

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 62-5:004.94

Кондратець В. О.¹, Мацуй А. М.²¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, Кропивницький, Україна²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, Кропивницький, Україна

ВІРТУАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКУ В ПІСКОВОМУ ЖОЛОБІ ОДНОСПІРАЛЬНИХ КЛАСИФІКАТОРІВ

Актуальність. Бідні залізні руди, які потребують збагачення, є сировинною основою чорної металургії. Їх подрібнення у перших стадіях в наслідок перевитрати електроенергії, сталевих куль і футеровки погіршує конкурентоспроможність продукції. Зменшити перевитрати можливо автоматизацією цих процесів, однак перепоною на цьому шляху є нерозв'язаність задачі отримання інформації про піськове навантаження з необхідною точністю, хоч проводились широкі та тривалі дослідження. Прогресивний віртуальний підхід відкриває перспективи вирішення даної проблеми.

Метою даної роботи є розробка математичної моделі віртуального визначення характеристик піського потоку на виході механічного односпірального класифікатора за технологічним параметром, який достатньо просто, точно та безконтактно можливо виміряти порівняно недорогим технічним засобом.

Метод. Запропоновано метод графоаналітичного моделювання, де розглядається піськове тіло класифікатора (матеріал між двома сусідніми витками спіралі), яке подається горизонтальними та вертикальними шарами, створюючи вздовж висоти та довжини елементи $\Delta h \times \Delta l$, що дозволяє отримувати залежності об'єму пісків у вертикальних шарах від довжини піського тіла. Дані залежності при будь-якій висоті, кратній Δh , що мають мінімум і максимум, апроксимувалися математичними виразами у вигляді семи членів ряду Фур'є. Вони встановлюють зв'язок між їх конкретними складовими та висотою піського тіла. Використання даних зв'язків надає можливість знаходити миттєві об'ємні та масові витрати матеріалу в піському жолобі при будь-якому значенні висоти пісків.

Результати. Отримана математична модель процесу розвантаження пісків у вигляді трьох основних і двадцяти двох додаткових рівнянь дозволяє визначати характеристики піського потоку за висотою піського тіла класифікатора. Миттєве значення витрати змінюється за достатньо складною залежністю, яка зберігається при різних висотах піського тіла. При зростанні висоти закономірно збільшується як середнє, так і миттєве значення масової витрати пісків.

Висновки. Вперше отримано математичну модель, яка описує значення миттєвої витрати пісків в процесі їх розвантаження у піський жолоб односпірального класифікатора за вимірною висотою піського тіла. Завдяки цьому можливо стабілізувати розрідження пульпи у кульовому млині, підвищити його продуктивність, якість подрібненого твердого та покращити експлуатаційні характеристики технологічного обладнання і, як наслідок, зменшити перевитрати при подрібненні руд.

Ключові слова: односпіральний класифікатор, миттєва масова витрата пісків, віртуальне визначення, математична модель.

НОМЕНКЛАТУРА

a_0 – вільний член тригонометричного поліному;
 a_k – член тригонометричного поліному;
 B_C – крок спіралі класифікатора;
 b_k – член тригонометричного поліному;
 c – граничне значення кількості вертикальних шарів у піському тілі;
 D – символ операції перемноження;
 Δh – висота горизонтальних шарів піського тіла;
 h_C – висота нижньої частини піського тіла;
 h_{\max} – найбільше значення висоти піського тіла;
 h_p – висота робочих елементів спіралі;

© Кондратець В. О., Мацуй А. М., 2017
 DOI 10.15588/1607-3274-2017-1-3

$K_{1,2,\dots,7}$ – відповідно вільний член, коефіцієнти при другому, третьому, четвертому, п'ятому, шостому і сьомому членах;

K_p – коефіцієнт розпушення;

k – кількість пар гармонічних складових;

Δl – довжина вертикальних шарів піського тіла;

m – найбільша кількість пар гармонічних складових;

n – порядковий номер горизонтальних шарів Δh матеріалу, який дорівнює 5, 6, ..., 11;

p, q – проміжні значення параметра x ;

Q_{MhT} – масова витрата пісків при певній висоті;

Q_{VhT} – об'ємна витрата пісків при певній висоті;

R_c – радіус спіралі класифікатора;
 Δt – проміжок часу, за який сходиться в пісковий жолоб один вертикальний шар матеріалу довжиною $\Delta l = 0,05$ м;
 $V(x)$ – інтерполяційний поліном;
 $V_{1,2,\dots,7}$ – функції, що описують об’єм матеріалу у вертикальних шарах піскового тіла при східчастій зміні його висоти;
 V_{HT} – значення об’ємів у вертикальних шарах при певній висоті піскового тіла;
 x – порядковий номер вертикального шару матеріалу вздовж піскового тіла;
 y – функції змін об’єму пісків у вертикальних шарах піскового тіла;
 z – основа аргументу;
 α – кут нахилу класифікатора до горизонталі;
 δ_T – густина твердого;
1KCH-30 – тип механічного односпірального класифікатора.

ВСТУП

Нині чорні метали в основному отримують з бідних залізних руд, які потребують збагачення, що передбачає їх подрібнення до розкриття краплин корисного компоненту. При подрібненні дроблених руд, яке здійснюється в перших стадіях у кульових млинах, що працюють у замкненому циклі з механічним односпіральним класифікатором, перевирачається велика кількість електроенергії та вартісних матеріалів у вигляді сталевих куль і футеровки. Це підвищує собівартість залізородного концентрату та зменшує конкурентоспроможність продукції на світовому ринку. Зважаючи на це дана проблема знаходиться під контролем на рівні державних управлінських структур. Зокрема, їй присвячена тематика держбюджетних наукових досліджень і Кіровоградського національного технічного університету.

Одним з основних напрямів зменшення вказаних перевитрат є автоматизація цих технологічних процесів. Автоматизацією перших стадій подрібнення-класифікації займаються достатньо давно як зарубіжні, так і вітчизняні вчені, однак до кінця проблема не вирішена. В той же час на важливість її розв’язання вказується і в теперішній ситуації. Вузьким місцем тут є відсутність певної інформації. У сучасних роботах вказується на відсутність надійних засобів контролю достатньої точності і необхідність розробки інформаційних засобів для даних технологічних процесів. Особливо важливим і складним для вимірювання є циркулююче навантаження в циклі подрібнення-класифікації або витрата пісків класифікатора у його пісковому жолобі, які являють собою недоподрібнений продукт, що повертається знову у кульовий млин, тобто, рухається у замкненому контурі. У класифікаторі крупне тверде з водяної ванни піднімається спіраллю, яка обертається, до розвантажувального кінця, обезводнюючись і займаючи простір між двома витками двозахідної спіралі, створюючи піскові тіла, об’єм матеріалу в яких залежить від величини циркулюючого навантаження. Не дивлячись на реалізацію багатьох підходів, тривалий час розробки, ця задача дотепер на задовільному рівні не розв’язана. Звертає на себе увагу і той факт, що такі дослідження майже не проводяться, хоч потреба у цьому інформаційному засобі зростає, а

інформація повинна бути більш точною і різноманітною. Тепер циркуляційне навантаження можливо визначити з похибкою, яка не менше $\pm 10\%$. В той же час нині прогресивний віртуальний підхід знаходження технологічних параметрів для цих цілей ніхто не застосовував, що відкриває перспективи успішного розв’язання даної задачі.

