

УДК 658.5.015.23:681.5.015.24

V.O. KONDRATETS, A.M. MATSUI, O.M. SERBUL, M.O. FEDOTOVA  
 Центральнoукраїнський національний технічний університет

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄМУ ЗАХОПЛЕНОЇ ДОЗИ ПУЛЬПИ ЗАВИТКОМ ЖИВИЛЬНИКА В РАЗІ ПОВОРОТУ СИСТЕМИ КООРДИНАТ

*На збагачувальних фабриках України в перших стадіях рудопідготовки продуктивність подрібнення руди може знано зменшуватися внаслідок пульсації матеріалу в барабані кульового млина під час завантаження руди, пісків спірального класифікатора, води й куль. У процесі аналізу останніх досліджень і публікацій встановлено, що практично знайдено рішення запобігання виникненню пульсації під час завантаження в млин вихідної руди, води й куль. Однак цього не можна сказати щодо завантаження пісків спірального класифікатора. З огляду на те що стаття спрямована на розв'язання проблеми завантаження в кульовий млин пісків механічного спірального класифікатора, її тема є актуальною. Дослідження виконані в межах розроблення наукової тематики Центральнoукраїнського національного технічного університету. Метою роботи є встановлення можливості налаштування завиткового живильника на процес захоплення доз пульпи в приймальному пристрої поворотом системи координат завитка. У процесі дослідження використано методи порівняння, аналізу, теорії кульових млинів, теорії подрібнення матеріалів, теорії автоматичного керування, математичного моделювання, аналітичної геометрії, теорії плоских кривих, теорії визначених інтегралів. Доведено, що пісковий потік може сильно впливати на стан пульпи в кульовому млині. Завитковий живильник, поділяючи розвантаження спірального класифікатора, може полегшити ситуацію, однак він сам є джерелом збудження можливих коливань пульпи в кульовому млині. У процесі дослідження визначали поздовжні площі захопленої дози пульпи в старій і новій (поверненій на кут  $\varphi$ ) системі координат, які, відповідно, дорівнюють 0,002059 ум. кв. од. і 0,001449 ум. кв. од. Оскільки поздовжня площа повністю характеризує захоплену дозу пульпи, то судження можна робити за отриманими даними. З окремих даних видно, що об'єм захопленої дози під час повороту системи координат на кут  $10^\circ$  значно менший порівняно з показником без повороту. Зменшення об'єму захопленої дози завитком під час повороту системи координат становить 29,63%, що суттєво. Це негативно вплине на продуктивність живильника і призведе до перевитрати електроенергії на транспортування пульпи. Отже, у процесі проведених досліджень встановлено, що налагодження завиткових живильників недоцільно здійснювати поворотом системи координат. Необхідно розробити оригінальний підхід формування профілю завитка й фази встановлення його початку для забезпечення оптимальних параметрів завиткового живильника. Перспективою подальших досліджень є розроблення такого підходу формування профілю завитка й обґрунтування його встановлення стосовно завантажувальної горловини млина.*

*Ключові слова: завитковий живильник млина, профіль, налаштування, математичне моделювання, захоплена доза, поворот системи координат.*

V.O. KONDRATETS, A.M. MATSUI, O.M. SERBUL, M.O. FEDOTOVA  
 Central Ukrainian National Technical University

## MATHEMATICAL MODELLING OF THE VOLUME OF THE CAPTURED SLURRY DOSE BY THE FEEDER CURL WHEN THE COORDINATE SYSTEM IS ROTATED

*At concentrators in Ukraine in the first stages of ore preparation ore grinding capacity can be significantly reduced due to pulsations of material in the drum of the ball mill during the loading of ore, sands of the spiral classifier, water and balls. In the process of analysing recent studies and publications, it was found that practically solutions have been found to prevent the occurrence of pulsations during the loading of feed ore, water and balls into the mill. However, the same cannot be said for the loading of spiral classifier sands. Given that the article is focused on solving the problem of loading the sands of a mechanical spiral classifier into a ball mill, its topic is relevant. This research was carried out within the framework of the development of scientific topics of the Central Ukrainian National Technical University. The purpose of the work is to establish the possibility of adjusting the snail feeder to the process of capturing pulp doses in the receiving device by rotating the curl coordinate system. The methods of comparison, analysis, theory of ball mills, theory of grinding materials, theory of automatic control, mathematical modelling, analytical geometry, theory of plane curves, theory of definite integrals were used in the research process. It has been proven that sand flow can strongly influence the condition of the pulp in the ball mill. The snail feeder, dividing the discharge of the spiral classifier can alleviate the situation, but it is itself a source of excitation of possible pulp oscillations in the ball mill. In the process of the study the longitudinal areas of the captured pulp dose in the old coordinate system and in the new (rotated by the angle  $\varphi$ ) coordinate system were determined, which are respectively equal to 0.002059 conditional square unit*

and 0.001449 conditional square unit. Since the longitudinal area fully characterises the captured pulp dose, judgements can be made on the basis of the data obtained. The individual data show that the volume of the captured dose when the coordinate system is rotated by  $10^\circ$  is significantly less compared to that without rotation. The reduction in the volume of captured dose by the curl when the coordinate system is rotated is 29.63 %, which is significant. This will negatively affect the feeder performance and lead to overconsumption of electricity for pulp transport. So, in the process of the conducted researches it has been established that it is inexpedient to adjust the snail feeders by rotation of the coordinate system. It is necessary to develop an original approach of curl profile formation and the phase of its beginning establishment to ensure optimal parameters of the snail feeder. The prospect of further research is the development of such an approach of curl profile formation and justification of its installation relative to the mill feed throat.

