УДК 001.57:681.5.015

А.М. МАЦУЙ, В.О. КОНДРАТЕЦЬ
Кіровоградський національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СХОДЖЕННЯ ПІСКІВ У МЕХАНІЧНОМУ ОДНОСПІРАЛЬНОМУ КЛАСИФІКАТОРІ

Збитки, які несе гірничозбагачувальна галузь при подрібненні руди у перших стадіях, можливо зменшити їх автоматизацією, однак однією з перепон на цьому шляху виступає відсутність ефективних засобів контролю піскового навантаження. Тому метою роботи було моделювання і отримання закономірностей сходження пісків класифікатора. Встановлені залежності між параметрами піскового потоку і висотою пісків у міжвитковому просторі, які дозволяють розробити більш точну систему визначення піскового навантаження.

Ключові слова: односпіральний класифікатор, графоаналітичне моделювання, закономірності, витрата, висота пісків, екстремуми

А.Н. МАЦУЙ, В.А. КОНДРАТЕЦ
Кировоградский национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СХОЖДЕНИЯ ПЕСКОВ В МЕХАНИЧЕСКОМ ОДНОСПИРАЛЬНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ

Убытки, которые несет горнообогатительная отрасль при измельчении руды в первых стадиях, возможно уменьшить их автоматизацией, однако одной из преград на этом пути выступает отсутствие эффективных средств контроля песковой нагрузки. Поэтому целью работы было моделирование и получение закономерностей схождения песков классификатора. Установлены зависимости между параметрами пескового потока и высотой песков в междувитковом пространстве, которые позволяют разработать более точную систему определения песковой нагрузки.

Ключевые слова: односпиральный классификатор, графоаналитическое моделирование, закономерности, расход, высота песков, экстремумы

A.N. MATSUI, A.V. KONDRATETS
Kirovohrad National Technical University

MODELING OF LAWS DISPLACEMENT SANDS IN MECHANICAL SINGLE-SPIRAL CLASSIFIER

Losses incurred by the mining and processing industry by grinding the ore in the early stages, it is possible to reduce by their automation, but one of the obstacles in the way advocates the absence of effective controls sands load. Therefore, the aim of the work was the modeling and obtains displacement patterns of sand classifier. The established dependencies between the parameters of the flow of sand and sand in height between loop space allows to develop a more accurate system for measuring sands load.

Keywords: single-spiral classifier, graph-analytic modeling, laws, consumption, sands height, extremes.

Постановка проблеми

Україна займає провідні місця з випуску продукції чорної металургії. Внаслідок зменшення вмісту заліза у багатих рудах в останні десятиліття все ширше розробляються родовища бідних залізних руд, які потребують збагачення. Зокрема, в Україні діють самі потужні гірничозбагачувальні комбінати в світі. Перед збагаченням бідні залізні руди подрібнюють у кілька стадій до розкриття вкраплин корисного компоненту, на що відносять більше половини з усіх витрат підприємства. Особливо витратною є перша стадія подрібнення-класифікації, яку звичайно здійснюють у кульових млинах і односпіральних класифікаторах. Через перевитрачання електричної енергії, куль і футеровки собівартість вітчизняного концентрату дещо вища зарубіжних аналогів, що знижує його конкурентоспроможність на світовому ринку. Позитивно вплинути на цю ситуацію можливо, зокрема, шляхом удосконалення автоматичного керування даними процесами [1], що в більшій мірі стримується відсутністю ефективних інформаційних засобів. Особливо це стосується визначення піскового навантаження у даному технологічному циклі. Оскільки дана публікація спрямована на вирішення задач удосконалення цих інформаційних засобів, її тема є актуальною. Її актуальність також підтверджується

законодавством України з цих проблем і науковою тематикою Кіровоградського національного технічного університету.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зарубіжні і вітчизняні вчені автоматизацією перших стадій подрібнення і класифікації руд займаються давно, однак ці системи ще не володіють потрібними характеристиками. Тому в теперішній час звертається увага на необхідність підвищення ефективності автоматизації цієї ділянки технологічного процесу [2]. В роботі [3] відмічається відсутність надійних засобів контролю необхідної точності та значна їх вартість, а в роботах [1, 4] – необхідність розробки інформаційних засобів. Серед останніх розробок ефективними є ультразвукові засоби контролю [5], однак вони не пристосовані для вимірювання таких параметрів. Запропоновані підходи визначення піскової продуктивності односпіральних класифікаторів розрахунковим шляхом [6] також не отримали застосування на збагачувальних фабриках. Дослідженням закономірностей сходження пісків у механічних односпіральних класифікаторах з наступним використанням їх для отримання технологічної інформації ніхто не займався. Тому дана публікація присвячена розв'язанню цієї задачі.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було розроблення підходу моделювання сходження пісків у механічному односпіральному класифікаторі і отримання закономірностей розташування матеріалу в процесі руху.