Метою даної роботи є розроблення математичної моделі віртуального визначення характеристик піскового потоку на виході з механічного односпірального класифікатора за технологічним параметром, який достатньо просто, точно і безконтактно можливо виміряти порівняно недорогим технічним засобом в межах зміни циркулюючого навантаження у замкненому циклі подрібнення-класифікації.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай піскове тіло класифікатора, яке розташоване в просторі між двома сусідніми витками спіралі, буде поділене вертикальними площинами на x однакових частин Δl , а горизонтальними площинами – на n однакових частин Δh . Програмно моделюючи об’єм у вертикальних шарах піскового тіла, можливо отримати закономірність зміни об’єму $V_{HT}(x)$ вздовж піскового тіла при довільній його висоті. Вона наближено являє собою періодичну функцію. Її аналітичне значення можливо отримати наближенням функцій. У даному випадку функцію $V_{HT}(x)$ доцільно інтерполювати тригонометричним поліномом [1]:

$$V(x) = a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (1)$$

так, щоб

$$V(x_i) = V_{HT}(x_i), \quad (i = 0, 1, 2, \dots, c), \quad (2)$$

де $0 \leq x_0 < x_1 < \dots < x_c$ – точки, що відповідають проміжку, який займає піскове тіло; a_0 – вільний член тригонометричного поліному; k – кількість пар гармонічних складових.

Приймемо $y_i = V_{HT}(x_i)$, ($i=0, 1, 2, \dots, c$). Необхідно підібрати коефіцієнти поліному (1) так, щоб виконувались наступні рівності:

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx_0 + b_k \sin kx_0), \\ y_1 &= a_1 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx_1 + b_k \sin kx_1), \\ &\dots \\ y_c &= a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx_c + b_k \sin kx_c) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Отже, отримано систему $c+1$ лінійних рівнянь з $c+1$ невідомими $a_0, a_1, a_2, \dots, a_c, b_c$. Визначник цієї системи рівнянь дорівнює [2]:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & \cos x_0 & \sin x_0 & \dots & \cos mx_0 \\ 1 & \cos x_1 & \sin x_1 & \dots & \cos mx_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos x_c & \sin x_c & \dots & \cos mx_c \end{vmatrix} = 2m^2 D \sin \frac{x_q - x_p}{2}, \quad (4)$$

$$0 \leq p < q \leq c$$

і, як наслідок, відмінний від нуля для даної системи точок, для якої $0 < x_q - x_p < c$. Зважаючи на це, дана інтерполяційна задача має розв'язок, і при тому єдиний.

Це дозволяє знаходити аналітичні залежності об'єму пісків у вертикальних шарах вздовж піскового тіла при фіксованих значеннях його висоти та у загальному випадку – при довільній висоті, а також залежності параметрів цього рівняння від висоти піскового тіла, що слугує основою створення математичної моделі у формі алгебраїчних рівнянь, яка описує значення миттєвої витрати пісків в процесі їх розвантаження у пісковий жолоб.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Засоби вимірювання циркулюючого навантаження в замкнених циклах подрібнення-класифікації розробляються давно як вітчизняними, так і зарубіжними вченими. Одними з перших розроблялися пристрої непрямого вимірювання циркулюючого навантаження. Вони включають вимірювання струму електродвигуна класифікатора або його активної потужності [3]. Точність цих засобів низька в наслідок впливу стану спіралі, постелі, підшипників спіралі, редуктора, електродвигуна [4]. Удосконалення цих пристроїв шляхом визначення змінної складової [5] або врахування додаткових параметрів, встановлення пружних елементів дозволяють підвищити точність визначення циркулюючого навантаження, але вона залишається недостатньою.

Практично в цей же час і дещо раніше запропоновані пристрої, які беруть свій початок з США, що засновані на безпосередньому неперервному зважуванні конвеєра або піскового жолоба класифікатора, якими піски подаються до кульового млина або класифікатора [4]. Дані пристрої складні і громіздкі. Вони мають низьку точність вимірювання циркулюючого навантаження в наслідок налипання матеріалу та ремонтних змін ваги.

Більш точними виявилися пристрої, які вимірюють пісковий потік безпосередньо в пісковому жолобі класифікатора. Першим з них був пристрій з зануреною в потік зірочкою що обертається за допомогою двигуна постійного струму [6]. Однак точність тут також невисока, оскільки на показання впливає розрідженість пульпи, її нерівномірність, стан зірочки та інше. Крім того, попадання скрапу або сторонніх предметів може приводити до аварійних режимів в наслідок забивання піскового жолоба і виходу з ладу зупиненого дорогого електродвигуна. Ліквідує цей недолік пристрій [7], який дозволяє надійно вимірювати об'ємну витрату пульпи у пісковому жолобі шляхом сканування поверхні рухомого матеріалу.

В кінці 90-х років минулого століття започатковані розрахункові методи визначення циркулюючого навантаження, які зафіксовані на рівні авторських свідоцтв СРСР. Запропоновані формули містять значну кількість параметрів, продукт оцінюється в межах спіралі класифікатора, але створюється запізнення в наслідок введення інформації і складних обчислень. Підходи відрізняються громіздкістю і не забезпечують отримання точних результатів в наслідок експлуатаційної зміни деяких параметрів.

Пристрої, що розроблялися на початку нового століття [8, 9] не дозволяють розв'язати задачу достатньо точно, оскільки спіраляється на застарілі методи вимірювання потужності або струму електродвигуна класифі-

катора. Вони дещо підвищують точність, але в основі залишаються з вже вказаними недоліками. Не дивлячись на це, вимушені і нині їх пропонувати для використання [10]. Роботи [11, 12] покращують характеристики пристрою [7] і дозволяють вимірювати об'ємні витрати пульпи з точністю $\pm (3...4)\%$.