*Key words:* snail mill feeder, profile, setting, mathematical modelling, captured dose, coordinate system rotation.

### Постановка проблеми

Україна виробляє значну частку світового обсягу залізорудної сировини для чорної металургії. Унаслідок неухильного зменшення запасів багатих залізних руд із другої половини минулого століття все більша частка залізорудної сировини виробляється з бідних залізних руд шляхом їх збагачення в основному на магнітозбагачувальних фабриках. Такі технологічні процеси потребують тонкого подрібнення вихідної руди до розкриття краплин корисного компоненту, що потребує витрати величезної кількості електроенергії, куль і футерівки. Особливо це стосується першої стадії подрібнення вихідної руди безпосередньо на збагачувальній фабриці, де технологічний процес відбувається в кульових млинах, що працюють у замкненому циклі з механічними односпіральними класифікаторами. Унаслідок шкідливої дії різних факторів на вітчизняних збагачувальних фабриках допускається перевитрачання електричної енергії, куль і футерівки в процесах подрібнення руди, що збільшує собівартість однієї тонни готового залізорудного концентрату на рівні 65 % умісту заліза і ставить вітчизняну металургійну продукцію в невідповідні умови на світовому ринку. Покращити ситуацію можна ліквідацією або зменшенням впливу цих факторів. Аналіз показує, що таких факторів поки що є значна кількість. Одним із них і досить вагомим є виникнення пульсацій матеріалу в барабані кульового млина під час його завантаження. При цьому процес взаємодії молоткових тіл (куль) із рудним матеріалом відхиляється від оптимального режиму: електроенергія, кулі й футерівка витрачаються, а матеріал недоподрібнюється. Виникати пульсації можуть під впливом завантаження в млин вихідної дробленої руди, пісків спірального класифікатора, води та куль. Оскільки завитковий живильник окремими дозами подає в млин найбільшу кількість матеріалу, яка у два й навіть більше разів може перевищувати вихідне живлення, об'єм одноразової захопленої дози може викликати пульсації пульпи в барабані, тому тема статті є актуальною. Крім того, цей об'єм захопленої дози визначає продуктивність кульового млина, а профіль завитка – рівномірність уведення в барабан матеріалу, що впливає на величину пульсацій. Стаття виконана в межах тематики наукових досліджень Центральноукраїнського національного технічного університету, зокрема за темою «Оптимізація параметрів завиткового живильника кульового млина пульпою як керованого об'єкта в рудопідготовці за двостадійним циклом» (реєстраційний номер 0123U102951).

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

На вхід кульового млина завантажуються вихідна руда, піски класифікатора, вода й кулі на заміну спрацьованого молоткового завантаження та футерівки технологічного агрегату. Насамперед покращити показники рудопідготовки в перших стадіях подрібнення руди може оптимізація використання енергії та матеріалів у кульових млинах. У роботі [1] виконано аналіз вітчизняного й зарубіжного практичного досвіду рудопідготовки, виокремлено фактори, які можуть вплинути на покращення енергетичної ефективності подрібнення руди кульовими млинами. Методом динамічного програмування здійснена оптимізація енергетичної ефективності подрібнення руди кульовими млинами, де розглядалося дев'ять стадій. Показано, що ефективність роботи кульового млина може покращитися до 2,5 раза порівняно з наявним

варіантом. Відповідно до даних процесу оптимізації, запропоновано шляхи реалізації покращення енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах у вигляді шести гілок, які можуть забезпечити результат, виходячи з побажання й можливостей підприємства. Аналіз показує, що доцільним є комплексне енергоефективне інваріантне керування певним конкретним циклом рудопідготовки збагачувальної фабрики. Перспективою подальших досліджень у цьому напрямі є реалізація запропонованих гілок організації процесу подрібнення руди залежно від умов конкретних збагачувальних фабрик і розроблення відповідних систем енергоефективного інваріантного керування їх технологіями. Однак запропоновані підходи неможливо ефективно реалізувати без позбавлення недопустимих за амплітудою і частотами пульсацій матеріальних мас у барабані кульового млина.

