

УДК 001.57:681.5.015

А.М. МАЦУЙ

Кіровоградський національний технічний університет

**МОДЕЛЮВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗТАШУВАННЯ МАТЕРІАЛУ
ВЗДОВЖ ВЕРХНЬОЇ ЧАСТИНИ ПІСКОВОГО ТІЛА МЕХАНІЧНОГО
СПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА**

Подрібнення бідних залізних руд у перших стадіях рудозбагачувальних фабрик відрізняється великими енерго- та матеріаловитратами, що в значній мірі викликано недосконалістю керування односпіральними класифікаторами, де, зокрема, недостатньо вивчена закономірність формування піскового тіла. Врахування цієї закономірності дозволить покращити якість автоматичного керування процесом класифікації подрібненої руди за крупністю і тим самим зменшити витрати у першій стадії подрібнення. Розв'язання частини цієї задачі складає актуальність даної роботи. Її метою є розроблення підходу математичного моделювання і отримання закономірності розташування матеріалу вздовж верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора. Встановлено, що верхню частину піскового тіла можна подати послідовним рядом вертикальних стовпчиків, об'єми матеріалу в яких підпорядковані параболічній залежності з максимумом кількості в центральній його частині, який визначається продуктивністю пісків.

Ключові слова: спіральний класифікатор, піскове тіло, розташування матеріалу, моделювання закономірностей.

А.Н. МАЦУЙ

Кіровоградський національний технічний університет

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА ВДОЛЬ ВЕРХНЕЙ
ЧАСТИ ПЕСКОВОГО ТЕЛА МЕХАНИЧЕСКОГО СПИРАЛЬНОГО КЛАССИФИКАТОРА**

Измельчение бедных железных руд в первых стадиях рудообогатительных фабрик отличается большими энерго- и материальными расходами, что в значительной мере вызвано несовершенством управления односпиральными классификаторами, где, в частности, недостаточно изучена закономерность формирования пескового тела. Учет этой закономерности позволит улучшить качество автоматического управления процессом классификации измельченной руды по крупности и тем самым снизить затраты в первой стадии измельчения. Решение части этой задачи составляет актуальность данной работы. Ее целью является разработка подхода математического моделирования и получения закономерности размещения материала вдоль верхней части пескового тела механического спирального классификатора. Установлено, что верхнюю часть пескового тела возможно представить последовательным рядом вертикальных столбцов, объемы материала в которых подчинены параболической зависимости с максимумом количества в центральной его части, который определяется продуктивностью песков.

Ключевые слова: спиральный классификатор, песковое тело, размещение материала, моделирование закономерностей.

A.N. MATSUI

Kirovohrad National Technical University

**MODELING LAWS OF PLACING OF MATERIAL ALONG UPPER SAND BODY MECHANICAL
SPIRAL CLASSIFIER**

Grinding poor iron ore in the first stages of ore-dressing factory has large energy and material costs, which is largely caused by the imperfection of the control single spiral classifiers, where, in particular, insufficiently studied regularity formation sand body. Accounting for this regularity will improve the quality of process control ground ore classification by size and thus reduce costs in the first grinding step. The decision of this problem is the relevance of this work. Its purpose is developing an approach of mathematical modeling and producing distribution regularities material along the top of the sand body mechanical spiral classifier. It was found that the upper part of the sand body is possible submit a succession of vertical columns, the volume of material which are subject to a parabolic relationship with a maximum amount in the central part of which is determined by the productivity of the sand.

Keywords: spiral classifier, sand body, placing material, modeling regularities.