Виходячи з актуальності даної проблеми слід відмітити, що за останні 25 років не з'явилося нових більш прогресивних підходів визначення циркулюючого навантаження, а попередньо розроблені засоби як технічні системи практично вичерпали свої можливості і їх удосконалити вже не можливо. Слід враховувати і те, що нині крім циркулюючого навантаження необхідно мати інформацію і про миттєві масові витрати пісків та інші параметри потоку. Встановити ці характеристики циркуляційного потоку на вході в пісковий жолоб можливо за допомогою віртуального підходу на основі піскового тіла механічного односпірального класифікатора.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Спіраль найбільш розповсюдженого класифікатора КСН-30 має радіус $R_c=1,5$ м, крок $B_c=1,8$ м, виконана дво-західною і звичайно обертається зі швидкістю 3 об/хв. (0,05 об/с). Вона розташована паралельно днищу, яке нахилене до горизонту під кутом $\alpha = 18^\circ 30'$. Спіраль виконують зі змінних робочих елементів висотою $h_p=330$ мм. Піскове тіло класифікатора розташовується між двома витками спіралі і постіллю, яка створена крупним твердим і має циліндричну поверхню, що відповідає радіусу R_c . Воно має складну форму і при обертанні спіралі здійснює сходження вздовж циліндричної постелі в пісковий жолоб під дією поступального переміщення подавального витка. При цьому піски перевалюються через розвантажувальний поріг зі змінною витратою, оскільки їх розташування в пісковому тілі є нерівномірним. Уявлення про характер витрати пісків односпірального класифікатора може дати розгляд піскового тіла у вертикальній і горизонтальній площинах. Розріз піскового тіла з фрагментом робочих елементів витків спіралі у вертикальній площині, що проходить через її вісь, показано на рис. 1. Піскове тіло можна подати нижньою 6 і верхньою 3 частинами. Нижня частина являє собою частину циліндра, а верхня – зрізану піраміду. В залежності від величини циркулюючого навантаження горизонтальна площина 7 піскового тіла буде змінювати своє положення, опускаючись при його зменшенні. Тому піскове тіло може визначатись або двома частинами, або лише однією нижньою. Пунктиром відмічена частина нижньої геометричної фігури, яка відповідає найменшому значенню піскового навантаження в циклі подрібнення-класифікації. Це буде нижня межа обмеження об'єму піскового тіла. Верхня межа обмеження встановлюється висотою h_p змінних робочих елементів спіралі, однак матеріал практично до цієї відмітки не доходить.

Піскова продуктивність визначається об'ємом піскового тіла. Його мірою може бути висота у кількох точках поперечного перерізу (рис. 1). В процесі математичного моделювання формування піскового тіла механічного односпірального класифікатора отримана аналітична залежність об'єму твердого у міжвитковому просторі від його рівня вздовж вертикалі OO' на рис. 1, що проходить

через точку контакту постелі і подавального витка у самій нижній точці у вихідному положенні витків перед розвантаженням матеріалу. Ця залежність лінійна в межах зміни циркулюючого навантаження. Тому об'єм піскового тіла можливо визначати за його висотою вздовж вертикалі OO' . Даний підхід позбавлений вад, притаманних попереднім розробкам цього призначення, оскільки за показанням вимірювального пристрою, сигнал якого не пульсує, дозволяє судити про витрату твердого в циркулюючому контурі.

Піськове тіло односпірального класифікатора можливо подати горизонтальними шарами матеріалу однакової висоти Δh (рис. 2а). Враховуючи обмеження в даній задачі, кількість горизонтальних шарів у нижній частині піскового тіла повинна бути такою, щоб h_c вміщувало ціле число шарів. Висота відрізка циліндра

$$h_c = \frac{B_c}{2} \cdot \sin \alpha = 0,28557 \text{ м.}$$

Нехай в нижній частині піскового тіла буде розташовано дев'ять горизонтальних шарів, тоді висота кожного шару $\Delta h = 0,0317$ м. Найбільше значення висоти піскового тіла $h_{\max} = h_p \cdot \cos \alpha = 0,3129$ м. Якщо використовують робочі елементи $h_p = 0,37$ м, то $h_{\max} = 0,351$ м. Верхня частина піскового тіла (рис. 2а) розташовується на проміжку $h_{\max} - h_c = 0,0653$ м. Тоді вона буде містити до двох шарів матеріалу висотою Δh . Зрозуміло, що такого заповнення спіралі практично ніколи не буде. Горизонтальні шари матеріалу дозволяють визначати їх об'єм за знайденою площею. Горизонтальні шари являють собою фігури, обмежені близькими до парабол лініями і прямими, які з'єднують їх кінці. При визначенні об'єму виникають крайові ефекти в наслідок криволінійних бокових поверхонь. Якщо гілки параболи замінити прямими, що проходять до точки на передньому витку, яка знаходиться на проекції осі спіралі на горизонтальний шар, то крайові ефекти при визначенні об'єму враховуються достатньо точно. Точність визначення об'єму піскового тіла буде задовільною при $\Delta h = 0,0317$ м.

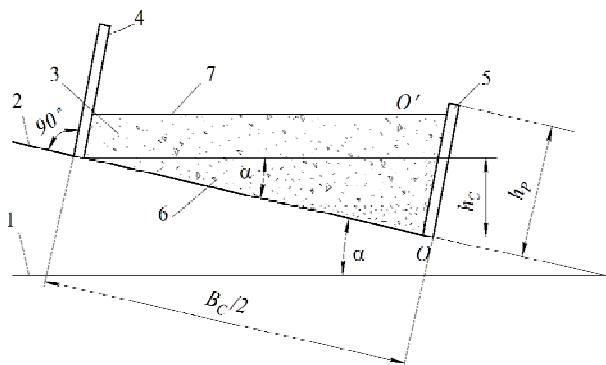


Рисунок 1 – Розріз піскового тіла у вертикальній площині, що проходить через вісь обертання, при найбільшому заповненні міжвиткового простору:

- 1 – горизонталь; 2 – днище постелі; 3 – верхня частина піскового тіла; 4, 5 – робочі елементи переднього і заднього (подавального) витків; 6 – нижня частина піскового тіла; 7 – горизонтальна площина піскового тіла