Розглянемо можливість виникнення пульсацій від кожного фактора. Транспортна система подавання руди в кульовий млин є досить складною. Її засоби розробляють давно й досягли високого рівня досконалості. Проблему завантаження-розвантаження бункерів із сипким матеріалом також розв'язують давно, досягнуті вагомі результати [2; 3; 4]. Теорія розроблених та експериментально перевірених теоретичних положень стосується добре сипучої суміші – це сипкий матеріал, який має невелику вологість і малий уміст тонких фракцій. Почали досліджувати процеси витікання сипких однорідних матеріалів. Дослідженню витікання з бункерів сипкого фракційного матеріалу зі значним умістом дрібних класів, до якого належать дроблені руди, увагу практично не приділяли. Водночас особливості розташування матеріалу на конвеєрній стрічці, причини, що його викликали, ніхто не вивчав. Результати таких досліджень подано в роботі [5]. У праці [6] встановлено, що ефект зміни крупності дробленої руди виникає в процесі її розвантаження із циліндричних накопичувальних бункерів. Оскільки технологічне обладнання дробильного процесу в разі використання спеціальних бункерів стабілізує середньозважену крупність руди, то вона на конвеєрній стрічці не змінюватиметься, що стабілізує умови роботи кульового млина. Однак у процесі спрацювання робочих поверхонь дробильного обладнання середньозважена крупність руди на вході кульового млина матиме тенденцію до плавного збільшення, що вимагає контролю цього параметра. У роботі [7] запропоновано підхід до вимірювання середньозваженої крупності дробленої руди. У такій ситуації вагоме значення має й точність конвеєрних ваг. На недоліки конвеєрних ваг указується з 1977 р. У 1986 р. відмічено, що недоліком конвеєрних ваг є недотримання гарантованої похибки вимірювання в основному через негативний вплив ступеня нерівномірності розташування матеріалу на конвеєрній стрічці. Такий недолік конвеєрних ваг практично ліквідовано покращенням рівномірності розташування матеріалу й заходами, запропонованими в працях [8; 9; 10]. Такий стан вирішення завдання гарантовано забезпечить відсутність пульсацій рудного матеріалу в барабані кульового млина.

Пульсації від подачі води в кульовий млин визначаються системою автоматичної стабілізації розрідження пульпи в барабані. Згідно з підходом стабілізації розрідження пульпи в кульовому млині, викладеному в праці [11], під час подрібнення конкретного різнотипу руди і плавної зміни її середньозваженої крупності пульсації по каналу подачі води в технологічному агрегаті виникнути не можуть.

Традиційно в кульові млини кулі на заміну спрацьованого молоткового середовища на вітчизняних збагачувальних фабриках уносять один раз на добу або навіть один раз на три доби. Маса куль, спрацьованих за одну або три доби, визначається тоннами, що при завантаженні в млин збуджує великі пульсації матеріалу впродовж значного часу. Це різко відхиляє умови подрібнення руди від оптимальних і призводить до перевитрачання електроенергії, куль і футерівки. У роботі [12] доведена можливість стабілізації оптимального різнорозмірного кульового завантаження барабанного млина реалізацією алгоритмів оцінювання його стану. Тут доведена можливість поштучної подачі різнорозмірних куль у млин за короткий термін роботи, що не збуджує пульсацій матеріального середовища в технологічному агрегаті.

Піски спірального класифікатора відрізняються циклічною подачею і великою продуктивністю, оскільки циркулююче навантаження в цьому циклі подрібнення може в кілька разів перевищувати вихідне живлення млина рудою. Зважаючи на те що в механічних спіральних класифікаторах використовують двозахідні спіралі, за один їх оберт у пісковий жолоб виштовхуються дві дози пісків, які змішуються з доданою водою й надходять у приймальний пристрій завиткового живильника кульового млина, створюючи в ньому змінний рівень пульпи залежно від циркулюючого навантаження. Зрозуміло, що прямо в млин таке циклічне розвантаження класифікатора подавати неможливо, зважаючи на виникнення пульсацій пульпи. Завитковий живильник дещо може послабити такий вплив на кульовий млин, ураховуючи його особливості.

Завитковий живильник [13] являє собою черпак спіральної форми з круглим отвором у боковій стінці для завантаження зачерпнутого матеріалу в млин. Фланець живильника болтами кріпиться до цапфи барабана млина так, щоб отвори цапфи й живильника збігалися. Корпус живильника виготовляється з листової сталі або відливається з легованого чавуну. На кінці черпака живильника кріпиться змінний козирок із марганцевистої сталі або з легованого чавуну. Внутрішня поверхня живильника футерується сталевими листами. Завиткові живильники виготовляються одно-, дво- і тричерпаковими. Поперечний перетин між спіралями живильника прямокутний. Завиткові живильники дають змогу завантажувати матеріал, що надходить на подрібнення, з більш низького рівня, що дає можливість установлювати млини в замкненому циклі з класифікаторами. Здебільшого використовують двочерпакові завиткові живильники. Аналогічні визначення завиткових живильників даються й в інших літературних джерелах. Це говорить про те, що завитковий живильник розглядається як деякий допоміжний елемент у технологічному ланцюзі циклів подрібнення. Однак більш уважний аналіз показує, що завитковий живильник барабанних млинів має свої конкретні характеристики й повинен розглядатися як рівноцінний керований об'єкт поряд з іншим технологічним обладнанням. Зокрема, ніде не вказується, що це за завиток, які його характеристики, як конкретно він повинен приєднуватися до барабанного млина. Зрозуміло, що під час виходу кінця черпака з поверхні пульпи в приймальному пристрої живильника завитковий елемент (захватний орган) повинен від масиву рідини відділити певну її дозу. Величина захопленої дози буде визначатися профілем завитка й початковою його установкою за певного рівня пульпи. Ці два параметри завитка повинні бути відомі, однак про них мова не ведеться. Найбільш простим способом налагодження завиткового живильника на процес захоплення доз пульпи в приймальному пристрої в початковому стані є поворот системи координат завитка. Для доведення можливості такого підходу налагодження технологічного агрегату необхідно здійснити математичне моделювання об'єму захопленої дози пульпи завитком живильника при повороті системи координат.