Викладення основного матеріалу дослідження

Моделювання здійснимо, орієнтуючись на конкретний тип механічного односпірального класифікатора 1-КСН-30, який в Україні отримав саме широке розповсюдження. Його корпус, а отже і спіраль, розташовують під кутом 18°30′ до горизонту. Спіраль діаметром 3м виконана двозахідною з кроком 1,8м. Між двома витками спіралі утворюється піскове тіло. Спіраль обертається зі швидкістю 0,05 об/с (3 об/хв) за допомогою електродвигуна з редуктором. Витки спіралі обладнані змінними робочими елементами висотою 0,33м [7]. Такий класифікатор використовують у перших стадіях подрібнення вихідної руди на магнітозбагачувальних фабриках. Він звичайно працює у замкненому циклі з кульовим млином продуктивністю 44,4…50,0 кг/с (160…180 т/год) руди.

Піскове тіло такого класифікатора, розташоване між двома витками спіралі, створює нижню і верхню частини, які мають відмінну форму. Знизу піскове тіло класифікатора обмежується постіллю циліндричної форми, яка створюється з піскового продукту при обертанні спіралі. Під дією спіралі кінцеве піскове тіло витісняється з циліндричної постелі – сходить у пісковий жолоб класифікатора. Сходження буде нерівномірним, оскільки воно визначається специфікою розташування матеріалу вздовж осі спіралі.

Зважаючи на те, що піскове тіло односпірального класифікатора складне за формою, подамо його у вертикальній площині у вигляді ряду шарів висотою Δh. Для конкретного класифікатора відстань у вертикальній площині від основи подавального витка до горизонтальної поверхні, що обмежує зверху нижню частину піскового тіла, дорівнює [8]

$$h_C = \frac{B_C}{2}\sin\alpha\,, \tag{1}$$

де B_C – крок спіралі;

α – кут нахилу корпуса класифікатора (спіралі) до горизонту.

Для прийнятого класифікатора ця відстань складає h_C = 0,28557м і є величиною незмінною.

Найбільше значення висоти пісків дорівнює [8]

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

де h_e – висота робочого елемента, яка складає 0,33м. Для класифікатора 1-КСН-30 h_{max} = 0,3129м і також є незмінною.

Відповідно знайденим h_C і h_{max} встановлена величина Δh = 0,0317м. При цьому у нижній частині піскового тіла буде розташовано 9 горизонтальних шарів матеріалу, а у верхній – 2.

Кут нахилу витків спіралі до осі її обертання дорівнює [8]

$$\gamma = arc\,tg\, 4R_C / B_C\,, \tag{3}$$

де R_C – радіус спіралі.

Для даного механічного односпірального класифікатора γ = 73°20′.

Моделювання нижньої частини піскового тіла механічного односпірального класифікатора розпочнемо з верхньої геометричної фігури горизонтального розрізу на стику нижньої і верхньої частин. Дана геометрична фігура показана на рис.1. Вона має форму, обмежену параболою і нахиленою під кутом γ прямою, що характеризує лінію змочування на робочих елементах подавального витка спіралі.

При обертанні спіралі сходження кінцевого піскового тіла класифікатора буде відбуватись відповідно лініям (рис.1), перпендикулярним проекції осі обертання на площину, що розглядається. При цьому на процес сходження пісків у пісковий жолоб механічного односпірального класифікатора буде