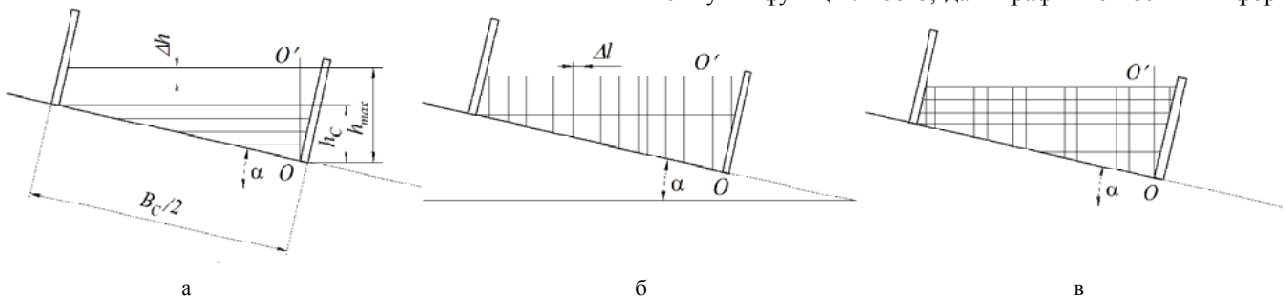


Рисунок 2 – Подання піскового тіла елементарними складовими:

- а – горизонтальними шарами; б – вертикальними шарами; в – тілами, що утворюються взаємними перетинами горизонтальних і вертикальних площин

Якщо піськове тіло класифікатора подати вертикальними шарами (рис. 2б) матеріалу, то це буде відповідати сходженню пісків у пісковий жолоб. Піски односпірального класифікатора являють собою достатньо дрібний матеріал, однак наявність в них вологи робить їх в'язкими і вони відходять від піскового тіла під дією власної ваги достатньо широким шаром. На практиці такий шар підтримується близько 0,05 м. Тому при розбитті піскового тіла на вертикальні шари їх довжину слід приймати такою ж, тобто, $\Delta l = 0,05$ м. Свій початок вони беруть від вертикалі OO' ліворуч і праворуч. Прийняте значення Δl дозволяє достатньо точно визначати об'єм матеріалу в окремих вертикальних шарах, знаючи їх площу у поперечному перерізі.

Ще більшого ефекту можливо досягти, розбивши піськове тіло на горизонтальні і вертикальні шари матеріалу, поклавши в основу елемент з поперечним перерізом $\Delta h \times \Delta l$ (рис. 2в). На підставі такого подання піскового тіла розроблено підхід моделювання сходження матеріалу в пісковий жолоб класифікатора. Комп'ютерно моделюючи площі горизонтальних шарів і розташовуючи на них елементи площею $\Delta h \times \Delta l$ та визначаючи їх довжини поперек осі піскового тіла програмно отримуємо об'єм матеріалу у вертикальних шарах. Точність у даному підході можливо збільшувати шляхом зменшення параметрів Δh і Δl .

Моделюючи піськове тіло односпірального класифікатора, отримувались залежності зміни об'єму пісків у вертикальних шарах від їх порядкового номера, тобто, від довжини піскового тіла. Такі залежності для висоти піскового тіла від 5 до 11 приведені на рис. 3, звідки видно, що вони однотипні. Залежності мають мінімум і максимум. Основна відмінність в отриманих залежностях полягає в тому, що при збільшенні висоти піскового тіла зростають як середні значення, так і значення мінімумів і максимумів функцій. Тобто, дані графіки є носіями інфор-

мації про майбутнє розвантаження піскового тіла у пісковий жолоб класифікатора.

Оскільки дану інформацію безпосередньо використати не можливо, графіки апроксимувалися математичними залежностями у вигляді ряду Фур'є. Апроксимація виконувалася в Curve Fitting Toolbox – наборі графічних інтерфейсів (GULs) і М-функцій для користувачів, які створені в обчислювальному середовищі MATLAB. При цьому отримані аналітичні залежності об'єму у функції довжини піскового тіла, поданій в одиницях Δl при різних значеннях його висоти. Встановлено, що сімома членами ряду можливо достатньо точно описати піскове тіло класифікатора за розташуванням матеріалу у вертикальних шарах. Самі функції мають такий вигляд:

$$V_1 = 0,6687 - 0,3472 \cos(0,2395x) + 0,1069 \sin(0,2395x) + 1,285 \cos(2 \cdot 0,2395x) + 0,9444 \sin(2 \cdot 0,2395x) + 0,5014 \cos(3 \cdot 0,2395x) - 0,4997 \sin(3 \cdot 0,2395x), \quad (5)$$

$$V_2 = 1,419 - 0,4 \cos(0,2448x) - 0,4278 \sin(0,2448x) + 1,411 \cos(2 \cdot 0,2448x) + 1,117 \sin(2 \cdot 0,2448x) + 0,538 \cos(3 \cdot 0,2448x) - 0,4006 \sin(3 \cdot 0,2448x), \quad (6)$$

$$V_3 = 2,404 - 0,6809 \cos(0,2582x) - 1,18 \sin(0,2582x) + 1,171 \cos(2 \cdot 0,2582x) + 1,306 \sin(2 \cdot 0,2582x) + 0,6515 \cos(3 \cdot 0,2582x) - 0,1448 \sin(3 \cdot 0,2582x), \quad (7)$$

$$V_4 = 2,46 - 1,15 \cos(0,2178x) + 1,259 \sin(0,2178x) + 3,586 \cos(2 \cdot 0,2178x) + 0,1199 \sin(2 \cdot 0,2178x) + 0,3 \cos(3 \cdot 0,2178x) - 0,8621 \sin(3 \cdot 0,2178x), \quad (8)$$

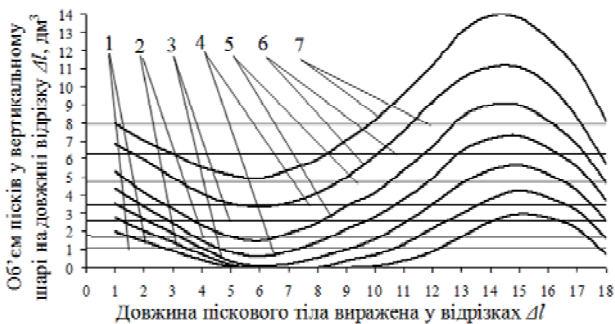


Рисунок 3 – Зміна об'єму матеріалу у вертикальних шарах відносно середнього значення вздовж піскового тіла при зростанні його висоти від $5\Delta h$ до 11