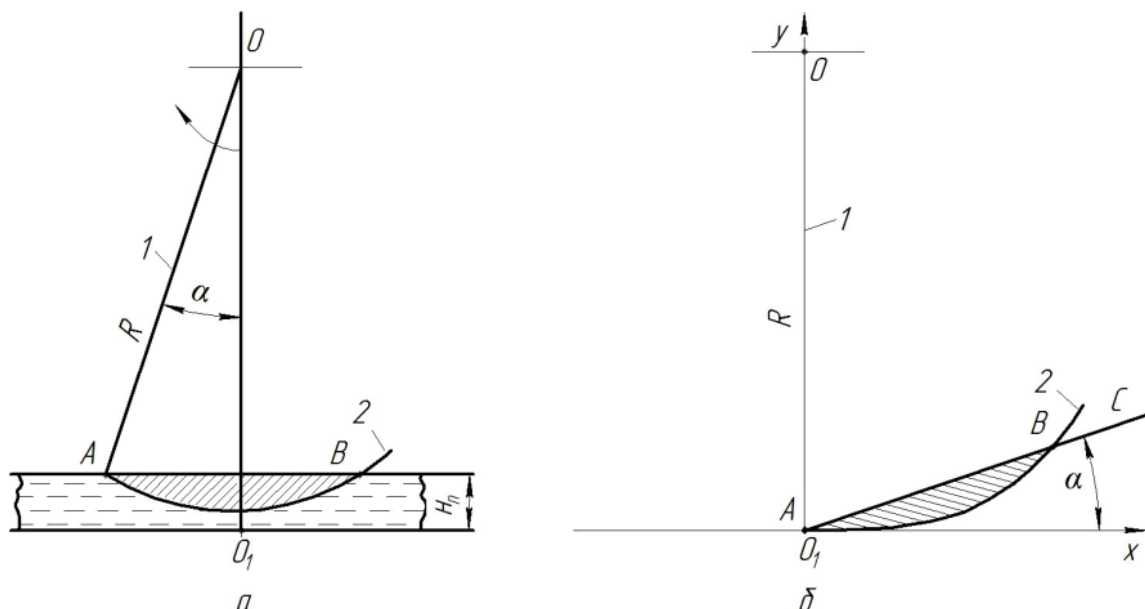
### Мета дослідження

**Метою дослідження** є встановлення можливості налаштування завиткового живильника на процес захоплення доз пульпи в приймальному пристрої поворотом декартової системи координат завитка.

### Виклад основного матеріалу

Завиткові живильники використовують для подачі рідкого матеріалу з нижньої відмітки на певну верхню. Здебільшого так організовується подача пульпи в кульовий млин, що живиться пісковим продуктом класифікаторів. Завитковий живильник приєднують до барабана млина, і він обертається разом із ним. У процесі роботи рівень пульпи в приймальному пристрої завиткового живильника змінюється. При цьому змінюється й процес захоплення дози рідкого матеріалу завитком. Об'єм захопленої дози за певного рівня пульпи й ширини захватного органа однозначно характеризується її площею поздовжнього перерізу в завитку, що виходить на поверхню рідини. Імітація захоплення дози рідкого матеріалу завитком показана

на рис. 1, а, де площа поздовжнього перерізу захопленої дози заштрихована. Вона обмежена рівнем пульпи  $H_{II}$  в приймальному пристрої (пряма  $AB$ ) і частиною профілю 2 завитка. Профіль завитка 2 в початковій точці  $A$  жорстко з'єднаний із жорстким елементом 1, що обертається навколо точки  $O$ . Під час обертового руху елементів 1 і 2 відбувається захоплення дози рідкого матеріалу й завдяки профілю завитка 2 (на рисунку не показано) відбувається транспортування її до точки  $O$ , де здійснюється розвантаження рідкого матеріалу на вищому рівні. Між вертикаллю  $OO_1$  і жорстким елементом 1 створюється кут  $\alpha$ , пропорційний рівню пульпи  $H_{II}$  у приймальному пристрої. Чим вищим буде рівень  $H_{II}$ , тим більшим буде кут  $\alpha$ . Із рис. 1, а видно, що в разі зміни рівня пульпи  $H_{II}$  в приймальному пристрої точка  $A$  змінює своє положення в просторі й не може однозначно характеризувати налагоджувальні параметри пристрою. Тому надамо їй певного фіксованого однозначного положення, повернувши жорсткий елемент 1 у вертикальне положення, сумістивши його з вертикальною віссю  $OO_1$  і перемістивши однозначно профіль завитка 2 й захоплену ним дозу рідкого матеріалу. Таке моделювання показано на рис. 1, б, де додатково приведені осі декартової системи координат  $x, y$  і пряма  $AB$ , продовжена до точки  $C$ , що являє собою промінь, який відповідає рівню пульпи в завитковому живильнику й проходить під кутом  $\alpha$  до осі абсцис  $O_1X$  на рис. 1, б. Точка  $B$  на рис. 1, б відповідає точці  $B$  на рис. 1, а.