Постановка проблеми

Основною складовою сировини чорної металургії в Україні є магнетитовий концентрат, який отримують шляхом збагачення бідних залізних руд. Перед збагаченням бідні залізні руди подрібнюють у кілька стадій. Перша стадія подрібнення – класифікації здійснюється переважно у кульових млинах і механічних спіральних класифікаторах. Тут спостерігаються самі великі витрати електричної енергії і матеріалів у вигляді металевих куль і футеровки. В наслідок цього собівартість вітчизняного магнетитового концентрату значно вища порівняно з зарубіжними аналогами, що зменшує конкурентоспроможність продукції України. В певній мірі покращити стан можливо удосконаленням автоматичного керування першою стадією подрібнення-класифікації, де не останню роль відіграє інформаційне забезпечення, зокрема, врахування закономірності розташування матеріалу вздовж піскового тіла механічного спірального класифікатора і його верхньої частини. Оскільки дана стаття присвячена розв'язанню проблеми, її тема є актуальною. Актуальність її також підкреслюється як законодавством України, так і тематикою досліджень Кіровоградського національного технічного університету.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автоматизацією перших стадій подрібнення-класифікації займаються давно як зарубіжні [1], так і вітчизняні вчені, однак певні особливості не були врахованими або врахованими не в повній мірі. Тому до цих проблем повертаються в останні роки вітчизняні вчені. Наприклад, в роботах [2-4] розглядається формування робастного автоматизованого керування замкнутим циклом подрібнення на основі H_∞ -норми, формування адаптивного керування процесом подрібнення залізничної сировини в умовах невизначеності характеристик об'єкта, звертається увага на важливість перших стадій як подрібнення, так і збагачення. Одночасно [5] зроблено акцент на відсутність надійних засобів контролю необхідної точності та на значну їх вартість. На необхідність розробки інформаційних засобів звертається увага в роботі [6], а на важливість автоматичного вимірювання витрати продуктів збагачення – у [7]. Серед останніх інформаційних засобів ефективними є ультразвукові [8], перспективними у збагачувальних технологіях можуть стати алгоритмічні методи визначення параметрів, наприклад [9], які дозволяють отримувати високу точність навіть в умовах вимірювання одного з параметрів з великою похибкою. Щодо вимірювання параметрів піскового тіла механічного спірального класифікатора запропоновано один спосіб, який стосується лише визначення загального об'єму матеріалу [10]. Дослідженням закономірностей розташування матеріалу вздовж піскового тіла, зокрема його верхньої частини, механічного спірального класифікатора ніхто не займався. Цій задачі і присвячена дана публікація.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було розроблення підходу математичного моделювання і отримання закономірностей розташування матеріалу вздовж верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора.

Викладення основного матеріалу дослідження

Дослідження проведемо на конкретному типі механічного спірального класифікатора ІКСН-30, який отримав широке розповсюдження на потужних магнітозбагачувальних фабриках України. Його встановлюють під кутом $18^\circ 30'$ до горизонту. Він має двозахідну спіраль діаметром 3 м, виконану з кроком 1,8 м, яка звичайно обертається зі швидкістю 3 об/хв (0,05 об/с) і обладнана робочими елементами висотою 0,33 м [11]. Піскове тіло утворюється між двома витками спіралі.

Розріз піскового тіла у вертикальній площині, що проходить через вісь обертання спіралі, показано на рис.1. Рівень пісків у міжвитковому просторі слід визначати вздовж вертикалі AB , яка проходить через точку контакту постелі і заднього витка 4 у самій нижній частині. Відстань у вертикальній площині від основи витка 4 до горизонтальної поверхні, що обмежує зверху нижню частину піскового тіла 5, дорівнює:

$$h_c = \frac{B}{2} \sin \alpha, \quad (1)$$

де B – крок спіралі;
 α – кут нахилу корпусу класифікатора і спіралі до горизонту.

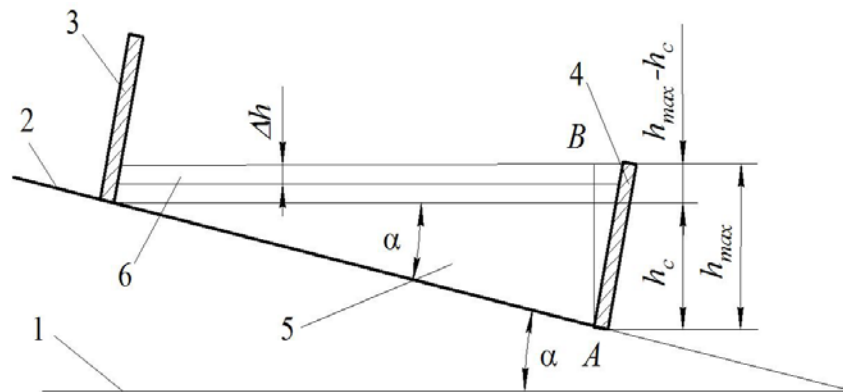


Рис. 1. Піскове тіло механічного спірального класифікатора у розрізі вертикальною площиною, що проходить через вісь обертання:
1 – горизонталь; 2 – постіль циліндричної форми; 3, 4 – витки спіралі; 5, 6 – відповідно нижня і верхня частини піскового тіла

Для прийнятого класифікатора ця відстань є величиною незмінною і дорівнює $h_c=0,28557$ м. Найбільше значення рівня пісків складає:

$$h_{max} = h_e \cos \alpha , \tag{2}$$

де h_e – висота робочого елемента спіралі, яка дорівнює 0,33 м.