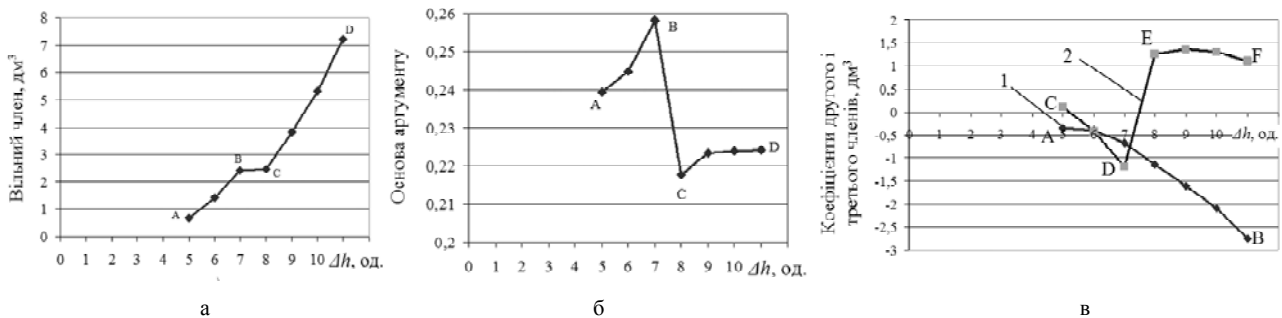


Рисунок 4 – Залежність вільного члена, основи аргументу, коефіцієнтів другого і третього членів рівнянь від висоти піскового тіла: а – вільний член; б – аргумент; в – коефіцієнти другого і третього членів; 1 – другого члена; 2 – третього члена

$$V_5 = 3,839 - 1,6 \cos(0,2235x) + 1,35 \sin(0,2235x) + 3,71 \cos(2 \cdot 0,2235x) + 0,2691 \sin(2 \cdot 0,2235x) + 0,217 \cos(3 \cdot 0,2235x) - 0,8263 \sin(3 \cdot 0,2235x), \quad (9)$$

$$V_6 = 5,321 - 2,098 \cos(0,2240x) + 1,298 \sin(0,2240x) + 3,831 \cos(2 \cdot 0,2240x) + 0,4 \sin(2 \cdot 0,2240x) + 0,1445 \cos(3 \cdot 0,2240x) - 0,7975 \sin(3 \cdot 0,2240x), \quad (10)$$

$$V_7 = 7,215 - 2,751 \cos(0,2242x) + 1,105 \sin(0,2242x) + 3,807 \cos(2 \cdot 0,2242x) + 0,4311 \sin(2 \cdot 0,2242x) + 0,0721 \cos(3 \cdot 0,2242x) - 0,8681 \sin(3 \cdot 0,2242x), \quad (11)$$

де x – порядковий номер вертикального шару матеріалу вздовж піскового тіла; V_1 – при $5\Delta h$; V_2 – при $6\Delta h$; V_3 – при 7 ; V_4 – при $8\Delta h$; V_5 – при $9\Delta h$; V_6 – при $10\Delta h$; V_7 – при $11\Delta h$.

Отримані рівняння (5), (6), ..., (11) дозволяють знаходити об'єм матеріалу в вертикальних шарах вздовж піскового тіла при фіксованій висоті. Відповідно даним рівнянням для конкретного значення висоти піскового тіла можливо записати вираз у загальному виді:

$$V_{hT} = K_1 + K_2 \cos zx + K_3 \sin zx + K_4 \cos 2zx + K_5 \sin 2zx + K_6 \cos 3zx + K_7 \sin 3zx, \quad (12)$$

де V_{hT} – значення об'ємів у вертикальних шарах при певній висоті піскового тіла; $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7$ – відповідно вільний член та коефіцієнти при другому, третьому, четвертому, п'ятому, шостому і сьомому членах; z – основа аргументу; $x=1, 2, \dots, 18$ – значення довжини піскового тіла, виражені у одиницях Δl .

За рівняннями (5), (6), ..., (11) також можливо встановити зв'язки між їх конкретними складовими і висотою піскового тіла. Закономірності зміни вільного члена, основи аргументу і коефіцієнтів другого і третього членів від висоти піскового тіла приведені на рис. 4.

Коефіцієнти четвертого, п'ятого, шостого і сьомого членів змінюються аналогічно залежності 2 на рис. 4в. Закономірності зміни даних параметрів можливо виразити рівняннями, які отримані апроксимуванням експериментальних залежностей і мають наступний вигляд:

$$K_{1AB}(n) = 0,1173n^2 - 0,5405n + 0,4377, \quad n = 5,6,7, \quad (13)$$

$$K_{1BC}(n) = 0,056n + 2,012, \quad n = 7,8, \quad (14)$$

$$K_{1CD}(n) = 0,1288n^2 - 0,871n + 1,2079, n = 8,9,\dots,11, \quad (15)$$

$$Z_{AB}(n) = 0,004n^2 - 0,0392n + 0,3345, n = 5,6,7, \quad (16)$$

$$Z_{BC}(n) = -0,0404n + 0,541, n = 7,8, \quad (17)$$

$$Z_{CD}(n) = 0,0008n^3 - 0,0247n^2 + 0,2475n - 0,603, n = 8,9,\dots,11, \quad (18)$$

$$K_2 = 0,0059n^3 - 0,1904n^2 + 1,4556n - 3,5897, n = 5,6,\dots,11, \quad (19)$$

$$K_{3CD} = -0,1118n^2 + 0,6946n - 0,5721, n = 5,6,7, \quad (20)$$

$$K_{3DE} = 2,445n - 18,301, n = 7,8, \quad (21)$$

$$K_{3EF} = -0,071n^2 + 1,2976n - 4,5777, n = 8,9,\dots,11, \quad (22)$$

$$K_{4AB} = -0,183n^2 + 2,139n - 4,835, n = 5,6,7, \quad (23)$$

$$K_{4BC} = 2,415n - 15,734, n = 7,8, \quad (24)$$

$$K_{4CD} = -0,0287n^3 + 0,7825n^2 - 6,9678n + 23,926, n = 8,9,\dots,11, \quad (25)$$

$$K_{5EF} = 0,008n^2 + 0,085n + 0,319, n = 5,6,7, \quad (26)$$

$$K_{5FG} = -1,1861n + 9,6087, n = 7,8, \quad (27)$$

$$K_{5GH} = -0,0295n^2 + 0,6674n - 3,334, n = 8,9,\dots,11, \quad (28)$$

$$K_{6AB} = 0,0385n^2 - 0,3864n + 1,4719, n = 5,6,7, \quad (29)$$

$$K_{6BC} = -0,3515n + 3,112, n = 7,8, \quad (30)$$

$$K_{6CD} = 0,0298n^3 - 0,8615n^2 + 8,1653n - 25,13, n = 8,9,\dots,11, \quad (31)$$

$$K_{7EF} = 0,0783n^2 - 0,7627n + 1,3553, n = 5,6,7, \quad (32)$$

$$K_{7FG} = -0,7173n + 4,8763, n = 7,8, \quad (33)$$

$$K_{7GH} = -0,0154n^3 + 0,4123n^2 - 3,6315n + 9,6875, n = 8,9,\dots,11, \quad (34)$$

де n – порядковий номер горизонтальних шарів Δh матеріалу, який дорівнює 5, 6, ..., 11.