впливати їх в'язкість і певним чином крупність. Тобто, піскове тіло не може сходити з циліндричної постелі у пісковий жолоб при нескінченно малій товщині вертикального шару, що було б характерно для сухого дрібного сипкого матеріалу. Піскове тіло буде сходити при певній товщині падаючого шару, оскільки володіє в'язкістю і певною крупністю. Нехтуючи певним впливом на даний процес зміни в'язкості і крупності пісків, будемо рахувати, що матеріал під дією рухомої спіралі сходить у пісковий жолоб механічного односпірального класифікатора з однаковою товщиною шару. Аналіз показав, що товщина падаючого шару може дорівнювати 0,05м. Тоді на рис.1 слід провести вертикальні лінії через інтервал Δl=0,05м, тобто, розбити піскове тіло на окремі послідовно розташовані елементарні складові довжиною Δl, висотою Δh і довжиною, що визначається контурами піскового тіла в горизонтальній площині. Процес сходження пісків при цьому можливо характеризувати об'ємами пісків, що знаходяться в елементарних складових кожного шару матеріалу товщиною Δh і вказаною довжиною. Тобто, знаходження об'ємів матеріалу в елементарних складових піскового тіла зводиться до визначення площ відповідних фігур довжиною Δl (рис.1).

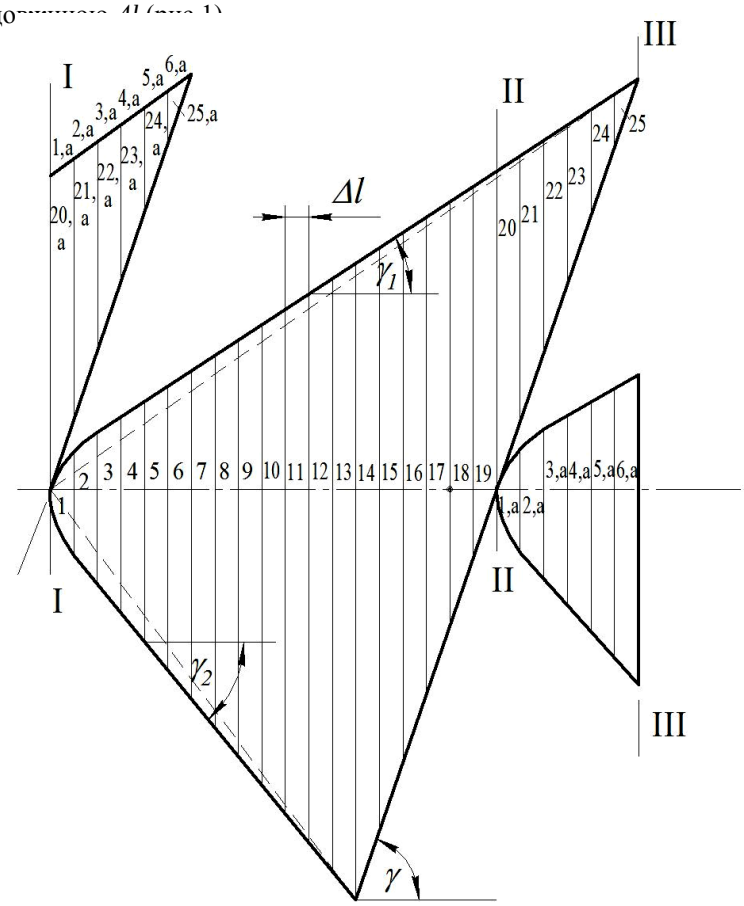

Рис.1. Подання горизонтальної площини верхнього шару нижньої частини піскового тіла односпірального класифікатора параболою, обмеженою нахиленою прямою, та окремими геометричними фігурами з характерними зонами визначення об'єму матеріалу в елементарних складових:
I-I – лінія початку розвантаження попереднього піскового тіла; II-II – лінія кінця розвантаження попереднього піскового тіла і початку розвантаження наступного піскового тіла; III-III – лінія кінця спільного розвантаження попереднього і наступного піскового тіла

З початку розвантаження пісків піскове тіло звільняється від утримуючої функції переднього витка, сходження відбувається під дією рухомого заднього (подавального) витка. Зважаючи на те, що постіль, яка виконує функцію русла, має циліндричну форму, матеріал при розвантаженні має спочатку тенденцію переміщення до самої нижньої точки русла, а потім перевалюватись через пісковий поріг у пісковий жолоб. Це забезпечує здійснення сходження пісків не за всією шириною піскового тіла, а в основному в центральній точці циліндричного каналу.

