліпса $\frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1$ отримаємо:

$$z = \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - y^2} \quad \text{і} \quad z' = -\frac{a}{b} \frac{y}{b^2 - y^2}.$$

Підставляючи значення z' в залежність (7) та інтегруючи, можна отримати довжину еліпса:

$$L_{e\phi} = 4 \int_0^{\frac{a^2-b^2}{b}} \frac{b}{b^2-y^2} \sqrt{P^2-y^2} dy,$$

де $P = \frac{b}{a^2-b^2}$.

Однак доцільніше довжину еліпса знайти через повний еліптичний інтеграл другого роду $E(t, \pi/2)$:

$$L_{e\phi} = 4cE(t, \pi/2), \tag{8}$$

де $c = \frac{ab}{a^2-b^2}$; $t = \frac{\sqrt{a^2-b^2}}{b}$.

При цьому $E(t, \pi/2)$ зручно подати у вигляді гіпергеометричного ряду:

$$E\left(t, \frac{\pi}{2}\right) = 1 - \frac{1}{2} t^2 - \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} t^4 - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} t^6 - \dots$$

Достатню точність обчислення довжини еліпса забезпечують два перших члени ряду. Для наближених обчислень:

$$L_{e\phi} = \pi \cdot 1,5 \cdot (a + b) - \sqrt{ab}.$$

Відповідно до рекомендацій [5], $L_{e\phi}$ можна визначити, знаючи відставання $\Delta L = L_{e\phi} - L_{e0}$ і, використовуючи залежність $\Delta L = \frac{\pi k_{cp}}{n}$, де k_{cp} – підбандажний проміжок, отриманий як середнє вимірювання проміжку над кожною з підбандажних прокладок; n – число обертів печі, що відповідає вимірюваному відставанню.

Координати точки перерізу обичайки в рухомій системі координат при нерухомому бандажі можна записати так:

$$\begin{aligned} y &= y - y_0 \cdot \cos\varphi + z - z_0 \cdot \sin\varphi; \\ z &= -y - y_0 \cdot \sin\varphi + z - z_0 \cdot \cos\varphi. \end{aligned}$$

Підставивши значення координат y і z в канонічне рівняння еліпсного перерізу обичайки, отримаємо:

$$u \cdot (y - y_0)^2 + v \cdot (z - z_0)^2 - a_0^2 - b_0^2 \cdot \sin 2\varphi \cdot (y - y_0) \cdot (z - z_0) = a_0^2 b_0^2, \tag{9}$$

де

$$\begin{aligned} u &= a_0^2 \cdot \sin 2\varphi + b_0^2 \cdot \cos 2\varphi; \\ v &= a_0^2 \cdot \cos 2\varphi + b_0^2 \cdot \sin 2\varphi. \end{aligned} \tag{10}$$

Оскільки загальна дотична до перерізів у точці дотику нахилена до горизонту під кутом ε , то після підстановки поточних координат y_N і z_N в рівняння (10) отримаємо:

$$u \cdot (y_N - y_0)^2 + v \cdot (z_N - z_0)^2 - a_0^2 - b_0^2 \cdot \sin 2\varphi \cdot (y_N - y_0) \cdot (z_N - z_0) = a_0^2 b_0^2. \tag{11}$$

Продиференціювавши (11) як неявну функцію, отримаємо:

$$\frac{dz}{dy} = -\frac{2u \cdot (y_N - y_0) - a_0^2 - b_0^2 \cdot \sin 2\varphi \cdot (z_N - z_0)}{2v \cdot (z_N - z_0) - a_0^2 - b_0^2 \cdot \sin 2\varphi \cdot (y_N - y_0)} = f_0. \tag{12}$$

Розв'язуючи спільно рівняння (11) та (12), знаходимо:

$$y_0 = y_N + \frac{a_0 \cdot f_0 \sqrt{1+u^2 - 1-u^2} \cdot \sqrt{1+f_0^2 \cdot \sin(2\varphi - \arctg f_0)}}{2 \sqrt{1+u^2 - 1-u^2} \cdot f_0^2 + (1+f_0^2) \cdot \sin(2\varphi + \arctg \frac{1-f_0^2}{2f_0})}, \tag{13}$$

$$z_0 = z_N - \frac{a_0 \cdot f_0 \sqrt{1+u^2 - 1-u^2} \cdot \sqrt{1+f_0^2 \cdot \sin(2\varphi - \arctg f_0)}}{2 \sqrt{1+u^2 - 1-u^2} \cdot \sqrt{f_0^2 + (1-f_0^2) \cdot \sin(2\varphi + \arctg \frac{1-f_0^2}{2f_0}}}, \quad (14)$$

де $u = \frac{a_0}{b_0}$; y_0 і z_0 – координати центру еліпса перерізу обичайки в системі координат YOZ .