**Рис. 1. Імітація (а) і моделювання (б) захоплення дози рідкого матеріалу завитком: 1 – жорсткий елемент довжиною, що дорівнює радіусу  $R$  обертання завитка; 2 – профіль завитка**

Це положення профілю завитка дає змогу досліджувати вплив на захоплення доз рідини в приймальному пристрої під час виконання певних налагоджувальних дій. Наприклад, можна здійснити паралельне перенесення системи координат (рис. 1, б), її поворот на певний кут, поворот і паралельне перенесення системи координат.

Здійснимо поворот системи координат (рис. 1, б) на кут  $\varphi$ . Ця математична операція демонструється на рис. 2. Дослідження виконаємо, наприклад, на профілі завитка 1 (рис. 2), що описується функцією  $y=x^k$ . Це рівняння  $y=x^k$  справедливе в новій (поверненій на кут  $\varphi$ ) системі координат  $y', x'$ . У старій системі координат  $x, y$  його необхідно подати, урахувавши кут повороту  $\varphi$ . Будь-яка точка, нехай це буде точка  $B$  (рис. 2) перетину кривої профілю завитка й прямої, що визначена кутом нахилу  $\alpha$  до осі абсцис, у старій системі за однакових одиниць масштабу на осях матиме такі залежності визначення значень координат [14]:

$$y_B = x'_B \sin \varphi + y'_B \cos \varphi, \tag{1}$$

$$x_B = x'_B \cos \varphi - y'_B \sin \varphi, \tag{2}$$

де  $x'_B, y'_B$  – координати точки  $B$  у поверненій на кут  $\varphi$  системі координат;  $x_B, y_B$  – координати точки  $B$  у системі координат без повороту;  $\varphi$  – кут повороту координат.

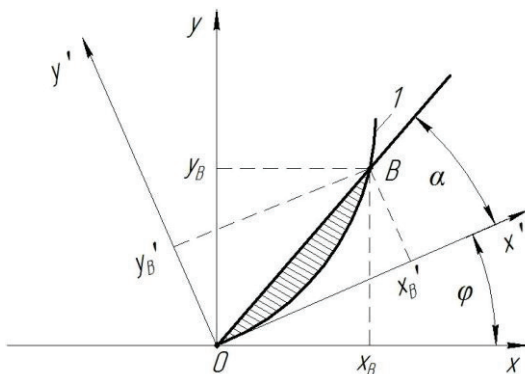


Рис. 2. Поворот системи координат із профілем завитка й захопленою дозою рідкого матеріалу: 1 – профіль завитка

У новій (поверненій на кут  $\varphi$ ) системі координат для точки  $B$  (рис. 2) буде справедлива залежність для профілю завитка:

$$y'_B = (x'_B)^k. \tag{3}$$

Добувши корінь  $k$  з лівої і правої частин (3), отримаємо рівняння:

$$x'_B = \sqrt[k]{y'_B}. \tag{4}$$

Рівняння прямої  $y = x \operatorname{tg} \alpha$ , де  $\operatorname{tg} \alpha = k_1$  – кутовий коефіцієнт нахилу прямої, що проходить через початок координат із нахилом під кутом  $\alpha$  до осі абсцис у старій системі координат і перетинається в точці  $B$  з кривою, що визначає профіль завитка, дає змогу із залученням (1) і (2) записати таке співвідношення:

$$x'_B \sin \varphi + y'_B \cos \varphi = (x'_B \cos \varphi - y'_B \sin \varphi) \operatorname{tg} \alpha \tag{5}$$

або

$$y'_B (\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha) = x'_B (\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha - \sin \varphi), \tag{6}$$

звідки:

$$y'_B = x'_B \frac{\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha - \sin \varphi}{\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha}. \tag{7}$$

Підставимо (7) у (4) і, виконавши перетворення, отримаємо:

$$x'_B = k^{-1} \sqrt[k]{\frac{\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha - \sin \varphi}{\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha}}. \tag{8}$$

З урахуванням (8) за рівнянням (7) отримаємо:

$$y'_B = k^{-1} \sqrt[k]{\left( \frac{\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha - \sin \varphi}{\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha} \right)^k}. \tag{9}$$

Отже, координати точки  $B$  у новій координатній системі можна визначати за залежностями (8) і (9), а в старій координатній системі – за знайденими  $x'_B$  і  $y'_B$  та виразами (1) і (2).

З рівнянь (8) і (9) видно, що в загальному випадку (особливо за непарних  $k$ ) необхідно виконати умову:

$$\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha > \sin \varphi. \tag{10}$$

Поділимо ліву і праву частину нерівності (10) на  $\cos\varphi$  та отримаємо:

$$\operatorname{tg}\alpha > \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} \text{ або } \operatorname{tg}\alpha > \operatorname{tg}\varphi, \quad (11)$$

звідки  $\alpha > \varphi$ . Тобто кут повороту системи координат повинен бути меншим за кут  $\alpha$ , що визначається рівнем пульпи в приймальній пристрої завиткового живильника.