Піскове тіло механічного односпірального класифікатора не може сходити в пісковий жолоб ізольовано, оскільки спостерігається його зв'язок з попереднім і наступним пісковими тілами, як це показано на рис.1. З рис.1 видно, що на позиції сходження кінцевого піскового тіла є залишок

попереднього піскового тіла, який представлений шістьма елементарними складовими 1,а…6,а. Елементарні складові двох піскових тіл при цьому сходять спільно в межах першого-шостого елементів. Елементарні складові 1…6 сходять безпосередньо, а 1,а…6,а – ковзаючи вздовж поверхні циліндричної постелі і переднього витка. З рис.1 видно, що безпосередньо кінцеве піскове тіло включає 25 елементарних складових довжиною Δl, однак у такому режимі воно зійти не може в наслідок наявності сусідніх піскових тіл. З рис.1 видно, що цикл розвантаження матеріалу відбувається з включенням 19 елементарних складових, далі цикли повторюються. Отож, сходження піскового тіла слід розглядати як розвантаження пісків у циклі довжиною 19Δl, тобто, в межах 1…19 елементарних складових або в межах ліній I-I; II-II.

На рис.1 розглянуто самий верхній шар матеріалу нижньої частини піскового тіла. У нижніх шарах форма фігур у горизонтальних перетинах піскового тіла повторюється при зменшених розмірах, що характеризуються довжиною відповідних ліній змочування. Площі цих геометричних фігур вздовж осі спіралі l також є змінними, тому їх також доцільно оцінювати на елементарних ділянках Δl. Елементарні складові піскового тіла вздовж вертикальної осі повинні бути вирівняними, не мати відносних зсувів у горизонтальних площинах. Тут центральною виступає точка, через яку проходить вертикаль у місці контакту нижньої крайки подавального витка спіралі з постіллю у самій нижній її частині. Вздовж цієї вертикалі з місця контакту слід відраховувати висоту матеріалу у пісковому тілі. Ця точка відповідає кінцю елементарної складової 17 на рис.1.

Як встановлено попередніми дослідженнями, моделювання сходження піскового тіла слід виконувати графоаналітичним методом. Для цього необхідно побудувати проекції нормалізованих геометричних фігур, що відповідають шарам нижньої частини піскового тіла на горизонтальну площину, в якій знаходиться верхня поверхня найвищого шару. Достатню точність можливо отримати у випадку використання не параболічної геометричної фігури, а трикутника, як це показано на рис.1. Розроблена методика передбачає знаходження довжини змоченої лінії на подавальному витку і кількості значень Δl вздовж піскового тіла, які розташовуються вздовж осі відносно центральної точки. Нормалізована геометрична фігура являє собою середню лінію між двома проекціями на горизонтальну площину сусідніх шарів матеріалу. Це дає можливість враховувати крайові ефекти у шарах матеріалу, де товщина буде меншою Δh. Зважаючи на те, що початкова частина нормалізованого шару матеріалу на нахиленій поверхні відрізняється меншою товщиною, ніж Δh, для «вирівнювання» показника нехтуємо довжиною піскового тіла в межах (1…1,5) Δl. З врахуванням розробленої методики побудовані проекції усіх дев'яти нормалізованих шарів матеріалу нижньої частини піскового тіла механічного односпірального класифікатора 1-КСН-30 і здійснено вимірювання розмірів геометричних фігур.

Моделювання верхньої частини піскового тіла механічного односпірального класифікатора також доцільно розпочати з верхньої геометричної фігури, яка знаходиться у горизонтальній площині [8]. Її форма і розміри, отримані відповідно розробленій методиці, приведені на рис.2, де, крім того, нанесені лінії сходження матеріалу через довжину Δl =0,05м. З рис.2 видно, що на позиції сходження кінцевого піскового тіла є залишок попереднього піскового тіла, який розповсюджується на десять елементарних складових 1-10. Елементарні складові двох піскових тіл при цьому сходять спільно. З рис.2 видно, що цикл сходження піскового тіла знаходиться в межах 18$^{-ти}$ його елементарних складових, тобто, від перерізу I-I до перерізу II-II. Далі такі цикли повторюються.

У відповідності з формою елементи піскового тіла механічного односпірального класифікатора характеризуються трьома кутами, які дорівнюють у даному випадку γ=73°20′; γ_1=29°30′; γ_2=41°30′.

