

В.О. КОНДРАТЕЦЬ, канд.. техн. наук, проф.
Кіровоградський національний технічний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СКАНУВАННЯ ПОВЕРХНІ ВІДКРИТИХ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ ПРОМЕНЯМИ НЕЗМІННОЇ ДОВЖИНИ

Показано, що сканування поверхні відкритих матеріальних потоків доцільно здійснювати нахиленими променями незмінної довжини, більшої у кілька разів максимального значення висоти матеріалу. Необхідну точність сканування можливо забезпечити чотирма променями, розташованими певним чином по ширині потоку.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Чорна металургія України у цей час не може існувати без збагачення залізних руд, яке відрізняється значними енерго – та матеріаловитратами. Особливо це відноситься до процесів подрібнення руди, які недостатньо керовані в наслідок відсутності деяких інформаційних засобів. Найбільш складно вимірювати витрату піскових потоків спіральних механічних класифікаторів. Відсутність достатньо точних і надійних засобів контролю витрати піскових потоків значно знижує ефективність процесів збагачення, що не відповідає вимогам Державної науково-технічної програми “Ресурсозберігаючі технології нового покоління у гірничометалургічному комплексі”. Тому тема статті, присвяченої розв’язанню частини даної задачі, є актуальною. Матеріали, що використані при підготовці до друку даної статті, отримані в процесі виконання науково-дослідної теми “Комп’ютерно-інтегрована система автоматичного регулювання співвідношенням руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням” (державний реєстраційний номер 0105U008334).

Аналіз досліджень і публікацій. Задачу автоматичного управління подрібненням руди у барабанних млинах тривалий час розв’язують як вітчизняні, так і закордонні вчені. У різні роки цю задачу розв’язують В.А. Воронов, В.В. Дьяконенко, О.М. Марюта, Ю.Г. Качан, Є.В. Кочура, В.С. Моркун, В.М. Назаренко, В.С. Процуто, О.М. Тихонов, О.В. Паркуян, В.П. Хорольський, А.Дж. Лінч, Д. Гілберт та багато інших. Аналіз стану розв’язання даної задачі показує, що необхідна якість керування ще не досягнута. Для її розв’язання, зокрема, необхідно стабілізувати розрідження пульпи у барабанному млині, що не можливо без сканування поверхні відкритого пісового потоку. Перша спроба сканування поверхні відкритого пісового потоку у пісовому жолобі класифікатора відмічена в роботі [1]. Пристрій надійно працював у промислових умовах впродовж семи місяців. За цей час відмов не було, помічене незначне зношення робочої кромки пристрою, яке практично не впливало на точність показань. Пристрій легко пропускав крупногабаритні предмети, не виходячи з ладу. Тривалий час інших пропозицій до розв’язання задачі не поступало. Ряд питань з організації такого сканування поверхні відкритого потоку залишався не розв’язаним.

Постановка завдання. Метою даної роботи є знаходження умов сканування поверхні відкритих матеріальних потоків для забезпечення точності і надійності визначення площі їх поперечного перерізу.

Викладення матеріалу та результати. В процесі сканування поверхні потоку можливо отримати неперервну інформацію про координати його поперечного перерізу в часі. Однак насамперед необхідно дати відповідь на питання – яким чином і якими засобами доцільно сканувати поверхню потоку для отримання достатньої точності і надійності результатів.

Пісковий потік у пісовому жолобі спірального механічного класифікатора здійснює складні рухи зі зміною висоти матеріалу вздовж потоку і по його ширині. Спочатку розглянемо ідеалізований випадок, допустивши, що пісковий потік рухається з рівномірним розподілом матеріалу по висоті з можливістю її зміни. Координати поверхні потоку можливо вимірювати або з боку основи пісового жолоба, або з боку відкритого матеріалу, або з боку бортів. При вимірюванні з боку основи на результати будуть впливати властивості днища пісового жолоба та вимірюваного середовища. Третій варіант характеризується тим же, лише замість днища будуть впливати дві стінки транспортуючого засобу. Тому вимірювання доцільно здійснювати з боку відкритої поверхні потоку, визначаючи зону розподілу контрольованого середовища і повітря.

Дану задачу можливо розв'язати, використовуючи кілька способів вимірювання координат поверхні розподілу середовищ. Аналіз показує, що можливо реалізувати шість основних способів: визначення довжини направленої і відбитого під гострим кутом променів від поверхні потоку (а); визначення довжини направленої і відбитого під прямим кутом зустрічного променя (б); визначення загальної довжини направленої і відбитого під гострим кутом зустрічного променя від поверхні потоку (в); визначення довжини променя, направленої під прямим кутом до потоку (г); визначення довжини променя, направленої під гострим кутом до потоку (д); визначення кута повороту променя незмінної довжини при торканні поверхні потоку (е). При цьому вихідною величиною буде довжина l променів (або кут повороту променя α), а вхідною – рівень h матеріалу.