Ця величина дорівнює $h_{max}=0,3129$ м і також є незмінною для конкретного класифікатора.

Як було доведено, моделювання закономірностей розташування матеріалу вздовж піскового тіла механічного спірального класифікатора слід здійснювати графоаналітичним методом з розбивкою його на елементарні складові в горизонтальній і вертикальній площинах. Кожна елементарна складова повинна мати довжину Δl вздовж осі піскового тіла і висоту Δh . Ширина кожної елементарної складової визначається розміром конкретного шару матеріалу у місці її розташування. Щоб можливо було оцінювати об'єм матеріалу в вертикальних стовпчиках, складених з частинок довжиною Δl і висотою Δh , їх необхідно при моделюванні розташовувати відносно вертикальної площини, перпендикулярної осі обертання, яка проходить через вертикаль AB .

Оскільки h_c є константою, то її необхідно розбити на кілька однакових відрізків, які будуть визначати величину Δh . Достатня точність моделювання буде забезпечена, якщо покласти $\Delta h=0,0317$ м. Тоді нижня частина піскового тіла буде вмещувати 9 горизонтальних шарів матеріалу. Враховуючи те, що навіть при меншій швидкості обертання спіралі $n=1,5$ об/хв (0,025 об/с) класифікатор з надлишком забезпечує потрібну продуктивність пісків, в процесі моделювання можливо приймати висоту пісків дещо меншою h_{max} . При цьому у верхній частині піскового тіла може розташуватись до двох шарів матеріалу товщиною $\Delta h=0,0317$ м. Найбільшу висоту пісків при моделюванні прийемо на рівні 349,8 мм замість 351 мм, що відповідає h_{max} . Така невелика невідповідність не вплине на результати дослідження.

Кут нахилу витків спіралі до осі її обертання дорівнює:

$$\gamma = \arctg 4R_c / B , \tag{3}$$

де R_c – радіус спіралі.

Для прийнятого спірального класифікатора $\gamma=73^\circ 20'$.

Вид зверху на верхній шар верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора приведено на рис.2. З рисунка видно, що він являє собою трапецію з основами $D'E'$ і DE та параметром $l=B/2$. Хорда FE , яка відноситься до кола радіусом R_c при максимальному рівні пісків може бути знайденою за залежністю:

$$FE = 2\sqrt{R_c^2 - (R_c - h_e \cos \alpha)^2} , \tag{4}$$

а більша основа трапеції за відношенням:

$$DE = FE / \sin \gamma \quad (5)$$

і дорівнює $DE=1,91$ м при $FE=1,83$ м.

Хорду $D'F'$ знаходимо аналогічно, прийнявши рівень пісків, що дорівнює $2\Delta h$. Її визначимо за виразом:

$$D'F' = 2\sqrt{R_c^2 - (R_c - 2\Delta h)^2} \quad (6)$$

Тоді меншу основу трапеції визначимо відповідно виразу:

$$D'E' = D'F' / \sin \gamma \quad (7)$$

Вона буде дорівнювати $D'E'=0,9$ м при $D'F'=0,86$ м.

Моделювання закономірностей розташування матеріалу вздовж верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора будемо здійснювати відповідно лініям, паралельним прямим $E'M'$, DM , створюючи у горизонтальних шарах пісків елементарні складові довжиною Δl (рис.2). Об'єми пісків у.