У кожному циклі сходження пісків можливо виокремити чотири характерні зони 1, 2, 3 і 4. Зона 5 дублює зону 1, 6 – зону 2, 7 – зону 3. Таким чином створюються цикли сходження пісків у пісковий жолоб односпірального класифікатора.

Враховуючи рівномірність руху, швидкість поступального переміщення робочих елементів витка спіралі відносно днища класифікатора, а отож і пісків, складе

$$\upsilon_{PP} = \frac{B_C n_C}{60} = 0.09 м/с, \quad (4)$$

де B_C – крок спіралі, що дорівнює 1,8м;

n_C – число обертів спіралі, що дорівнює 3 об/хв. (0,05 об/с).

При цьому цикл розвантаження піскового тіла механічного односпірального класифікатора відбувається на базисі B_C/2=0,9м, що відповідає 10с. Елемент матеріалу довжиною Δl =0,05м відповідно сходить за Δt =0,5555с.

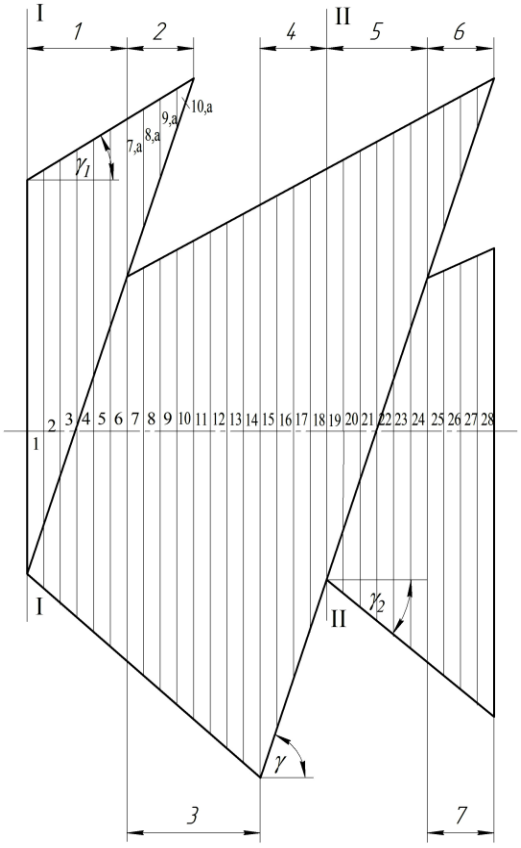

Рис.2. Подання горизонтальної площини верхнього шару верхньої частини піскового тіла класифікатора кількома геометричними фігурами з характерними зонами визначення кількості матеріалу в елементарних об'ємах

Подання горизонтальної площини нижнього шару верхньої частини піскового тіла механічного односпірального класифікатора окремими геометричними фігурами здійснено на рис.3. З рис.3 видно, що нижній шар верхньої частини піскового тіла механічного односпірального класифікатора відповідає верхньому шару, однак є певні відмінності. Спостерігаються відхилення у кількості елементів в окремих зонах, а самі зони аналогічні. Кути γ_1 і γ_2 змінилися і дорівнюють – γ_1=24°30′, а γ_2=45°.

Отже, в усіх випадках визначення об'єму елементарних складових піскового тіла зводиться до знаходження довжини середньої лінії геометричної фігури з послідуючим перемноженням її на Δl і Δh.

У процесі моделювання об'єму піскового тіла всі шари матеріалу центрувалися відносно стику між 17-м і 18-м елементами. При цьому піскове тіло подавалося стовпчиками довжиною Δl, висотою, що визначалася рівнем матеріалу між витками спіралі, кратним Δh, і шириною в залежності від розміру відповідного шару матеріалу в горизонтальній площині та місцем розташування в ньому елементарної складової. При визначенні об'єму матеріалу в елементарних складових верхньої частини піскового тіла поправки на крайові ефекти, де не повністю витримувалася висота Δh, не вносилися, оскільки такі місця складали зовсім малу частку порівняно з об'ємом матеріалу у цих шарах.

За спеціально розробленою програмою на персональному комп'ютері виконані розрахунки стосовно сходження піскового тіла механічного односпірального класифікатора у його пісковий жолоб. Зміни витрати пісків у часі в процесі сходження піскового тіла при різних значеннях висоти матеріалу приведені на рис.4, з якого видно, що характер зміни витрати пісків в процесі сходження практично однаковий. Однак спостерігаються певні відмінності. Зокрема, при самих малих значеннях висоти пісків тривалість першого коливання значно довша порівняно з другим. Потім тривалості коливань стають практично однаковими. Є різниця і у витратах пісків.