Абсолютна чутливість способу вимірювання буде дорівнювати відношенню приросту вихідної до приросту вхідної величини. Наприклад, для першого випадку буде наступне. Якщо на поверхню розподілу направити і прийняти відбитий промінь, то його подвійний шлях буде функцією висоти матеріалу при певному незмінному положенні основи. При нескінченно малому прирості висоти потоку Δh приріст шляху променя здійснюється на $\Delta l = \Delta h / \sin \alpha$, де α - кут падіння. Оскільки промінь здійснює подвійний шлях, то загальний приріст вихідної величини складає $2\Delta l$. Абсолютна чутливість вимірювання буде

$$S_a = \frac{2\Delta l}{\Delta h} = \frac{2}{\sin \alpha}. \quad (1)$$

Чутливості вимірювання і залежності для їх визначення приведені в табл.1.

Таблиця 1.

Залежності для визначення і значення абсолютних чутливостей вимірювання висоти потоку різними способами

Показники	Способи вимірювання висоти потоку					
	а	б	в	г	д	е
залежність	$S = 2 \cdot \frac{\Delta l}{\Delta h}$	$S = 2 \cdot \frac{\Delta h}{\Delta h}$	$S = 2 \cdot \frac{\Delta l}{\Delta h}$	$S = \frac{\Delta l}{\Delta h} = \frac{\Delta h}{\Delta h}$	$S = \frac{\Delta l}{\Delta h}$	$S = \frac{\Delta l}{\Delta h} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$
значення	$2 / \sin \alpha$	2,0	$2 / \sin \alpha$	1,0	$1 / \sin \alpha$	$1 / \sin(\alpha / 2)$
чисельні значення	2,31	2,0	2,31	1,0	1,16	1,41...10

Як видно з залежностей табл.1, абсолютна чутливість усіх способів вимірювання не має розміру. Порівняємо чутливості окремих способів між собою. Гострий кут падіння променів у реальних пристроях можна прийняти рівним $\alpha = 60^\circ$, тоді $\sin 60^\circ = 0,866$. За цих умов перші п'ять способів вимірювання будуть мати значення абсолютних чутливостей, які змінюються від 1,0 до 2,31. У шостому способі кут α відраховується від вертикалі. При малих значеннях Δh він буде незначним, малим буде і синус цього кута, а чутливість – великою, тим більше, що вона зв'язана лише з половиною кута α . Наприклад кут $\alpha = 11^\circ$, тоді $\sin 5^\circ 30' \approx 0,1$, а абсолютна чутливість 10. З ростом кута α чутливість буде зменшуватись. При найбільшому куті 90° , який на практиці ніколи не буде мати місця, чутливість буде наближеною і складе 1,41. Тому найбільш перспективно вимірювати координати поверхні потоку променем незмінної довжини, який змінює своє положення в просторі – слідує за поверхнею потоку.

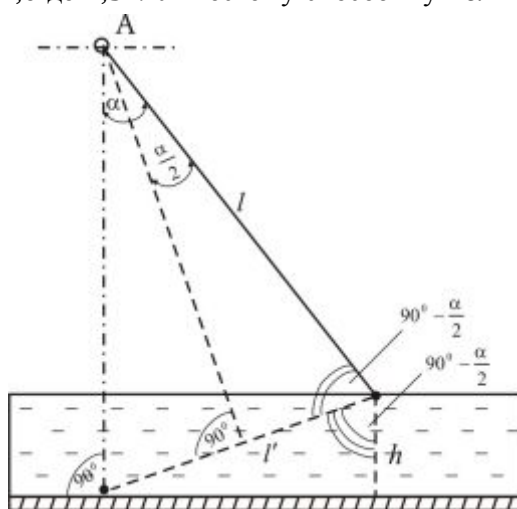


Рис.1. Взаємозв'язок між положенням променя незмінної довжини і потоком матеріалу

Знайдемо взаємозв'язок між висотою потоку h і кутом повороту α променя незмінної довжини, який знаходиться одним закріпленим кінцем у нерухомій точці над матеріалом, а його вільний кінець ковзає по поверхні, скануючи її координати (рис.1).

Довжини відрізка l' (рис.1), що з'єднує між собою промінь незмінної довжини в початковому і довільному стані, з трикутника, однією з сторін якого є висота потоку h , дорівнює

$$l' = \frac{h}{\cos(90^\circ - \alpha/2)} = \frac{h}{\sin \alpha/2}. \quad (2)$$

З трикутника з сторонами l і $l'/2$ визначаємо

$$l' = 2 \cdot l \cdot \sin \alpha/2, \quad (3)$$

де l - незмінна довжина променя.