Якщо на мінімальному значенні рівня пульпи  $H_{II} = 0,1$  м, кут  $\alpha = 14^\circ 50'$ ,  $\operatorname{tg}14^\circ 50' = 0,2648$ , кут  $\varphi$  можна прийняти на рівні кут  $\varphi = 10^\circ$ . Тоді  $\cos 10^\circ = 0,9848$ ;  $\sin 10^\circ = 0,1736$ ; прийmemo  $k = 3$ , тобто  $y = x^3$ .

Відповідно до прийнятих умов і залежностей (8) і (9), координати точки  $B$  у новій системі координат будуть  $x'_B = 0,2908$  ум. од.,  $y'_B = 0,024594$  ум. од., а в старій системі координат за виразами (1) і (2) –  $x_B = 0,2821$  ум. од.,  $y_B = 0,074706$  ум. од. Варто зауважити, що в разі повороту системи координат на кут  $\varphi$  профіль завитка змінює своє положення на більш круте, тому він більш точно описується виразом  $y = x^3$ , за яким його побудували. Навпаки, у старій системі координат профіль завитка став більш похилим і його краще описувати виразом  $y = x^2$ . Наприклад, за аргументу  $x_B = 0,2821$  ум. од.,  $y_B$  становив  $0,074706$  ум. од. Якщо прийняти  $x_B = 0,2821^2$ , то  $y_B = 0,079580$  ум. од., що на  $6,5\%$  більше за отримане за (1) значенням. Це допустимо в таких дослідженнях. Тому в старій системі координат  $y, x$  будемо застосовувати залежність  $y = x^2$ .

Визначимо площі поздовжніх перерізів захоплених доз пульпи в старій і новій системах координат. Ці площі можна визначити як різницю площ трикутників  $OBX'_B$  й  $OBX_B$  та відповідних їм площ фігур, створених профілем завитка, вісями абсцис і відрізками  $BX'_B$  і  $BX_B$ .

Площа трикутника  $OBX_B$  у старій системі координат  $S_{\Delta C} = 0,5 \cdot y_B \cdot x_B = 0,010538$  ум. кв. од.

Площа трикутника  $OBX'_B$  у новій (поверненій на кут  $\varphi$ ) системі координат  $Y'OX'S_{\Delta H} = 0,5 \cdot y'_B \cdot x'_B = 0,00357692$  ум. кв. од.

Визначимо площі фігур під кривою завитка, тобто знайдемо площі фігури, обмеженої віссю абсцис, відрізками прямих  $x = a$  і  $x = b$ , паралельних осі ординат, і графіком функції  $y = f(x)$  для значень  $x \in [a, b]$ . Такі фігури являють собою криволінійні трапеції. Їх бічні відрізки можуть вироджуватися в точки. Відомо, коли функція  $f(x)$  невід'ємна на відрізку  $[a, b]$  і неперервна на ньому, то визначений інтеграл від цієї функції в межах від  $a$  до  $b$  чисельно дорівнює площі відповідної криволінійної трапеції [15]. Тобто визначений інтеграл можна розглядати як границю інтегральної суми функції  $f(x)$  на відрізку  $[a, b]$ , під якою розуміють суму добутків довжини кожного елементарного відрізка  $\Delta x_i$  на значення функції  $f(x)$  в довільній точці його протяжності [15]. Якщо функція  $f(x)$  невід'ємна на відрізку  $[a, b]$ , то інтегральна сума  $S_n$  виражає площу фігури, яка складається з приєднаних один до одного прямокутників, основами яких слугують елементарні відрізки  $\Delta x_i$ , а висотами – значення функції в обраних точках на цих відрізках [15]. Відомо [15], коли функція  $f(x)$  неперервна на відрізку  $[a, b]$ , то границя інтегральної суми існує й не залежить ні від способу розбиття відрізка  $[a, b]$  на елементарні частини, ні від вибору точок на них. В окремих випадках ці точки можуть збігатися з початком або кінцем елементарного відрізка. Однак зі збільшенням кількості  $n$  елементарних частин на відрізку  $[a, b]$  інтегральна сума все точніше відповідає площі криволінійної трапеції, оскільки довжина елементарних відрізків скорочується.

Визначимо параметри для оцінювання площі криволінійної трапеції в старій системі координат. Приймемо довжину елементарного відрізка  $\Delta x_i = 0,03$  ум. од. Останній елементарний відрізок буде визначатися залишком загального відрізка  $[a, b]$ . Унаслідок зміни положення криволінійної трапеції в старій системі координат завиток буде описуватися функцією  $y = x^2$ . Ординату функції визначатимемо в кінці відрізків  $\Delta x_i$ . Дані розрахунків для оцінювання площі криволінійної трапеції приведемо в таблиці 1. Відповідно до даних таблиці 1, площа криволінійної трапеції в старій системі координат становила  $S_{KTC} = 0,008479$  ум. кв. од.

Таблиця 1

**Дані оцінювання площі криволінійної трапеції в старій системі координат**

Довжина елементарних відрізків $\Delta x_i$ , ум. од.	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01
Аргументи функції $y = x^2$ , $x_i$ , ум. од.	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,28
Значення функції $y_i \times 10^{-4}$ , ум. од.	9	36	81	144	225	324	441	576	729	784
Площі елементарних прямокутників $S_i \times 10^{-6}$ , ум. кв. од.	27	108	243	432	675	972	1323	1728	2187	784
Площа криволінійної трапеції $S_{KTC}$ , ум. кв. од.	0,008479									

Дані оцінювання площі криволінійної трапеції в новій (поверненій на кут  $\phi$ ) системі координат подано в таблиці 2. Відповідно до даних таблиці 2, площа криволінійної трапеції в новій системі координат становила  $S_{КТН} = 0,002128$  ум. кв. од.