За результатами отриманих перехідних процесів сходження піскового тіла механічного односпірального класифікатора (рис.4) досліджувався більш детально зв'язок їх параметрів з рівнем пісків.

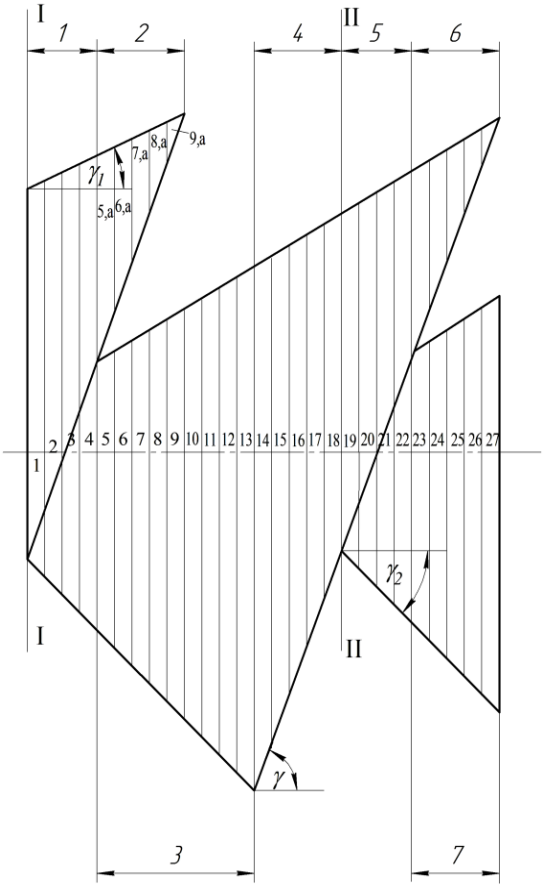

Рис.3. Подання горизонтальної площини нижнього шару верхньої частини піскового тіла односпірального класифікатора окремими геометричними фігурами з характерними зонами визначення кількості матеріалу в елементарних об'ємах

Крім того, визначалося середнє значення витрати пісків в залежності від їх висоти у пісковому тілі. Ці залежності подані на рис.5, з яких видно, що існують функціональні залежності між характеристиками потоку і висотою пісків у міжвитковому просторі. Середнє значення витрати пісків у циклі сходження піскового тіла (рис.5,а) нелінійно збільшується при зростанні висоти. У діапазоні від $8\Delta h$ до $11\Delta h$ ця залежність лінійна. Амплітуда першого екстремуму A_{1min} першого коливання (рис.5,б) лінійно залежить від висоти піскового тіла, зростаючи при її збільшенні на усьому діапазоні. Амплітуда A_{2max} другого коливання (рис.5,в) змінюється функціонально, але більш складніше, однак майже не відхиляючись від прямої в процесі зростання при збільшенні висоти піскового тіла. Відношення екстремумів другого коливання до першого характеризує нерівномірність сходження матеріалу. З рис.5,г видно, що воно функціонально змінюється з мінімумом в середині діапазону зміни висоти піскового тіла. Тобто, найбільш рівномірно матеріал сходить в межах $7\Delta h...9\Delta h$. Нерівномірність в діапазоні $5\Delta h...7\Delta h$ визначається недостачею, а у діапазоні $9\Delta h...11\Delta h$ – надлишком матеріалу. Тобто, найкраща рівномірність потоку буде при середніх значеннях циркулюючих навантажень. При найменших і найбільших циркулюючих навантаженнях умови вимірювання піскового потоку будуть достатньо сильно ускладнюватись.

