

Засельський В. Й., Пополов Д. В.

Визначення деформації жорсткої сіячої поверхні в умовах ударно-вібраційної дії

Zaselskyi V.Y., Popolov D.V.

Determination of the deformation of a rigid seeding surface under shock and vibration action

Для грохочення гірничо-металургійної сировини, особливо в умовах де забиття отворів сита може значно знизити продуктивність процесу, актуальним завданням є необхідність підвищення ефективності класифікації. Метою цієї роботи є визначення деформації жорсткої сіячої поверхні під впливом ударно-вібраційної дії. У роботі було розроблено розрахункову схему та алгоритм визначення деформації сита. Сіяча поверхня була представлена як система елементарних балок-смужок, що зазнають деформації як у подовжньому, так і в поперечному напрямках під впливом ударно-вібраційної дії. Використовувалася теорія пружності для аналізу деформацій, а також чисельне моделювання для розрахунку жорсткості сита та визначення його деформаційних характеристик. Результати дослідження показали, що деформації сита залежать від кутів вібрації та відносного подовження елементів сіячої поверхні. Було встановлено, що під час невеликих відносних подовжень (до 0,001) зміщення стріли прогину у подовжньому напрямку є незначним і не впливає на працездатність сита. Значні деформації, що можуть впливати на його роботу, виникають лише при великих відносних подовженнях, що є недопустимими у виробничих умовах. Розроблена розрахункова схема дозволяє більш точно оцінювати деформаційні властивості сита та може знайти застосування для оптимізації його конструкції. Запропоновані методи можуть бути впроваджені у виробничі процеси, що дозволить оптимізувати роботу технологічних агрегатів і знизити витрати на їх експлуатацію.

Ключові слова: сіяча поверхня, ударно-вібраційна дія, деформація, жорсткість сита, деформаційні характеристики.

For screening mining and metallurgical raw materials, especially in conditions where clogging of the screen holes can significantly reduce the process performance, an urgent task is the need to improve the efficiency of classification. The aim of this work is to determine the deformation of a rigid screening surface under the influence of shock and vibration. In this work, a calculation scheme and an algorithm for determining the deformation of the sieve. The sieving surface was represented as a system of elementary beam strips that undergo deformation in both the longitudinal and transverse directions under the influence of shock and vibration. Elasticity theory was used to analyze the deformations, as well as numerical modeling to calculate the stiffness of the sieve and determine its deformation characteristics. The results of the study showed that the deformation of the sieve depends on vibration angles and relative elongation of the sieving surface elements. It was found that at small relative elongations (up to 0.001), the displacement of the deflection boom in the longitudinal direction is insignificant and does not affect sieve performance. Significant deformations that may affect its operation occur only at large relative elongations, which are unacceptable in production conditions. The developed calculation scheme allows for a more accurate assessment of the deformation properties of the sieve and can be used to optimize its design. The proposed methods can be implemented in production processes, which will optimize the processes, which will optimize the operation of technological units and reduce the cost of their operation.

Key words: screening surface, shock and vibration influence, deformation, sieve stiffness, deformation characteristics.

Вступ

Досвід експлуатації вібраційного обладнання для сортування гірничо-металургійної сировини вказує на існування низки проблем, а саме, захаращеність сіячої поверхні вологим матеріалом або частинками межної великості, які заклинюють в отворах сіячої поверхні. Захаращеність отворів сіячої поверхні веде до зменшення площі її «живого» перерізу та як наслідок до зниження ефективності грохочення матеріалу, що розсівається. Рядом досліджень [1, 2] встановлено, що зниження на 1 % вмісту дріб'язкового класу 0...5 мм після його відсіву з залізвмісної складової металургійної шихти дозволяє підвищити продуктивність доменної плавки на 1 % та знизити споживання коксу 0,5 %. Для вирішення вказаного вище недоліку можуть бути використані динамічне активні сіячі поверхні, котрі здатні генерувати додаткові коливання сита

забезпечуючи зниження забиття отворів, або його захаращеності тим саме підвищуючи ефективність грохочення гірничо-металургійної сировини.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для підвищення ефективності грохочення при сортуванні гірничо-металургійної сировини окрім удосконалення конструкції самих грохотів, які дозволяють генерувати різноманітні траєкторії руху робочого органу машини, використовують також динамічне активні сіячі поверхні. До таких поверхонь можна віднести сита, котрі в змозі мати додаткові підвищені режимні параметри відносно робота вібраційного грохота, а саме, амплітуду та частоту коливань. На теперішній час, головним чином, сформовано два напрямки з використання та дослідження динамічне активних сіячих поверхонь:



перший — використання резонівних еластичних поверхонь для сортування рудних матеріалів середньої крупності, другий — безпосередня дія самої динамічне активної поверхні.