Прирівнявши праві частини виразів (2) і (3), отримаємо

$$\sin^2 \alpha/2 = h/2 \cdot l, \quad (4)$$

звідки

$$\sin \alpha/2 = \sqrt{h/2 \cdot l}. \quad (5)$$

Вираз (5) дозволяє записати значення вихідної величини, тобто, статичну модель перетворювача, що визначає висоту матеріального потоку у контрольованій точці

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin \sqrt{h/2 \cdot l}. \quad (6)$$

З виразу (6) випливає, що при незмінній довжині променя l за значеннями кута α , які визначають його положення в просторі, можливо судити про висоту потоку матеріалу h у транспортуючому засобі.

З залежності (6) також видно, що статична характеристика вимірювального засобу є нелінійною. Залежності, побудовані за виразом (6), при різних значеннях довжин променя, показані на рис.2. З рис.2 видно, що статичні характеристики нелінійні, особливо на початкових ділянках. При найбільшій довжині променя отримуємо найдовшу лінійну ділянку характеристики.

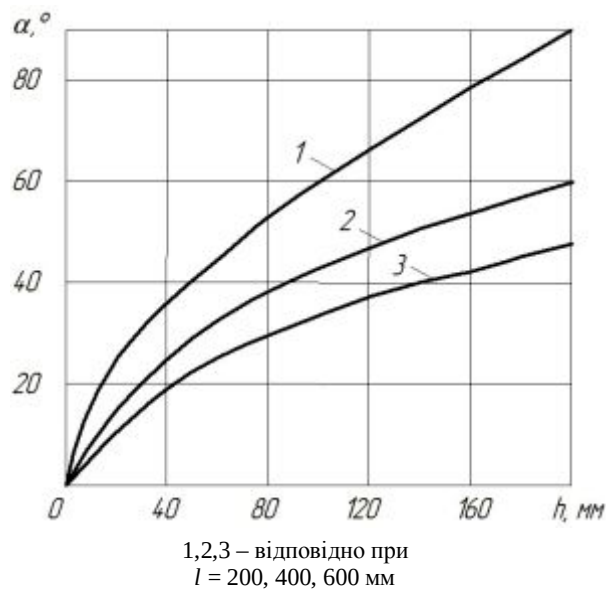


Рис.2. Залежність кута розташування скануючого променя відносно вертикалі від висоти матеріалу в потоці при різних його довжинах

Розглянутий промінь незмінної довжини сканує поверхню вздовж потоку в одній точці поперечного перерізу. При скануванні поверхні потоку головною задачею є визначення площі S поперечного перерізу матеріалу за сумою висот h по ширині B , тобто, знаходження визначеного інтегралу від функції $f(x)$ розподілу середовища в напрямі, перпендикулярному переміщенню. Визначати цю площу необхідно з максимальною точністю для заданої кількості контрольованих висот. Із теорії наближених обчислень визначених інтегралів відомо, що найбільшу точність забезпечує підхід Чебишева [2,3]. Однак цей метод передбачає різні закономірності розташування точок контролю на відрізку інтегрування функції при тій чи іншій кількості. У зв'язку з цим з застосуванням персонального комп'ютера був проведений великий обсяг досліджень по аналізу похибок вимірювань площі

поперечного перерізу потоку при значній кількості контрольованих висот для різних функцій розподілу матеріалу по ширині потоку. Дослідженнями встановлено, що для більшості функцій, які характеризують розподіл матеріалу по ширині потоку, похибка визначення площі поперечного перерізу за кількома вимірними висотами незначна. Вона на кілька порядків менше помилки, що виникає від можливої нелінійності статичних характеристик широко використовуваних засобів вимірювання висоти потоків. Однак, вона різко збільшується у випадках потоків з розташуванням матеріалу по ширині, що відповідає синусоїдальній функції.

Тому похибку визначення площі поперечного перерізу розглянемо на прикладі потоку з синусоїдальною функцією розподілу матеріалу - $y = 1 + \sin(\varpi \cdot x)$, де $x \in [0, 2]$ - умовно вибраний відрізок, що характеризує ширину транспортного засобу. Частоту будемо змінювати від 0 до 3 радіан, що з великим запасом відповідає потокам, які можуть існувати в реальних умовах. Максимальні похибки визначення площі поперечного перерізу в межах змін при різних кількості контрольованих висот мають наступні значення: $\lambda(1) = 41\%$; $\lambda(2) = 5,5\%$; $\lambda(3) = 1,8\%$; $\lambda(4) = 0,28\%$; $\lambda(5) = 0,14\%$; $\lambda(6) = 0,018\%$; $\lambda(7) = 7 \cdot 10^{-5}\%$.