Залежності для визначення координат точки, що належить еліпсу перерізу бандажу y_N і z_N під час його обертання, отримані аналогічно (13) і (14) та мають вигляд:

$$y_N = y_{02} \pm \frac{a_6 b_6}{u_1 + v_1 w^2 - w \sqrt{a_6^2 - b_6^2} \cdot \sin 2\varphi_1}, \quad (15)$$

$$z_N = z_{02} \pm \frac{a_6 b_6 w}{u_1 + v_1 w^2 - w \sqrt{a_6^2 - b_6^2} \cdot \sin 2\varphi_1}, \quad (16)$$

де

$$y_{02} = \frac{(a_6^2 - b_6^2) \cdot \sin 2\varphi_1}{4a_6 b_6} \sqrt{\frac{4a_6^2 b_6^2}{u} - R_y^2}, \quad (17)$$

$$z_{02} = \frac{1}{2a_6 b_6} \sqrt{4a_6^2 b_6^2 u_1^2 - u_1^2 R_y^2 - \frac{R_y \sqrt{3}}{2}}, \quad (18)$$

$$w = -\frac{2u_1 - (a_6^2 - b_6^2) \cdot f_0 \cdot \sin 2\varphi_1}{2v_1 - (a_6^2 - b_6^2) \cdot \sin 2\varphi_1},$$

$$u_1 = a_6^2 \cdot \cos 2\varphi_1 + b_6^2 \cdot \sin 2\varphi_1,$$

$$v_1 = a_6^2 \cdot \cos 2\varphi_1 + b_6^2 \cdot \sin 2\varphi_1.$$

У записаних виразах y_{02} і z_{02} – координати центру еліпса перерізу бандажу в системі координат YOZ залежновід кута повороту φ_1 осей системи координат $Y_2O_2Z_2$. Координати центру еліпса поперечного перерізу обичайки в системі координат YOZ , початок якої знаходиться в центрі кола умовного радіусу еліпса перерізу бандажа, мають такий вигляд:

$$y_0 = \frac{(a_6^2 - b_6^2) \cdot \sin 2\varphi_1}{4a_6 b_6} \sqrt{\frac{4a_6^2 b_6^2}{u_1} - R_y^2} \pm \frac{a_6 b_6}{u_1 + v_1 w^2 - w \sqrt{a_6^2 - b_6^2} \cdot \sin 2\varphi_1} \pm \frac{a_0 \cdot f_0 \sqrt{1+u^2 - 1-u^2} \cdot \sqrt{1+f_0^2 \cdot \sin(2\varphi - \arctg f_0)}}{2 \sqrt{1+u^2 - 1-u^2} \cdot \sqrt{f_0^2 + (1-f_0^2) \cdot \sin(2\varphi + \arctg \frac{1-f_0^2}{2f_0}}}; \quad (19)$$

$$z_0 = \frac{1}{2a_6 b_6} \sqrt{4a_6^2 b_6^2 u_1^2 - u_1^2 R_y^2 - \frac{R_y \sqrt{3}}{2}} \pm \frac{a_6 b_6 w}{u_1 + v_1 w^2 - w \sqrt{a_6^2 - b_6^2} \cdot \sin 2\varphi_1} - \frac{a_0 \cdot f_0 \sqrt{1+u^2 - 1-u^2} \cdot \sqrt{1+f_0^2 \cdot \sin(2\varphi - \arctg f_0)}}{2 \sqrt{1+u^2 - 1-u^2} \cdot \sqrt{f_0^2 + (1-f_0^2) \cdot \sin(2\varphi + \arctg \frac{1-f_0^2}{2f_0}}}. \quad (20)$$