Ґрунтовні теоретичні та експериментальні дослідження резонівних еластичних поверхонь були проведені в Інституті геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, їх результати повно викладені в роботах [3, 11]. Особливостями сіячих резонівних еластичних поверхонь є інтенсифікація процесу грохочення безпосередньо за рахунок сіячої поверхні, а саме взаємного переміщення стрічкових струн, які генерують складні траєкторії коливань. Частинки матеріалу рухаються на такій поверхні стрибкоподібно, там де прогин еластичних елементів найбільший частинка підкидається на максимальну висоту (центр сіячої поверхні), а в місцях закріплення на мінімальну. Швидкість частинки матеріалу зростає зі збільшенням частоти і амплітуди коливань.

В той же установі була розроблена конструкція сіячої поверхні для тонкого грохочення з віброударними збудниками сита [12]. Перше металеве сито без натягнення покладене на друге динамічне активне резонівне еластичне сито, отвори котрого в 5...10 разів крупніше за отвори першого. При роботі звичайного віброзбуджувача елементи другого стрічко-струнного сита резонують і вдаряють по першому металевому викликаючи додаткові прискорення частинок матеріалу, котрі знаходяться на ньому, що знижує захаращеність сіячої поверхні та інтенсифікує процес такого грохочення.

Безпосередньо віброударне збудження сіячої поверхні реалізовано фірмою Kroosh Technologies Ltd [13-15] в основу технології, розробленої компанією, покладена багаточастотна нелінійна вібраційна система, в якій параметри віброзбудника, зв'язків і рухливих елементів розраховані та обрані таким чином щоб в них реалізувався режим «дивного аттрактора». У такому режимі сіяча поверхня, коливається у багаточастотному режимі, динамічне посилення забезпечує збільшення середньої амплітуди поверхні, що просіває, в 3...8 разів, а пікові прискорення збільшуються в 10...50 разів. Ефект «багатовимірного дивного аттрактора» стабілізує вібраційну систему в резонансній області в широкому діапазоні частот вібрації.

В Національній металургійній академії України була запропонована конструкція динамічне активної колосниково-картової самоочистної поверхні [16, 17], яка складається з закріплених на подовжніх балках коробу грохоту знімних пружних елементів, що мають криволінійну зігнуту робочу поверхню змінної товщини, консольні полиці якої формують динамічне активну поверхню сита та в області робочих частот грохоту від 12,5 до 16 Гц рухаються по траєкторіях зі змінними в часі фокальними параметрами і кутами розташування осей так, що огинаючи

цих траєкторій представляють овали Касині, що разом з додатковою генерацією амплітудної складової в горизонтальному та вертикальному напрямі дозволяє виконувати самоочищення сіячої поверхні.

Також в Криворізькому металургійного інституту Національної металургійної академії України була запропонована конструкція вібраційно-ударного грохоту з вільно укладеним ситом [18], яка може бути використана для зменшення забиття його отворів матеріалом, щільність котрого може сягати більше 2 т/м³. Грохот складається з коробу, що спирається на раму через пружні елементи і двох самосинхронізованих вібраторів. На бортовинах коробу жорстко закріплені швелероподібні підситники, верхня та нижня площини внутрішньої поверхні котрих футерована гумовими амортизаторами. В утвореному ними просторі укладене сито, яке складається з карт, сполучених між собою гумовими пластинами, жорсткість котрих зростає по довжині коробу для забезпечення збільшення амплітуди коливань сита у напрямку переміщення матеріалу. В розвантажувальній частині грохоту підситники забезпечені стопорними пластинами, які перешкоджають переміщенню сита вздовж коробу.

З приведеного аналізу видно, що грохот з вільно укладеним ситом є найбільш прийнятним технічним рішенням для інтенсифікації процесу грохочення шляхом очищення отворів сіячої поверхні від частинок, що забивають, для умов класифікації залізвмісних шихтових матеріалів. Але на теперішній час для вібраційних грохотів з періодично імпульсними коливаннями та вільно укладеною сіячою поверхнею відсутні дослідження які стосуються визначенню жорсткості сита, та його деформації, що безумовно є актуальним завданням як з дослідницької, так і практичної точки зору.

Мета і завдання досліджень

Метою роботи було визначення деформації жорсткої сіячої поверхні в умовах вібраційно-ударної дії. Для вирішення поставленої мети завданням досліджень було розробити розрахункову схему та алгоритм визначення деформації сита при його вібраційно-ударній дії.