Результати досліджень показали, що при чотирьох контрольованих висотах поперечного перерізу похибка складає $\lambda(4) = 0,28\%$. Вона практично на порядок менша похибки від не лінійності статичних характеристик засобів вимірювання цього параметра і нею можливо знехтувати. Збільшення кількості контрольованих висот вище чотирьох не приведе до відчутного підвищення точності вимірювання, а суттєво ускладнить конструкцію технічних засобів.

Згідно підходу Чебишева у випадку чотирьох контрольованих значень висоти координат точок вимірювання будуть: $x_1 = -x_4 = 0,794654$; $x_2 = -x_3 = 0,187592$, якщо ширину потоку розглядати як відрізок $[1; -1]$. З такою точністю первинні перетворювачі встановити практично не можливо. Зважаючи на це, дані координати доцільно округлити до 0,8 і 0,2. У перерахунку на одиничну ширину потоку це складає 0,4 і 0,1, якщо підрахунок точок вимірювання висоти потоку вести з кожного боку транспортного засобу.

Визначимо вплив зроблених допущень на точність вимірювання площі поперечного перерізу потоку. Для цього при різних частотах розраховувалась похибка δ_1 визначення площі поперечного перерізу за чотирма контрольованими висотами на відстанях 0,4 і 0,1 від країв потоку. Для порівняння були розраховані похибки площі поперечного перерізу за чотирма контрольованими висотами з рівномірним розподілом точок вимірювання. Дані розрахунків занесені до табл. 2.

Таблиця 2.

Максимальні похибки визначення площі поперечного перерізу потоку при вимірюванні в чотирьох точках, %

Частота ϖ , рад	Порядок розташування точок вимірювання	
	За визначеною закономірністю, $ \delta_1 $	Рівномірний, $ \delta_2 $
0,1	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$
0,4	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,30
0,8	$8,9 \cdot 10^{-2}$	1,76
1,2	$2,3 \cdot 10^{-1}$	4,59
1,6	0,40	8,1
2,0	0,56	12,0
2,4	0,51	12,9
2,8	0,20	8,1

З даних табл. 2 слідує, що при контролі висоти потоку на відстанях 0,4 і 0,1 ширини від його країв похибка δ_1 визначення площі поперечного перерізу з ростом частоти зміни поверхні вздовж лінії розстановки вимірюваних точок зростає до 0,56% з наступним зменшенням. Отже, лише при певній частоті розташування поверхні матеріалу може бути отримана найбільша похибка 0,56%. При інших значеннях частот вона буде значно меншою. Тому подію виникнення похибки 0,56% при визначенні площі поперечного перерізу потоку слід рахувати малоюмовірною. Це дозволяє при вимірюванні знехтувати даною похибкою.

Максимальне значення похибки δ_2 , що відповідає рівномірній розстановці точок вимірювання по ширині потоку, складає 12,9% (табл. 2). Ця похибка більше ніж на порядок перевищує максимальне значення δ_1 . Похибка 12,9% визначення площі поперечного перерізу потоку не допустима при вимірюванні, тому рівномірний порядок розстановки точок контролю висоти матеріалу застосовувати не можливо. Даний висновок очевидний, оскільки звичайне

обчислення визначеного інтегралу не може забезпечувати таку точність, як метод Чебишева, який гарантує найвищу точність для будь-якої функції, що описує розподіл матеріалу по ширині потоку.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Таким чином, відкриті поверхні потоків доцільно сканувати пристроями, що реалізують спосіб вимірювання координат променем незмінної довжини, який змінює своє положення в просторі. Довжина променя повинна бути у кілька разів більшою максимального значення висоти потоку. Контроль висоти потоку необхідно здійснювати у чотирьох точках по його ширині - на відстані 0,1 і 0,4 від країв. Це забезпечує найвищу точність вимірювання площі поперечного перерізу і найбільш раціональну конструкцію вимірювальної апаратури.

Подальші дослідження необхідно спрямувати у напрямі технічної реалізації запропонованого підходу визначення площі поперечного перерізу матеріального потоку та забезпечення лінійності статичної характеристики при неперервному вимірюванні його висоти у кожній контрольованій точці.

Список літератури

1. А. с. 570398 СССР, МКИ В03 В 13/04. Устройство для измерения циркулирующей нагрузки / **Ф.Н. Дегтярев, А.А. Мерзляков, В.А. Кондратец, Л.П. Байда, Н.В. Гончаров** (СССР). - №1676560/03; заявл. 28.06.71; опубл. 30.08.77, Бюл. №32.
2. **Пискунов Н.С.** Дифференциальное и интегральное исчисление. Т. 1 / Пискунов Н.С. – М.: Наука, 1978. – 456с.
3. **Демидович Б.П.** Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. - М.: Наука, 1970. – 664с.