Враховуючи, що двозахідна спіраль обертається зі швидкістю 0,05 об/с і має крок $B_c=1,8$ м, за один оберт вона розвантажує у пісковий жолоб класифікатора два піскових тіла. Один вертикальний шар матеріалу довжиною $\Delta l=0,05$ м сходять у пісковий жолоб за проміжок часу $\Delta t=0,5555$ с. Поділимо ліву і праву частини рівняння (12) на Δt і отримаємо об'ємну витрату матеріалу у пісковий жолоб при сходженні конкретного вертикального шару піскового тіла:

$$Q_{VHT} = \frac{V_{HT}}{\Delta t} = (K_1 + K_2 \cos zx + K_3 \sin zx + K_4 \cos 2zx + K_5 \sin 2zx + K_6 \cos 3zx + K_7 \sin 3zx) / \Delta t. \quad (35)$$

Відповідно залежності (35) можливо записати формулу для визначення миттєвої масової витрати пісків (циркулюючого навантаження):

$$Q_{MHT} = \delta_T (K_1 + K_2 \cos zx + K_3 \sin zx + K_4 \cos 2zx + K_5 \sin 2zx + K_6 \cos 3zx + K_7 \sin 3zx) / K_P \cdot \Delta t. \quad (36)$$

Таким чином, отримана математична модель у формі алгебраїчних рівнянь. Рівняння (12), (35) і (36) є основними, а рівняння (13), (14), ..., (34) – допоміжними. Вони являють собою математичну модель, що дозволяє знаходити значення миттєвої масової витрати пісків до їх розвантаження при будь-якій висоті піскового тіла. Крім того, рівняння (12) і (35) дозволяють знаходити об'єм пісків у вертикальних шарах, миттєве значення об'ємної витрати матеріалу та об'єм піскового тіла.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експериментальне дослідження проводилося на виготовленій фізичній моделі, яка являла собою фрагмент постелі і двох поряд розташованих витків спіралі, встановленій під кутом $18^\circ 30'$ до горизонту. Макет виготовлявся за розмірами реального класифікатора ІКСН-30, але в ньому монтувалися тонкі вертикальні перегородки через 0,05 м, що відповідало довжині вертикальних шарів Δl при моделюванні. У перегородках виконувалися отвори на висоті $6\Delta h$, $8\Delta h$ і $10\Delta h$, нижні з яких заклеювалися. В самій нижній точці перед перегородками встановлювалися патрубки з гумовими відводами, які перекривалися. В експериментах створені перегородками ємкості заповнювалися водою спочатку на висоту $10\Delta h$, потім шляхом розгерметизації – на висоту $8\Delta h$ і $6\Delta h$. У досліді у мірні ємкості зливалася вода з кожної створеної перегородками камери з наступним визначенням її об'єму. Результати порівнювалися з розрахунком об'ємів за формулами (6), (8) і (10). Розходження результатів не перевищувало $\pm 3,0\%$, за базовий рівень приймалися визначені об'єми води.

Перевірялася також відповідність об'єму піскового тіла, визначеного за запропонованими залежностями, реальним продуктивностям односпіралного класифікатора ІКСН-30. При висоті пісків $10\Delta h$ середній об'єм матеріалу у вертикальному шарі складає $6,71$ дм^3 , що при сходженні його за $0,5555$ с відповідає продуктивності $12,1$ $\text{дм}^3/\text{с}$ або $43,48$ $\text{м}^3/\text{год}$. Піски являють собою дрібний матеріал і однорідну структуру, тому коефіцієнт розпушення в них буде практично незмінним і його можливо прийняти на рівні 1,1. Тоді при густині твердого $3,3$ $\text{т}/\text{м}^3$ масова витрата пісків складає $130,43$ $\text{т}/\text{год}$, що відповідає реальному режиму роботи односпіралного класифікатора.

Знаходилися також параметри рівняння масової витрати пісків у циклах розвантаження і самі масові витрати у функції висоти піскового тіла.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Основним результатом роботи є отримане в процесі моделювання рівняння (12), (35) і (36) та допоміжні рівняння (13), (14), ..., (34), які являють собою математичну модель процесу розвантаження пісків і дозволяють визначати миттєві значення їх об'ємної чи масової витрати у пісковий жолоб класифікатора та об'єм матеріалу у вер-

тикальних шарах піскового тіла. Параметри рівняння (36) за даними експерименту приведені в табл. 1. Розрахунки здійснювалися з використанням залежностей (13), (14),..., (34). З даних табл. 1 слідує, що в експерименті висота піскового тіла приймала значення практично в усьому діапазоні реальної зміни циркулюючого навантаження. Визначені за залежностями (13), (14),..., (34) параметри за висотою піскового тіла в одиницях Δh також змінюються в широкому діапазоні.

Миттєві значення масової витрати пісків у пісковий жолоб односпірального класифікатора при висоті піскового тіла, яка мала місце у експериментах, в процесі його сходження приведені на рис. 5. З рис. 5 слідує, що при збільшенні висоти піскового тіла миттєві значення масової витрати твердого зростають. Витрати змінюються за достатньо складною закономірністю. З ростом рівня піскового тіла закономірність зберігається. При збільшенні висоти піскового тіла зростають також і середні значення масової витрати твердого, які відповідно становлять $12,6001 \text{ дм}^3/\text{с}$, $18,5198 \text{ дм}^3/\text{с}$ та $26,0447 \text{ дм}^3/\text{с}$.

6 ОБГОВОРЕННЯ

В результаті теоретичних досліджень була отримана математична модель у формі алгебраїчних рівнянь, які описують піскові тіла різної висоти, яка змінюється з заданим кроком. Показано, що між членами цих рівнянь існують зв'язки, які виражені алгебраїчними рівняннями відповідно кожному показнику. Це дозволило подати модель визначення об'єму у вертикальному шарі основним алгебраїчним рівнянням з семи членів, яке передбачає знаходження його параметрів за допомогою запропонованих допоміжних алгебраїчних рівнянь. Основне рівняння математичної моделі може подаватись стосовно визначення об'єму пісків у вертикальних шарах піскового тіла або миттєвих значень об'ємної чи масової їх витрати при розвантаженні. На підставі миттєвих витрат пісків можливо визначати інші характеристики піскового потоку.