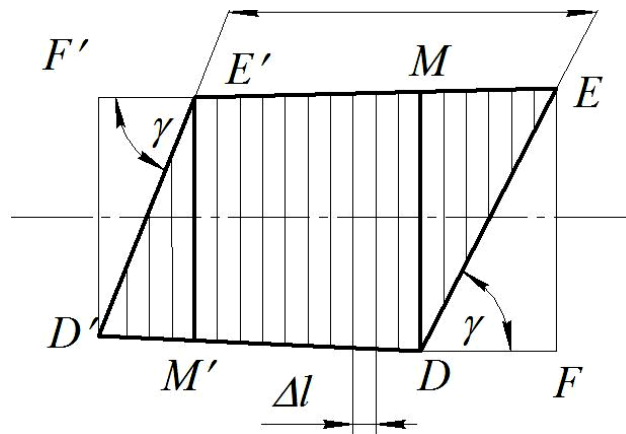


Рис. 2. Горизонтальна площина верхнього шару верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора

верхньому шарі верхньої частини піскового тіла дорівнюють площі геометричних фігур довжиною Δl , помноженій на висоту шару матеріалу Δh . Отже, визначення об'ємів матеріалу в елементарних складових верхньої частини піскового тіла зводиться до знаходження площі відповідних геометричних фігур довжиною Δl (рис.2). Аналіз показав, що точність моделювання буде достатньою, якщо прийняти $\Delta l=0,05$ м.

Верхня горизонтальна площина верхнього шару матеріалу верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора показана на рис.3. Вона розбита прямими, перпендикулярними осі обертання спіралі на 28 ділянок довжиною $\Delta l=0,05$ м. Елементарні складові піскового тіла характеризуються трьома кутами: $\gamma=73^\circ 20'$, $\gamma_1=29^\circ 30'$ та $\gamma_2=41^\circ 30'$. Враховуючи особливості обробки даних, на рис.3 виділено три області: A , B і C . Площі елементарних складових довжиною Δl потребують визначення середньої лінії трапеції. Площі трикутників у областях A і C можливо знаходити через середню лінію, рахуючи їх трапеціями, коли меншу основу трапеції прирівняти до нуля. Основи трапеції знаходимо таким чином. У трикутнику області A , рахуючи його трапецією з меншою основою, що дорівнює нулю, розмір більшої основи h_{A0} беремо з креслення. Він дорівнює $0,18$ м, а середня лінія – $0,09$ м. Нижню основу першої трапеції в області A знайдемо відповідно залежності:

$$h_{A1} = h_{A0} + \Delta l(\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \gamma_2) \quad (8)$$

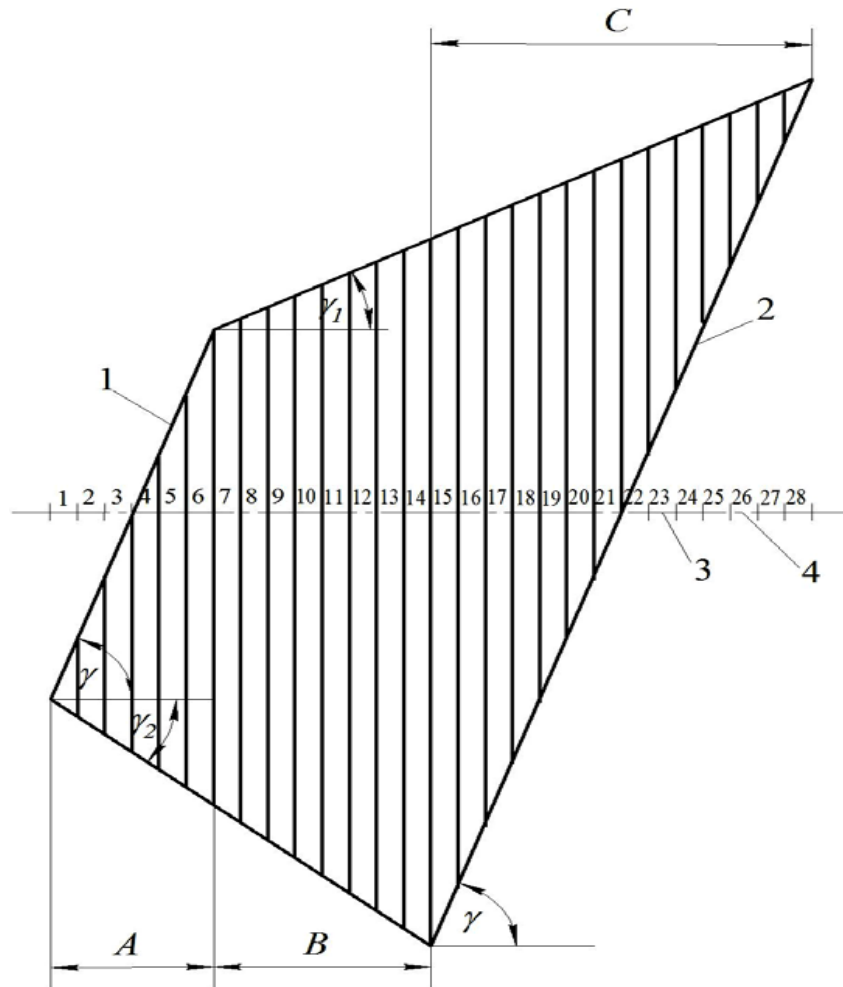


Рис. 3. Верхня горизонтальна площина верхньої частини піщового тіла механічного спірального класифікатора:

1 – лінія дотику переднього витка спіралі і матеріалу; 2 – лінія дотику заднього витка спіралі і матеріалу; 3 – проекція осі обертання спіралі; 4 – номери стовпчиків (горизонтальних елементарних тіл)

Тоді її середня лінія буде дорівнювати:

$$h_{c1} = (h_{A0} + h_{A1})/2. \quad (9)$$

Більша основа першої трапеції є меншою основою наступної трапеції і т.д. Нижня основа будь-якої трапеції в області *A* (рис.3) за аналогією дорівнює:

$$h_{Ai} = h_{A0} + n_A \Delta l (tg \gamma + tg \gamma_2), \quad (10)$$

де n_A – порядковий номер трапеції в області *A*.

Розрахунки в області *B* (рис.3) виконаємо за умови відомої меншої основи $h_{A7} = h_{A0} + 5 \Delta l (tg \gamma + tg \gamma_2)$ трапеції 7. Вона буде базовим значенням для області *B*. Тому позначимо $h_{A7} = h_{BB}$. Більшу основу будь-якої трапеції в області *B* (рис.3) знаходимо відповідно залежності:

$$h_{Bi} = h_{BB} + n_B \Delta l (tg \gamma_1 + tg \gamma_2), \quad (11)$$

де n_B – порядковий номер трапеції в області *B*.

Розрахунки в межах області C (рис.3) розпочинаємо з трикутника аналогічно області A . Базовим значенням в області C буде основа трикутника, тобто, менша основа першої трапеції. Позначимо її $h_{C0}=0,14$ м.

Нижню основу будь-якої трапеції в області C , розпочинаючи рахунок від трикутника, будемо визначати з залежності:

$$h_{Ci} = h_{C0} + n_C \Delta l (\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \gamma_1), \quad (12)$$

де n_C – порядковий номер трапеції в області C .

Верхня горизонтальна площина нижнього шару верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора подана на рис.4. З рисунка видно, що нижній шар верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора відповідає верхньому шару, однак є певні відмінності. Мають місце відхилення у кількості елементів в окремих областях, а самі області аналогічні. Тому розрахунки можливо виконувати за тими ж знайденими залежностями. Кути γ_1 і γ_2 змінилися і дорівнюють - $\gamma_1=24^\circ 30'$, а $\gamma_2=45^\circ$.