Таблиця 2

**Дані оцінювання площі криволінійної трапеції в новій (поверненій на кут  $\phi$ ) системі координат**

Довжина елементарних відрізків $\Delta x_i$ , ум. од.	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Аргументи функції $y = x^3$ , $x_i$ , ум. од.	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,29
Значення функції $y_i \times 10^{-6}$ , ум. од.	27	216	729	1728	3375	5832	9261	13824	19683	24389
Площі елементарних прямокутників $S_i \times 10^{-8}$ , ум. кв. од.	81	648	2187	5184	10125	17496	27783	41477	59049	48778
Площа криволінійної трапеції $S_{КТН}$ , ум. кв. од.	0,002128									

Поздовжня площа захопленої дози рідкого матеріалу в старій системі координат дорівнює:

$$S_{gC} = S_{\Delta C} - S_{KTC} = 0,002059 \text{ ум. кв. од.} \tag{12}$$

Поздовжня площа захопленої дози рідкого матеріалу в новій (поверненій на кут  $\phi$ ) системі координат дорівнює:

$$S_{gH} = S_{\Delta H} - S_{КТН} = 0,001449 \text{ ум. кв. од.} \tag{13}$$

Оскільки поздовжня площа повністю характеризує захоплену дозу рідкого матеріалу, то судження можна робити за виразами (12) і (13).

З приведених виразів видно, що об'єм захопленої дози в разі повороту на кут  $\phi = 10^\circ$  системи координат значно менший порівняно з показником без повороту. Зменшення об'єму захопленої дози завитком в разі повороту системи координат становить 29,63%, що суттєво. Це негативно впливає на продуктивність живильника й призведе до перевитрати електроенергії на транспортування пульпи.

**Висновки**

Отже, у процесі проведених досліджень встановлено, що налагодження завиткових живильників недоцільно здійснювати поворотом системи координат. Необхідно розробити оригінальний підхід формування профілю завитка й фази встановлення його початку для забезпечення оптимальних параметрів завиткового живильника.

Перспективою подальших досліджень є розроблення такого підходу формування профілю завитка й обґрунтування його встановлення стосовно завантажувальної горловини млина.



Список використаної літератури

1. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Оптимізація використання енергії та матеріалів у кульових млинах при енергоефективному інваріантному керуванні подрібненням руд. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2022. Том 33(72). № 2. С. 91–99.
2. Walters J.K. A Theoretical Analysis of stresses in Silos with Vertical Walls. *Chemical Engineering Science*. 1973. Vol. 28. P. 13–21.
3. Cowin S.C. The Theory of Static Loads in Bins. *Journal of Applied Mechanics*. 1977. Vol. 44. № 9. P. 409–412.
4. Takami A., Syoten O.A. Theory of the Pressure Distribution in Powder in Equilibrium in a Cylindrical Vessel. *Powder Technology*. 1974. Vol. 10. P. 295–301.
5. Кондратець В.О. Математичне моделювання формування потоків рудного живлення кульових млинів при транспортуванні. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2014. № 2(49). С. 42–50.
6. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Моделювання розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки при розвантаженні бункерів. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 3. С. 42–50.
7. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Сферична частинка твердого певного розміру як основа процесу моделювання розпушення гірських порід. *Математичне моделювання*. 2016. № 2(33). С. 55–59.
8. Конвеєрні ваги : пат. 93639 Україна : МПК G01G 11/00, G01G 11/04. № u201404655 ; заявл. 30.04.14 ; опубл. 10.10.14. Бюл. № 19. 6 с.
9. Конвеєрні ваги : пат. 113083 Україна : МПК G01G 11/00. № u201607168 ; заявл. 02.07.16 ; опубл. 10.01.17. Бюл. № 1. 7 с.
10. Конвеєрні ваги для сипкого матеріалу зі змінними характеристиками : пат. 118205 Україна : МПК G01G 11/00. № u201701647 ; заявл. 20.02.17 ; опубл. 25.07.17. Бюл. № 14. 8 с.
11. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням : пат. 152915 Україна : МПК B02C 25/00. № u202203993 ; заявл. 24.10.2022 ; опубл. 26.04.2023. Бюл. № 17. 4 с.
12. Стабілізація оптимального різнорозмірного кульового завантаження барабанного млина реалізацією алгоритмів оцінювання його стану / В.О. Кондратець та ін. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2022. Том 33(72). № 4. С. 97–102.
13. Підготовка корисних копалин до збагачення / М.І. Сокур та ін. Кременчук : П.П. Щербатих, 2017. 392 с.
14. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 1130 p.
15. Дубовик В.П., Юрик І.І. *Вища математика*. Київ : АСК, 2011. 636 с.