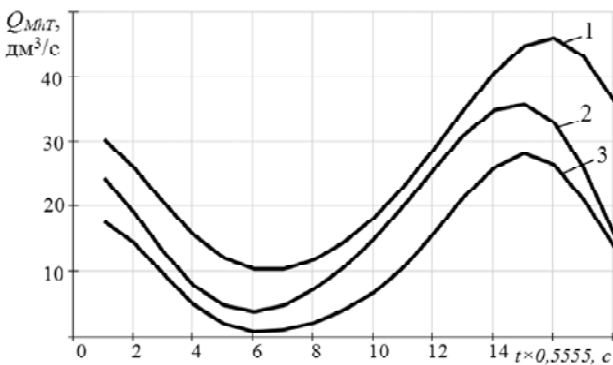


Рисунок 5 – Миттєві значення масової витрати пісків у пісковий жолоб односпірального класифікатора в процесі сходження піскового тіла при різній його висоті:

$1 - 6,75\Delta h; 2 - 7,90\Delta h; 3 - 8,8\Delta h$

Таблиця 1 – Параметри рівняння (36), що відповідають умовам експерименту

Висота піскового тіла в мм і одиницях Δh	Основа аргументу z	Параметри рівняння, дм^3						
		K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
213,98 / 6,75	0,2522	2,1338	-0,6250	-0,9774	1,2653	1,2572	0,6179	-0,2254
250,40 / 7,90	0,2219	2,4544	-1,0644	1,0145	3,3445	0,2385	0,3352	-0,7904
278,96 / 8,80	0,2075	3,5174	-1,5043	1,3432	3,6488	0,5096	0,3181	-0,8359

Оскільки визначені за допомогою математичної моделі об'єми пісків співпадають з експериментальними даними, а в цьому технологічному процесі матеріал не ушілюється, запропонований підхід знаходження характеристик піскового потоку забезпечує достатньо високу точність.

Даний метод забезпечує знаходження миттєвих значень витрати саме твердого в той час, коли інші підходи визначають лише середні характеристики потоку твердого разом з водою. Інші методи мають пульсуючий сигнал, а у запропонованому він має певне незмінне середнє значення лише витрати твердого. Крім того, він забезпечує випередження отриманої інформації на 10 с і отримання ряду допоміжних характеристик потоку.

Запропонований метод визначення миттєвих значень масової витрати потоку дозволяє реалізувати системи автоматичної стабілізації розрідження пульпи у пісковому жолобі, яких у даний час не існує і кульові млини не можуть забезпечити найкращі показники подрібнення руди.

ВИСНОВКИ

В роботі розв'язана задача віртуального визначення характеристик піскового потоку на виході з механічного односпірального класифікатора за технологічним параметром – висотою піскового тіла, яку можливо достатньо просто, точно і безконтактно виміряти порівняно недорогим технічним засобом в межах зміни циркулюючого навантаження циклу подрібнення-класифікації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Вперше отримано зв'язок між об'ємом матеріалу у вертикальних шарах піскового тіла і його довжиною та висотою, що дозволило створити математичну модель процесу сходження пісків у пісковий жолоб і визначення їх загального об'єму за відомою висотою.

2. Вперше отримана математична модель у формі алгебраїчних рівнянь, яка описує значення миттєвої витрати пісків в процесі їх розвантаження у пісковий жолоб односпірального класифікатора за визначеною висотою піскового тіла, що дозволяє підвищити продуктивність кульового млина та якість подрібнення твердого шляхом стабілізації розрідження пульпи.

Встановлено, що отримана математична модель дозволяє визначати ряд додаткових характеристик піскового потоку – середнє значення масової витрати, об'єм піскового тіла, значення екстремумів витрати у циклі розвантаження та інше.

Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що наявність запропонованої математичної моделі дозволяє покращити експлуатаційні характеристики технологічного обладнання, зменшити перевитрати електроенергії, куль і футеровки при подрібненні руди на збагачувальних фабриках.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетних науково-дослідних тем Кіровоградського національного технічного університету «Автоматизація процесів керування розділенням твердого по крупності у механічних спіральних класифікаторах» (номер державної реєстрації 0115U003602), «Моделювання технологічних процесів у механічних спіральних класифікаторах з метою вдосконалення математичних моделей» (номер державної реєстрації 0115U003962) та спрямована на реалізацію пріоритетних напрямів програми Європейського Союзу з досліджень та інновацій «Horizon-2020».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Демидович Б. П. Численные методы анализа / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. – М. : Наука, 1967. – 368 с.
2. Гончаров В. Л. Теория интерполирования и приближения функций / В. Л. Гончаров. – М. : Гостехиздат, 1954. – 327 с.
3. Ковин Г. М. Оператор пульта управления на обогатительных фабриках / Г. М. Ковин. – М. : Недра, 1987. – 304 с.
4. Троп А. Е. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / А. Е. Троп, В. З. Козин, Е. В. Прокофьев. – М. : Недра, 1986. – 303 с.
5. Виноградов В. С. Автоматизация технологических процессов на горнорудных предприятиях / В. С. Виноградов. – М. : Недра, 1984. – 167 с.

6. Автоматизация процессов обогащения руд / [Марюта А. Н., Давидкович А. С., Гуленко Т. И., Кондратец В. А.]. – К. : Техніка, 1972. – 140 с.
7. Кондратец В. А. Обеспечение идентификации соотношения руда/вода в мельницах с циркулирующей нагрузкой / В. А. Кондратец // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 11. – С. 95–102.
8. Улитенко К. Я. Определение циркулирующей нагрузки измельчительных агрегатов в АСУТП / К. Я. Улитенко, Р. П. Маркин // Обогащение руд. – 2005. – № 2. – С. 42–46.
9. Дмитриев В. И. Исследование динамических характеристик спирали классификатора для задач автоматического контроля / В. И. Дмитриев // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2007. – № 28. – С. 14–24.
10. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / [Морозов В. В., Топчаев В. П., Улитенко К. Я. и др.]. – М. : Изд. дом «Руда и Металлы», 2013. – 512 с.
11. Кондратец В. О. Теоретичне дослідження сканування поверхні відкритих матеріальних потоків променями незмінної довжини / В. О. Кондратец // Вісник Криворізького національного університету. – 2013. – Вип. 35. – С. 174–178.
12. Кондратец В. О. Теоретичне дослідження активного і пасивного сканування поверхні відкритих матеріальних потоків / В. О. Кондратец, А. М. Мацуї // Гірничий вісник. – 2015. – Вип. 100. – С. 52–57.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2016.

Після доробки 23.12.2016.

Кондратец В. А.¹, Мацуї А. Н.²

¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, Кропивницький, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, Кропивницький, Україна

ВИРТУАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В ПЕСОЧНОМ ЖЕЛОБЕ ОДНОСПИРАЛЬНЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ

Актуальность. Бедные железные руды, которые требуют обогащения, являются сырьевой основой черной металлургии. Их измельчение в первых стадиях из-за перерасхода электроэнергии, стальных шаров и футеровки снижает конкурентоспособность продукции. Уменьшить перерасход возможно автоматизацией этих процессов, однако преградой здесь является неразрешенность задачи получения информации о песочной нагрузке с необходимой точностью, хотя проводились широкие и длительные исследования. Прогрессивный виртуальный подход открывает перспективы решения этой проблемы.