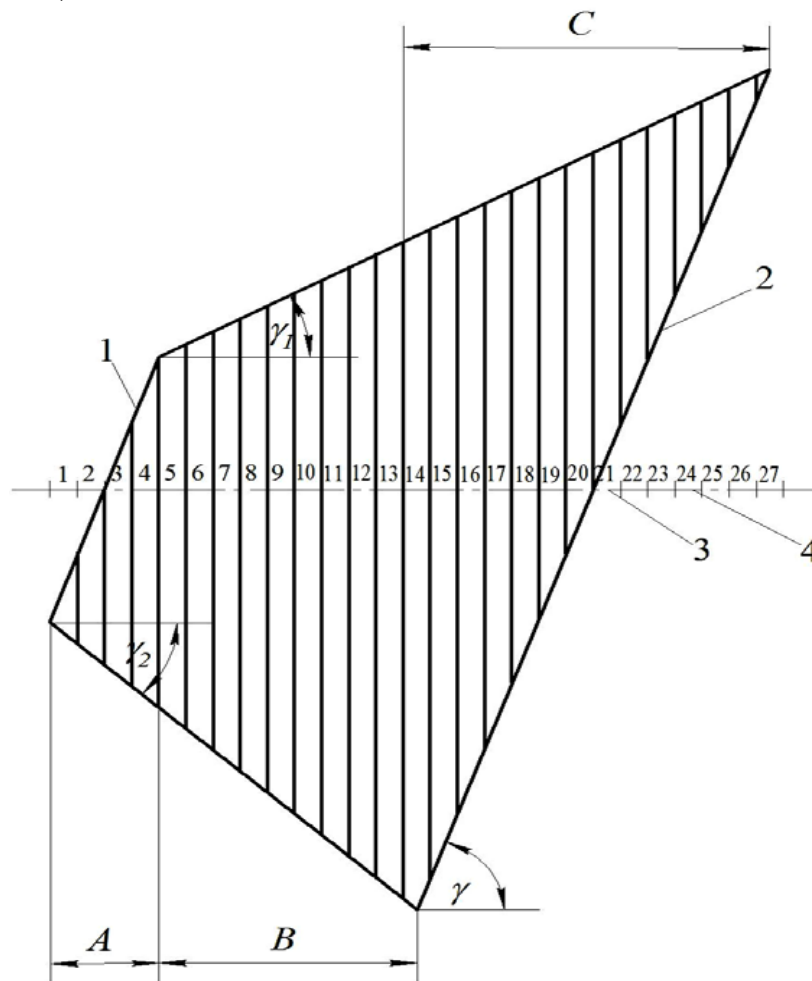


Рис. 4. Верхня горизонтальна площина нижнього шару верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора:

1 – лінія дотику переднього витка спіралі і матеріалу; 2 – лінія дотику заднього витка спіралі і матеріалу; 3 – проекція осі обертання спіралі; 4 – номери стовпчиків (горизонтальних елементарних тіл)

Відповідно залежностям (8)...(12) розроблялася спеціальна програма визначення об'ємів пісків у елементарних складових довжиною Δl . Фрагмент результатів розрахунків, виконаних на персональному комп'ютері, подано в табл.1.

Таблиця 1

Дані елементарних складових верхньої частини піскового тіла механічного спірального
класифікатора

| Номер стовпчика, в якому знаходиться елементарна складова | Об'єм пісків в елементарній складовій нижнього шару піскового тіла, м ³ | Об'єм пісків в елементарній складовій верхнього шару піскового тіла, м ³ | Сумарний об'єм пісків у стовпчиках верхньої частини піскового тіла, м ³ |
|---|---|--|---|
| 1 | 0 | 0,000143 | 0,000143 |
| 2 | 0,000158 | 0,000428 | 0,000586 |
| 3 | 0,000476 | 0,000713 | 0,001189 |
| 4 | 0,000761 | 0,000999 | 0,001760 |
| 5 | 0,001078 | 0,001300 | 0,002378 |
| 6 | 0,001316 | 0,001585 | 0,002901 |
| · | · | · | · |
| · | · | · | · |
| · | · | · | · |
| 12 | 0,002045 | 0,002378 | 0,004423 |
| 13 | 0,002171 | 0,002488 | 0,004659 |
| 14 | 0,002298 | 0,002599 | 0,004897 |
| 15 | 0,002409 | 0,025040 | 0,004913 |
| 16 | 0,002203 | 0,002330 | 0,004533 |
| 17 | 0,002029 | 0,002140 | 0,004170 |
| 18 | 0,001839 | 0,001950 | 0,003789 |
| · | · | · | · |
| · | · | · | · |
| · | · | · | · |
| 23 | 0,000919 | 0,001046 | 0,001965 |
| 24 | 0,000745 | 0,000856 | 0,001601 |
| 25 | 0,000555 | 0,000666 | 0,001221 |
| 26 | 0,000365 | 0,000476 | 0,000841 |
| 27 | 0,000174 | 0,000301 | 0,000475 |
| 28 | 0,000048 | 0,000111 | 0,000159 |

З даних табл.1 видно, що характер зміни об'єму пісків у відповідних вертикальних стовпчиках, що належать як верхньому і нижньому шарам матеріалу, так і сумарному об'єму, однаковий. Послідовно у стовпчиках об'єм пісків від достатньо малих значень спочатку достатньо стрімко наростає, потім приймає максимальне значення, а згодом знову зменшується практично до нуля. Розкрити характер зміни об'єму матеріалу можливо побудовою залежностей вмісту пісків у окремих вертикальних стовпчиках, які показані на рис.5. З рис.5 видно, що об'єм матеріалу вздовж піскового тіла плавно збільшується практично від нуля, приймає достатньо плавний максимум з наступною більш стрімкою зміною до найменшого значення. Характер зміни об'єму матеріалу у вертикальних стовпчиках вздовж осі однаковий в нижньому, верхньому шарах матеріалу і в цілому у верхній частині піскового тіла. Спостерігається певна несиметричність в рисунках. Вона очевидно притаманна спіралі зважаючи на те, що всі графіки ліворуч від вертикальної осі відрізняються випуклістю, а праворуч їх вітки більш прямолінійні.