References

1. Matsui, A.M. & Kondratets, V.O. (2022). Optymizatsiia vykorystannia enerhii ta materialiv u kulovykh mlynakh pry enerhoefektyvnomu invariantnomu keruvanni podribnenniam rud – [Optimisation of energy and material use in ball mills with energy efficient invariant control of ore grinding]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu im. V.I. Vernadskoho. Seriia "Tekhnichni nauky"*. Vol. 33(72). Is. 2. P. 91–99. doi: 10.32838/2663-5941/2022.2/15 [in Ukrainian]
2. Walters, J.K. (1973). A Theoretical Analysis of stresses in Silos with Vertical Walls. *Chemical Engineering Science*. Vol. 28. P. 13–21. [in English]
3. Cowin, S.C. (1977). The Theory of Static Loads in Bins. *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 44(9). P. 409–412. [in English]

4. Takami, A. & Syoten, O.A. (1974). Theory of the Pressure Distribution in Powder in Equilibrium in a Cylindrical Vessel. *Powder Technology*. Vol. 10. P. 295–301. [in English]
5. Kondratets, V.O. (2014). Matematychnе modeliuvannia formuvannia potokiv rudnoho zhyvlennia kulovykh mlyniv pry transportuvanni – [Mathematical modeling formayion of streams ore supply ball mill when transporting]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. Vol. 2(49). P. 42–50. [in Ukrainian]
6. Kondratets, V.O. & Matsui, A.M. (2015). Modeliuvannia rozpodilu droblenoї rudy vzdovzh konveirnoi strichky pry rozvantazhenni bunkeriv – [Modeling of distributed crushed ore along the conveying belt in offloading hoppers]. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. Vol. 3. P. 42–50. [in Ukrainian]
7. Kondratets, V.O. & Matsui, A.M. (2016). Sferychna chastynka tverdoho pevnoho rozmiru yak osnova protsesu modeliuvannia rozpushennia hirsykh porid – [Spherical solid particle of a certain size as a basis for rock loosening modelling process]. *Matematychnе modeliuvannia*. Vol. 2(33). P. 55–59. [in Ukrainian]
8. Konveirni vahy : pat. 93639 Ukraina : MPK G01G 11/00, G01G 11/04. № u201404655 ; zaiavl. 30.04.14 ; opubl. 10.10.14. Biul. № 19. 6 p.
9. Konveirni vahy : pat. 113083 Ukraina : MPK G01G 11/00. № u201607168 ; zaiavl. 02.07.16 ; opubl. 10.01.17. Biul. № 1. 7 p.
10. Konveirni vahy dlia sypkoho materialu zi zminnymy kharakterystykamy : pat. 118205 Ukraina : MPK G01G 11/00. № u201701647 ; zaiavl. 20.02.17 ; opubl. 25.07.17. Biul. № 14. 8 p.
11. Sposib avtomatychnoi stabilizatsii rozridzhennia pulpy v mlynakh z tsyrkuliuiuchym navantazhenniam : pat. 152915 Ukraina : MPK V02S 25/00. № u202203993 ; zaiavl. 24.10.2022 ; opubl. 26.04.2023. Biul. № 17. 4 p.
12. Kondratets, V.O., Meleshko, Ye.V., Matsui, A.M. & Abashyna, A.A. (2022). Stabilizatsiia optymalnoho riznorozmirnoho kulovoho zavantazhennia barabannoho mlyna realizatsiieiu alhorytmiv otsiniuvannia yoho stanu – [Stabilisation of optimum different-size ball loading of a drum mill by the implementation of algorithms for assessing its condition]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu im. V.I. Vernadskoho. Seriia "Tekhnichni nauky"*. Vol. 33(72). Is. 4. P. 97–102. doi: 10.32838/2663-5941/2022.4/16 [in Ukrainian]
13. Sokur, M.I., Biletskyi, V.S., Yehurnov, O.I. Vorobiov, O.M., Smyrnov, V.O. & Bozhyk, D.P. (2017). Pidhotovka korysnykh kopalyn do zbahachennia – [Preparation of minerals for beneficiation]. Kremenchuk : P.P. Shcherbatykh. [in Ukrainian]
14. Korn, G.A. & Korn, T.M. (1968). *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. New York : McGraw-Hill Book Company. [in English]
15. Dubovyk, V.P. & Yuryk, I.I. (2011). *Vyshcha matematika – [Higher mathematics]*. Kyiv : ASK. [in Ukrainian]

Кондратець Василь Олександрович – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1411-168X.

Мацуй Анатолій Миколайович – д.т.н., професор, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5544-0175.

Сербул Олександр Миколайович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: serbulan@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1836-5529.

Федотова Маріанна Олександрівна – к.т.н., асистент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: skrynnik\_2002@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5827-1685.

Kondratets Vasyl Oleksandrovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Automation of Production Processes of the Central Ukrainian National Technical University, e-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1411-168X.

Matsui Anatolii Mykolaiovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes of the Central Ukrainian National Technical University, e-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5544-0175.

Serbul Oleksandr Mykolaiovych – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes of the Central Ukrainian National Technical University, e-mail: serbulan@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1836-5529.

Fedotova Marianna Oleksandrivna – Ph.D., Assistant at the Department of Automation of Production Processes of the Central Ukrainian National Technical University, e-mail: skrynnik\_2002@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5827-1685.