Отже, центр поперечного перерізу еліпсної обичайки під час роботи печі постійно переміщається, здійснюючи складний рух. Цей рух складатиметься із серії послідовних елементарних поворотів навколо миттєвих центрів обертання перерізів. Внаслідок незначних відмінностей кривизни еліпсів перерізів наявність другої точки контакту практично не змінює траєкторії перерізу еліпса обичайки. Цей висновок зроблено на підставі таких міркувань та отриманих даних. В результаті спільного рішення рівнянь еліпсів перерізів у рухомій системі координат було отримано рівняння четвертого ступеня відносно y . Воно може мати чотири дійсних, два дійсних і два комплексних спряжених корені або чотири комплексних. Якщо рівняння має хоча б один дійсний корінь, то другий дійсний корінь дорівнює першому. Якщо при цьому два інші корені комплексні, то еліпси мають одну точку контакту. Чотири дійсних попарно рівних корені свідчать про те, що еліпси перерізів мають дві точки контакту. Кут повороту перерізів при контакті їх у двох точках змінюється в

межах $0...12^\circ$. Внаслідок цього спільне переміщення обичайки з бандажем при контакті їх еліпсів перерізів у двох точках не впливає на загальну картину розподілу центра еліпса перерізу обичайки під час обертання печі.

Траєкторії, які описують центр еліпса перерізу обичайки, утворюють деяку область можливих його положень. Зважаючи на циклічність процесу взаємного переміщення перерізів, ця область є замкнутою. Чисельні розрахунки за залежностями (19) і (20), виконані на ЕОМ, виявили, що вона випукла, а частота потрапляння до її центральної частини вища, ніж у периферійні ділянки. Підтвердилося припущення нормальності розподілу центру перерізу області, а еліпс розсіювання виявився найбільш вдалим представленням її контуру.

На рис. 3 зображено область розподілу центру еліпсного перерізу підбандажної обичайки. Еліптичність перерізів обичайки та бандажу допустима. Не беручи до уваги несиметричність еліпса розсіювання щодо осі OZ , пов'язану з накатуванням обичайки на бандаж, слід зазначити, що проєкція його великої осі на координатну вісь OY в 1,7 рази перевищує допустиме відхилення геометричної осі від прямолінійності (± 3 мм). Проєкція малої осі на координатну вісь OZ приблизно дорівнює допустимому відхиленню. Розміри агрегату не впливають на розміри еліпса розсіювання. Розрахунки були виконані для печей, що обертаються діаметром 3,6; 4; 4,5 та 5 м.

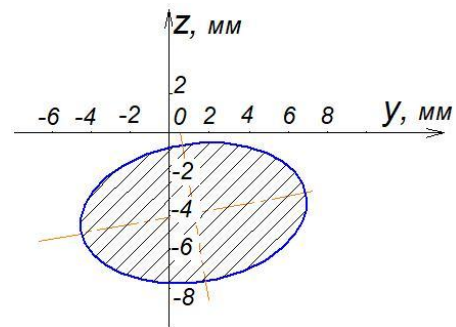


Рис. 3. Область розподілу еліпсного перерізу підбандажної обичайки
Fig. 3. The area of distribution of the elliptical cross-section of the underbandage custom

Висновки

Положення геометричної осі корпусу в місці спирання залежить від величин еліптичності підбандажної обичайки та бандажу, їх взаємного розташування на опорі, кута повороту корпусу, а також від орієнтування осей еліпсів один відносно одного на різних опорах. Рекомендовані методи та засоби контролю [5, 6] дають змогу зробити встановлення корпусу з необхідною точністю у його дискретному положенні. Очевидно, що це положення геометричної осі не залишається незмінним при обертанні корпусу. Тому оптимальним буде розташування на одній прямій центрів еліпсів розсіювання, причому еліпси повинні бути гомогенними та ізотропно виродженими.

Список літератури

1. Bisulandu B.-J., Huchet F. «Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications». *Applied Thermal Engineering*, vol. 221, 119637, 2023. DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2022.119637.
2. Debaçq M., Vitu S. et al. «Transverse motion of cohesive powders in flighted rotary kilns: experimental study of unloading at ambient and high temperatures». *Powder Technology*, vol. 245, pp. 56-63, 2013. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.04.007.
3. Liu H., Yin H. et al. «Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln». *Powder Technology*, vol. 287, pp. 239-247, 2016. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.10.007.
4. Nafsun A., Herz F. et al. «Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters». *Chemical Engineering Science*, vol. 160, pp. 346-353, 2017. DOI: 10.1016/j.ces.2016.11.005.
5. І. Кузьо, О. Мороз та ін. Контроль основних осей обертючих печей електронними тахометрами. *Вісник НУ «Львівська політехніка»: Геодезія, картографія і аерофотознімання*, № 69, С. 98-104, 2007.
6. І. Кузьо, Л. Дзюбик. Дослідження пружних деформацій опорних вузлів та їх вплив на силові характеристики обертючих печей. *Вісник НУ «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*, № 613, С. 106-110, 2008.