Матеріали та методи досліджень

Для визначення деформації сита при його вібраційно-ударній дії була запропонована розрахункова схема, котра наведена на рис. 1. Сіяча поверхня 1 (див. рис. 1) вільно укладена в просторі, утвореним швелероподібним підситником 2, закріпленим на коробі 3, який здійснює динамічне стійкі лінійно направлені гармонійні коливання. Сіяча поверхня має можливість переміщуватись в перпендикулярному до опорної поверхні напрямку на відстань, що дорівнює встановленому проміжку δ_n .

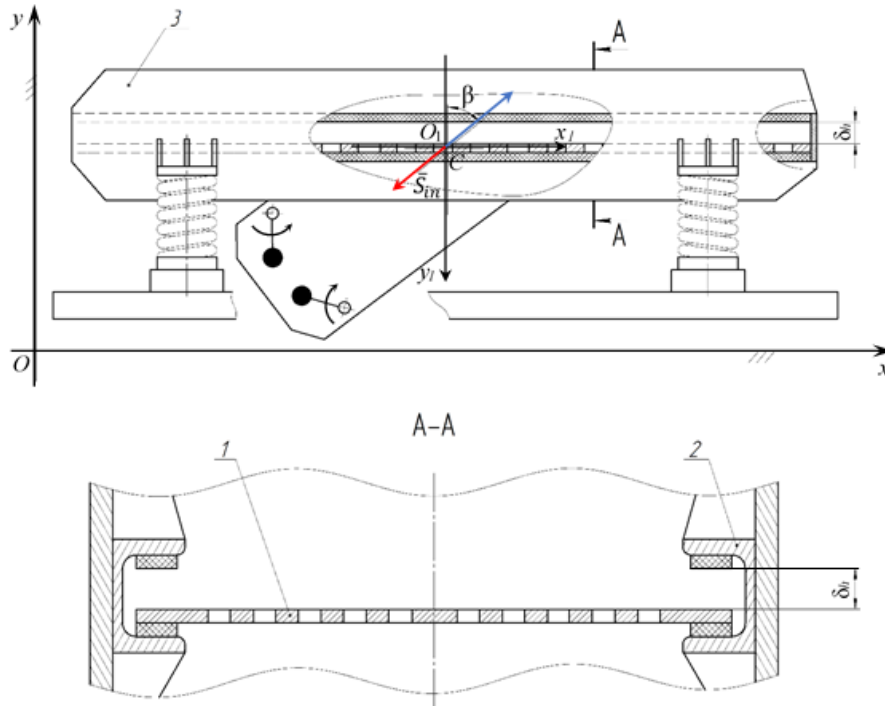


Рисунок 1 – Розрахункова схема

Для дослідження стану системи тіл під дією збудовальної сили інерції, ведена абсолютна система координат xOy , її початок розташований в довільній точці O абсолютно нерухомого простору, вісі котрої спрямовані вздовж характерних напрямів сіячої поверхні.

Введемо зв'язану з нижньою площиною внутрішньої поверхні, утвореної швелероподібним підситником, відносну систему відліку $x_1O_1y_1$.

Оскільки умови зв'язку, котрі покладені на сіячу поверхню дозволяють їй виконувати тільки обмежені проміжком δ_h лінійні рухи, приймаємо сіячу поверхню в якості матеріальної точки C , розташованої в центрі мас сіячої поверхні. Пружну деформацію сіячої поверхні приймаємо за усереднену деформацію пружин з усередненою жорсткістю c_{sr} . Масу коробу позначимо як M , а масу сіячої поверхні (точки C) як m (рис. 2).

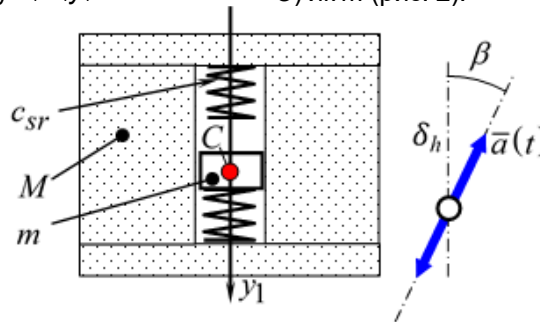


Рисунок 2 – Еквівалентна розрахункова схема

Враховуючи прийняту розрахункову схему, на точку C може бути послідовно накладено два односторонніх зв'язки при вибиранні проміжку δ_h вздовж вісі y_1 . Ці зв'язки виникають по мірі зіткнення маси m з нижньою та верхньою площинами внутрішньої поверхні швелероподібного підситника.

Визначення деформації сита, що не викликає незворотні зміни у структурі тіла, виконувалось за допомогою теорії пружності.