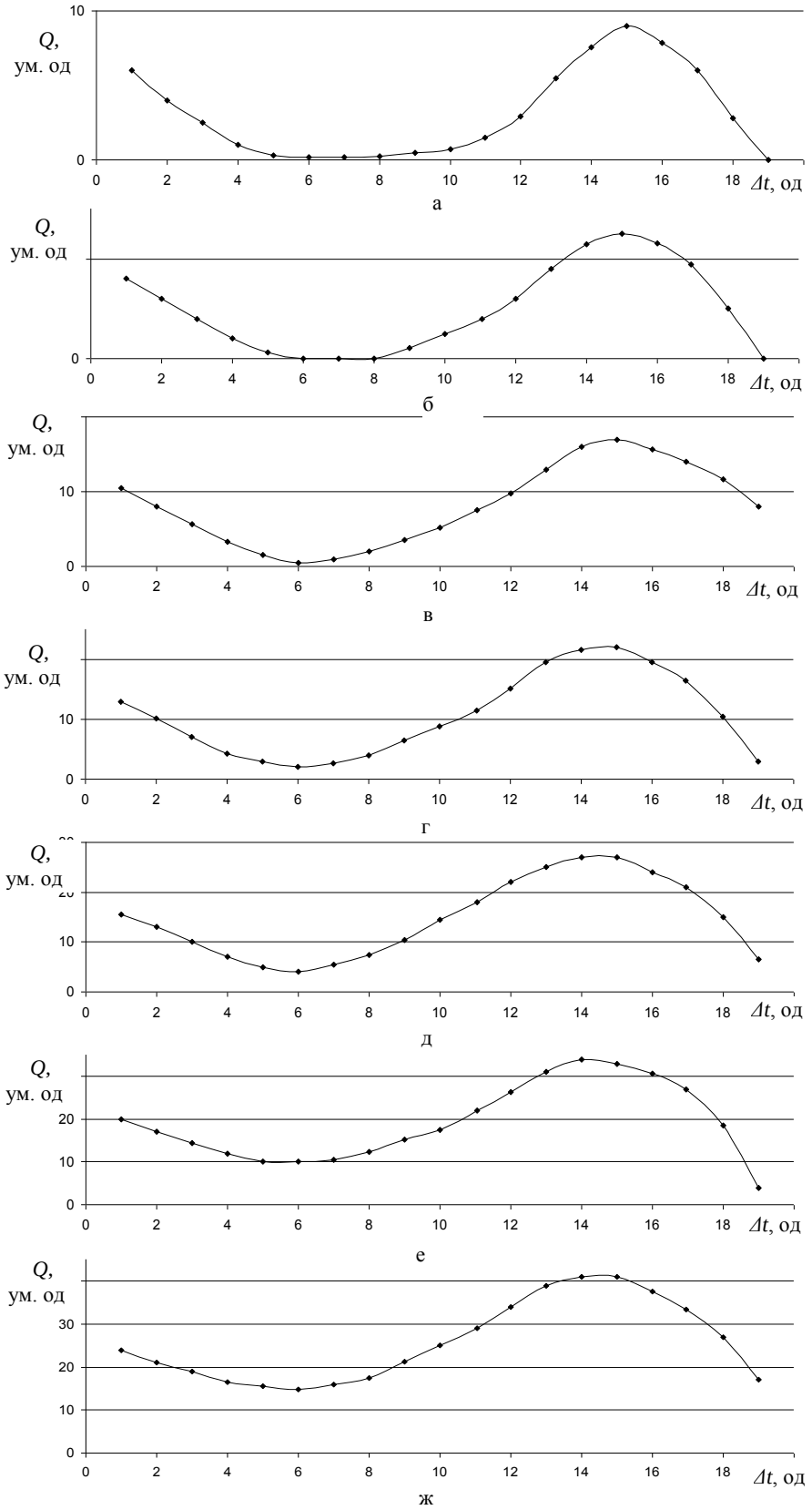

Рис.4. Перехідні процеси сходження піскового тіла механічного односпірального класифікатора:
а, б, в, г, д, е, ж – відповідно при 5*Δh*, 6*Δh*, 7*Δh*, 8*Δh*, 9*Δh*, 10*Δh*, 11*Δh*