Ihor Kuzio, Yurii Sholoviy, Nadiia Maherus
Lviv Polytechnic National University

STUDY OF THE TECHNICAL STATE PARAMETERS OF LARGE-SIZE ROTATING MECHANISMS

Goal of the article is to develop a mathematical model of the movement of the cross-section center of the elliptical casing in the supporting elliptical bandage to increase the straightness of the geometric axis of the rotary furnace body at the support point, which depends on the sizes of the elliptical casing and bandage, their mutual location on the support, as well as the axes orientation of the ellipses of the cross-section casing relative to each other on different supports. **Significance.** The high-quality installation of the rotary furnace casing is determined by the straightness of its geometric axis, and not only at the time of control, but also during the mechanism operation. It is obvious that if this condition is observed, optimal operating conditions of the mechanism, its reliability and durability can be achieved. However, the measurement results and installation accuracy are affected by such a property of the measurement object as the deviation of the body shape from the circular cylindrical one, especially in the places of support. The new sub-bandages casing for installation have smaller deviations from the round-cylindrical shape than those that were in use. These deviations appear mainly as ellipticity or ovality. Since the new bandage, as a rule, does not have other distortions of the shape, except for ellipticity, to clarify the issue, the displacement of the cross-section center of the elliptical casing in the elliptical bandage should be considered. **Method.** For the cross-section of a support node with an elliptical bandage and a sub-bandage casing, using the complete elliptic integral of the second kind and its presentation in the form of a hypergeometric series, the center coordinates of the ellipse of the casing cross section in the YOZ coordinate system are determined and a detailed analysis of the factors and parameters of the system affecting its position is provided. **Results.** The position of the geometric axis of the body at the support point depends on the ellipticity of the sub-bandage casing and the bandage, their mutual location on the support, as well as the axes orientation of the ellipses relative to each other on different supports. Since the position of the geometric axis does not remain unchanged during the rotation of the body, the location of the scattering ellipses centers on one straight line will be optimal. **Scientific novelty.** Mathematical dependencies have been established to determine the center coordinates of the ellipse of the casing cross section in the YOZ coordinate system, the origin is in the center of the circle with the conventional radius of the ellipse of the rotary furnace cross section. **Practical significance.** The proposed method of estimation will further increase the straightness of the geometric axis of the rotary furnace, both at the time of control and during the operation of the mechanism.

Key words: rotary furnace, axis of rotation, geometric axis straightness, elliptical cross-section, bandage, casing.

References

1. Bisulandu B.-J., Huchet F, «Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications» // *Applied Thermal Engineering*, vol. 221, 119637, 2023. DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2022.119637.
2. Debacq M., Vitu S. et al. «Transverse motion of cohesive powders in flighted rotary kilns: experimental study of unloading at ambient and high temperatures» // *Powder Technology*, vol. 245, pp. 56-63, 2013. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.04.007.
3. Liu H., Yin H. et al. «Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln» // *Powder Technology*, vol. 287, pp. 239-247, 2016. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.10.007.
4. Nafsun A., Herz F. et al. «Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters» // *Chemical Engineering Science*, vol. 160, pp. 346-353, 2017. DOI: 10.1016/j.ces.2016.11.005.
5. Kuzo I., Moroz O. i in. «Kontrol osnovnykh osei obertovykh pechei elektronnykh takheometriamy» // *Visnyk NU "Lvivska politekhnika": Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, vol. 69, pp. 98-104, 2007.
6. Kuzo I., Dziubyk L. «Doslidzhennia pruzhnykh deformatsii opornykh vuzliv ta yikh vplyv na sylovi kharakterystyky obertovykh pechei» // *Visnyk NU "Lvivska politekhnika": «Optyimizatsiia vyrobnychyykh protsesiv i tekhnichnyi kontrol u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni»*, vol. 613, pp. 106-110, 2008.