Целью данной работы является разработка математической модели виртуального определения характеристик песочного потока на выходе механического односпирального классификатора по технологическому параметру, который достаточно просто, точно и бесконтактно возможно измерить сравнительно дешевым техническим средством.

Метод. Предложен метод графоаналитического моделирования, где рассматривается песочное тело классификатора (материал между двумя соседними витками спирали), которое подается горизонтальными и вертикальными слоями, образуя по высоте и длине элементы $\Delta h \times \Delta l$, что позволяет получать зависимости объема песков в вертикальных слоях от длины песочного тела. Эти зависимости при определенной высоте, кратной Δh , имеющие минимум и максимум, аппроксимировались математическими выражениями в виде семи членов ряда Фурье. Они устанавливают связь между их конкретными составляющими и высотой песочного тела. Использование данных связей представляет возможность находить мгновенные объемный и массовый расходы материала в песочный желоб при любом значении высоты песков.

Результаты. Полученная математическая модель процесса разгрузки песков в виде трех основных и двадцати двух дополнительных уравнений позволяет определять характеристики песочного потока по высоте песочного тела классификатора. Мгновенное значение расхода изменяется по достаточно сложной закономерности, которая сохраняется при различных высотах песочного тела. С увеличением высоты закономерно возрастают как средние, так и мгновенные значения массового расхода песков.

Выводы. Впервые получена математическая модель, которая описывает значения мгновенного расхода песков в процессе их разгрузки в песочный желоб односпирального классификатора по измеренной высоте песочного тела. Благодаря этому возможно стабилизировать разрежение пульпы в шаровой мельнице, повысить ее производительность, качество измельченного твердого и улучшить эксплуатационные характеристики технологического оборудования и, как следствие, уменьшить перерасходы при измельчении руд.

Ключевые слова: односпиральный классификатор, мгновенный массовый расход песков, виртуальное определение, математическая модель.

Kondratets V. A.¹, Matsui A. N.²

¹Dr.Sc., Professor, Professor of Department of Automation of Production Processes Kirovohrad National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automation of Production Processes Kirovohrad National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

VIRTUAL DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF SINGLE-SPIRAL CLASSIFIERS FLOW SAND CHUTE

Context. Poor iron ore which requires enrichment are the raw material basis for the steel industry. Their grinding in the early stages due to cost overruns electricity, steel balls and the lining reduces the competitiveness of products. Reduce the cost overruns is possible by automation these processes, however, an obstacle here is the unresolved problem of obtaining information about a load of sand with the required accuracy, although carried out a broad and long-term studies. Progressive virtual approach offers the prospect of solving this problem.

The objective of this work is to develop a mathematical model of the virtual characterization of sandy stream at the output of the mechanical single-spiral classifier on technological parameter, which is quite simply, accurately and without contact is possible to measure relatively cheap technical means.

Method. A method of graphic-analytical modeling, which examines the sand body of the classifier (the material between two adjacent turns of the spiral), which is supplied with horizontal and vertical layers, forming the height and length of the elements $\Delta h \times \Delta l$, which allows to obtain, depending sand volume in the vertical layers of sand-body length. These relationships at a certain height, fold Δh , having a minimum and maximum were approximated mathematical expressions in the form of seven members of the Fourier series. They establish a link between their individual components and a height of sand bodies. The use of these links gives the possibility to find instant volume and mass of material costs in the sand chute for any value of the height of the sand.

Results. The resulting mathematical model of unloading sand in the form of three main and twenty-two additional equations allows to determine the characteristics of the sand flow adjustment sand classifier body. The instantaneous flow rate varies in a rather complex pattern, which is stored at different altitudes sand bodies. With increasing height naturally increase as the average and instantaneous values of the mass flow of sand.

Conclusions. For the first time it produced a mathematical model that describes the values of instantaneous flow of sand in the process of unloading in the sand chute single-spiral classifier from the measured height of the sand body. This makes it possible to stabilize the dilution of the pulp in a ball mill, to increase its productivity, quality and divided solid improve the performance of the process equipment and, consequently, reduce the cost overruns during grinding ore.

Keywords: single-spiral classifier, instantaneous mass flow of sand, virtual determination, mathematical model.

REFERENCES

- Demidovich B. P., Maron I. A., Shuvalova E. Z. Chislennyye metody analiza. Moscow, Nauka, 1967, 368 p.
- Goncharov V. L. Teoriya interpolirovaniya i priblizheniya funktsii. Moscow, Gostekhizdat, 1954, 327 p.
- Kovin G. M. Operator pul'ta upravleniya na obogatitel'nykh fabrikakh. Moscow, Nedra, 1987, 304 p.
- Trop A. E., Kozin V. Z., Prokof'ev E. V. Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh fabrik. Moscow, Nedra, 1986, 303 p.
- Vinogradov V. S. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov na gornorudnykh predpriyatiyakh. Moscow, Nedra, 1984, 167 p.
- Maryuta A. N., Davidkovich A. S., Gulenko T. I., Kondratets V. A. Avtomatizatsiya protsessov obogashcheniya rud. Kiev, Tekhnika, 1972, 140 p.
- Kondratets V. A. Obespechenie identifikatsii sootnosheniya ruda/voda v mel'nitsakh s tsirkuliruyushchei nagruzkoi, *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No. 11, pp. 95–102.
- Ulitenko K. Ya., Markin R. P. Opredelenie tsirkuliruyushchei nagruzki izmel'chitel'nykh agregatov v ASUTP, *Obogashchenie rud*, 2005, No. 2, pp. 42–46.
- Dmitriev V. I. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik spirali klassifikatora dlya zadach avtomaticheskogo kontrolya, *Zbirnik naukovikh prats' Natsional'nogo girnichnogo universitetu*, 2007, No. 28, pp. 14–24.
- Morozov V. V., Topchaev V. P., Ulitenko K. Ya. i dr. Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. Moscow, Izd. dom «Ruda i Metally», 2013, 512 p.
- Kondratec' V. O. Teoretychne doslidzhennja skanuvannja poverhni vidkrytyh material'nyh potokiv promenjamy nezminnoi' dovzhyny, *Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu*, 2013, Vyp. 35, pp. 174–178.
- Kondratec' V. O., Macuj A. M. Teoretychne doslidzhennja aktyvnogo i pasyvnoho skanuvannja poverhni vidkrytyh material'nyh potokiv, *Girnychyj visnyk*, 2015, Vyp. 100, pp. 52–57.