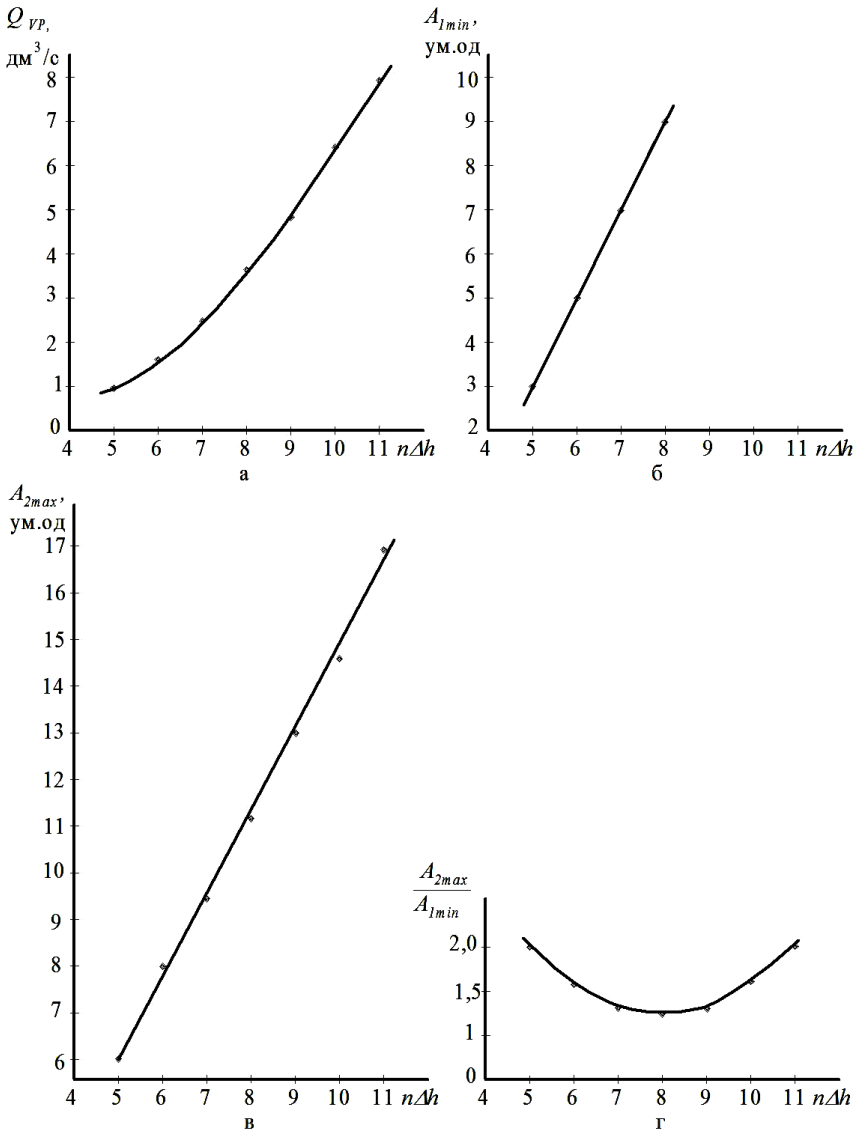

Рис.5. Залежність параметрів перехідних процесів сходження піскового тіла механічного односпірального класифікатора від висоти пісків у міжвитковому просторі: а – середнього значення витрати у циклі сходження; б – амплітуди A_{1min} першого коливання; в – амплітуди A_{2max} другого коливання; г – відношення амплітуд A_{2max}/A_{1min}

Висновки

В процесі моделювання закономірностей сходження пісків у механічному односпіральному класифікаторі встановлено наступне :

1. Витрата матеріалу змінюється циклічно за залежностями, що мають мінімум і максимум, які зв’язані з середньою витратою пісків і висотою піскового тіла.

2. Існують аналітичні залежності між середнім значенням об’ємної витрати пісків, амплітудою першого і другого коливань (екстремумами), відношенням цих амплітуд з одного боку і висотою пісків у міжвитковому просторі з іншого боку.

3. Встановлені залежності дозволяють за виміряним значенням висоти пісків у міжвитковому просторі прогнозувати їх витрату в процесі сходження, а також розробити ефективну систему вимірювання потоку пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора, яка буде гарантувати підвищення точності визначення об’ємної витрати.

Список використаної літератури

1. Измельчение. Энергетика и технология / [Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др.].– М.: Изд. дом "Руда и Металлы", 2007.– 296 с.
2. 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.
3. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / Купін А.І. – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008.- 204с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Верхотуров М.В. Гравитационные методы обогащения / Верхотуров М.В.- М.: МАКС Пресс, 2006.- 352с.
8. Мацуй А.М. Моделювання закономірностей розташування матеріалу вздовж верхньої частини піскового тіла механічного спірального класифікатора / А.М. Мацуй // Вісник Херсонського національного технічного університету.– 2016.– №1(56).– С.154-162.