Конкретизація отриманих при моделюванні залежностей потребувала розгляду найбільш простих класів аналітичних функцій [12] і способів підбору емпіричних залежностей [13]. З розгляду аналітичних функцій витікає, що не можливо підібрати якусь єдину формулу на усьому інтервалі зміни об'єму вздовж довжини піскового тіла. У таких випадках розбивають інтервал зміни аргументу на окремі частини і на кожній з них підбирають свою формулу [13]. Однак у даному випадку це буде не зручно при подальшому використанні залежностей. Тому з застосуванням [14] та інших літературних джерел з питань підбору формул робилась спроба описати даний процес єдиною формулою.

Отримані в процесі математичного моделювання залежності достатньо добре апроксимуються параболою (рис.5), де 1 – графіки отримані моделюванням, а 2 – графіки апроксимуючих функцій. Для нижнього, верхнього шарів матеріалу і в цілому для верхньої частини піскового тіла відповідно отримані апроксимуючі вирази:

$$V = -0.7l^2 + 94.5l - 789.375, \text{ см}^3, \quad (13)$$

$$V = -0.7l^2 + 94.5l - 590.375, \text{ см}^3, \tag{14}$$

$$V = -1.2l^2 + 162l - 567.5, \text{ см}^3, \tag{15}$$

де V – об’єм пісків (см^3) вздовж піскового тіла довжиною l , см.

З рівнянь (13)-(15) видно, що їх параметри не дуже змінюються при характеристиці окремих шарів матеріалу і значно більше змінюються з накопиченням матеріалу між сусідніми витками.

Приведені залежності отримані в процесі коректного обґрунтування підходів і застосувань випробуваних методів досліджень, точного математичного апарату. У технічних системах існують закони симетрії. Технічна система, що піддається суттєвому впливу середовища у вигляді потоків речовин, має певний тип симетрії, зумовлений комбінацією і характером цих потоків [15]. Тут має місце осьова симетрія. Підтвердження в процесі математичного моделювання осової симетрії також гарантує достовірність отриманих результатів. Це дозволяє їх використовувати при проведенні аналітичних досліджень механічних спіральних класифікаторів у різних режимах роботи.

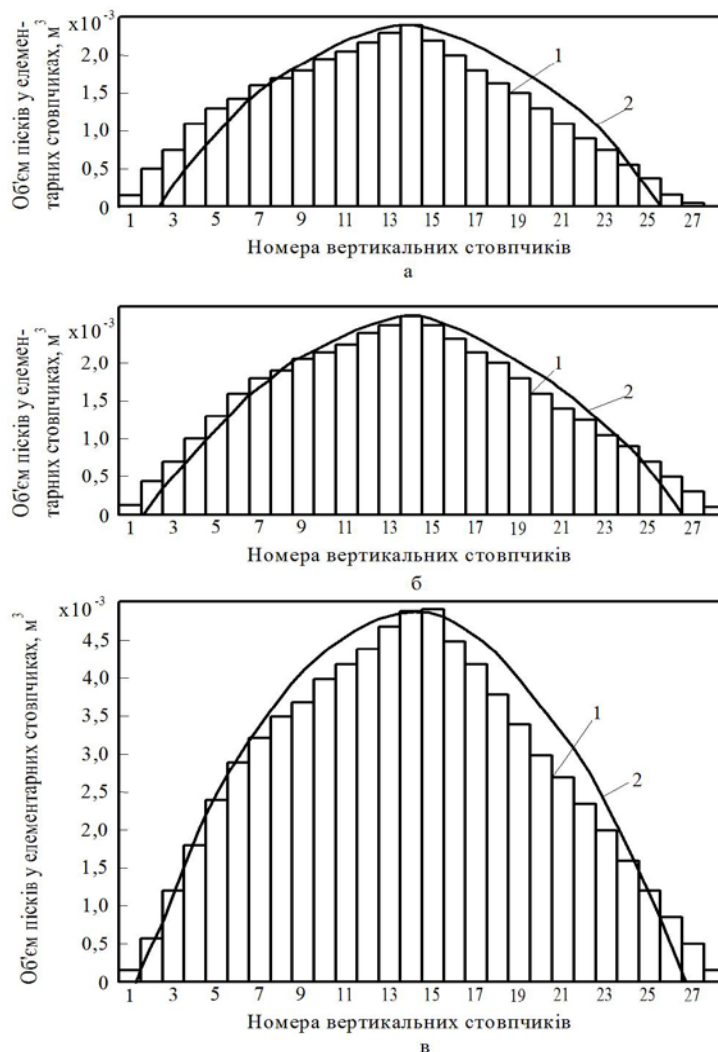


Рис. 5. Об’єм пісків у елементарних стовпчиках верхнього піскового тіла:
а – нижнього шару матеріалу; б – верхнього шару матеріалу; в – у верхній частині піскового тіла в цілому;
1 – залежність, отримана в процесі моделювання; 2 – графік апроксимуючої функції

Висновки

1. Розроблено підхід математичного моделювання і отримана конкретна закономірність розташування матеріалу вздовж верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора.

2. В механічному спіральному класифікаторі 1КНС-30 верхня частина піскового тіла в об'ємному вираженні складає послідовний ряд вертикальних стовпчиків, об'єми матеріалу в яких підпорядковані параболічній залежності з максимум кількості в центральній його частині, який визначається продуктивністю пісків.

3. Дані залежності можливо використовувати при аналітичному дослідженні режимів роботи різних типів механічних спіральних класифікаторів.

4. Результати виконаних досліджень дозволяють встановлювати закономірності сходження пісків і руху пульпи у піскових жолобах механічних спіральних класифікаторів.

Список використаної літератури

1. Herbst J.A. Model-based control of mineral processing operations/J.A. Herbst, W.T. Pate, A.E. Oblad // Powder Technology.- 1992.- Vol.69.- P. 21-32.-ISSN 0032-5910.
2. Моркун В.С. Формирование робастного автоматизированного управления замкнутым циклом измельчения на основе H_∞ -нормы / В.С. Моркун, Н.В.Моркун, В.В.Тронь // Гірничий вісник: наук.-техн. зб. ДВНЗ «КНУ».- 2014.- Вип. 98.- С. 83-85.
3. Тронь В.В. Формування адаптивного керування процесом подрібнення залізородної сировини в умовах невизначеності характеристик об'єкта / В.В. Тронь, К.В.Маєвський // Гірничий вісник: наук.-техн. зб. ДВНЗ «КНУ».- 2015.- Вип. 99.- С. 27-32.
4. Азарян А.А. Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд / А.А. Азарян, Ю.Ю. Кривенко, В.Г. Кучер // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць.- 2014.- Вип. 36.- С. 276-280.
5. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / Купін А.І. – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008.- 204с.
6. Измельчение. Энергетика и технология / [Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др.]– М.: Изд. дом “Руда и Металлы”, 2007.– 296 с.
7. 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.
8. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогатительного производства / [Моркун В. С., Потапов В. Н., Моркун Н. В., Подгородецкий Н. С.]. – Кривой Рог : Изд. центр КТУ, 2007. – 283 с.
9. Кондратець В.О. Ідентифікація співвідношення руда/вода в процесі подрібнення пісків класифікатора / В.О. Кондратець, А.М. Мацуй // Вісник Вінницького політехнічного інституту.- 2009.- №3.- С. 8-12.
10. А.с. 1530258 СССР, МКИ В 03 В 13/00. Способ определения продуктивности спирального классификатора по пескам / Е.Ф. Морозов (СССР). – № 4385577/22-03; заявл. 29.02.88; опубл. 23.12.89, Бюл. № 47.
11. Верхотуров М.В. Гравитационные методы обогащения / Верхотуров М.В.- М.: МАКС Пресс, 2006.- 352с.
12. Пчелин Б.К. Специальные разделы высшей математики / Пчелин Б.К.- М.: Высшая школа, 1973.- 464с.
13. Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике / Мышкис А.Д.- [3-е изд.]– М.: Наука, 1969.- 640с.
14. Зельдович Я.Б. Элементы прикладной математики / Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис.- М.: Наука, 1965.- 615 с.
15. Кузнецов Ю.М. Теория технических систем / Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.А.: під ред. Ю.М. Кузнецова.- К.-Тернопіль, 1998.- 310 с.