Результати дослідження та обговорення результатів

Усереднену жорсткість сіячої поверхні у напрямі основної деформації можна визначити як

$$c_{sr} = \frac{1}{S_s} \iint_{S_s} c(x, z) dz dx \frac{H}{M}, \quad (1)$$

де S_s – площа сіячої поверхні за межею закріплення її в рамі, m^2 ; $c(x, z)$ – функція жорсткості сіячої поверхні в межах закону Гука.

Встановлення функції жорсткості сіячої поверхні можливо лише після визначення її деформації.

Для цього представимо сіячу поверхню як таку, що складається з чисельності елементарних блоків-смужок, які лежать як в подовжньому, так і в поперечному напрямках, мають защемлені кінці та знаходяться в однорідному полі сил інерції.

Причому, вигин цих балок-смужок відбувається як в подовжньому, так і в поперечному напрямках.

Розглянемо деформацію сіячої поверхні окремо в подовжньому та поперечному напрямках, враховуючи вищевикладені допущення.

Для розрахунку деформації у подовжньому напрямку прийемо, що розподілена сила інерції q при лінійних коливаннях коробу діє на подовжні балки-смужки під кутом β до нормалі, проведеної до опорної поверхні підсилювача в подовжній площині (рис. 3).

Початок прийнятої системи координат yOx

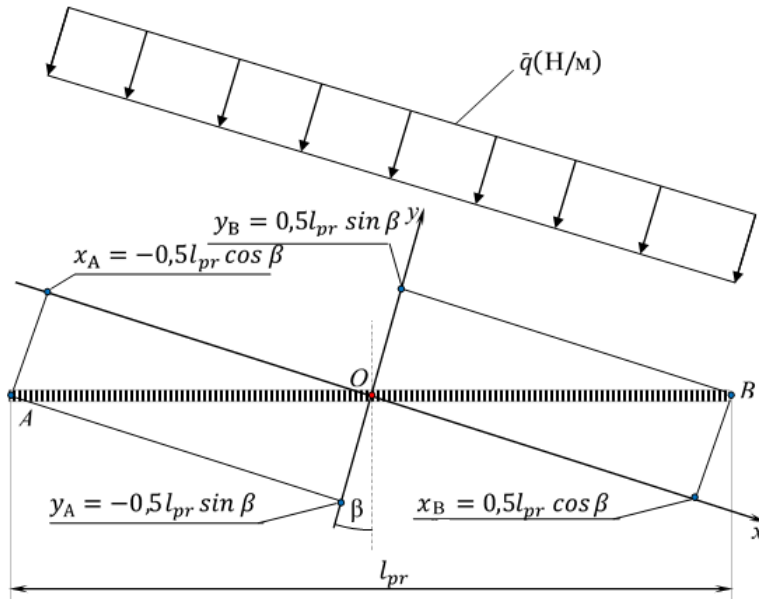


Рисунок 3 – До визначення форми балки-смужки довжиною l_{pr} в подовжній площині сіячої поверхні в умовах однорідного поля інерції з кутом вібрації β

$$\begin{cases} y_A + \frac{C_1}{q} = \frac{F_H}{q} \cdot \cosh \left[\frac{q}{F_H} \cdot (x_A + C_2) \right] \\ y_B + \frac{C_1}{q} = \frac{F_H}{q} \cdot \cosh \left[\frac{q}{F_H} \cdot (x_B + C_2) \right] \\ l_{pr} = \int_{x_A}^{x_B} \cosh \left[\frac{q}{F_H} \cdot (x + C_2) \right] dx \end{cases} \quad (2)$$

де y_A, x_A, y_B, x_B – відповідні координати точок закріплення деформованої балки-смужки A та B ; F_H – сила тяжіння нитки; C_1, C_2 – постійні інтегрування.

Чисельне рішення системи (2) дає значення

$$y_{pr}(x) = \frac{F_H \cdot l_{pr}}{q} \cdot \cosh \left(\frac{q}{F_H} \cdot x \right) - \frac{C_{1pr}}{q}. \quad (3)$$

Проведені розрахунки для різних кутів вібрації β , за інших рівних умов, демонструють, що подовжнім зміщенням стріли прогину через вплив кута вібрації, можна знехтувати, при цьому, криві деформованих подовжніх ліній сіячої поверхні співпадають (рис. 4). З отриманих форм балки-смужки при різному відносному подовженні ε видно, що під час незначних відносних подовженнях (до $\varepsilon = 0,001$ – дане значення відповідає порядку

розташований в середині відрізка довжиною l_{pr} , що сполучає точки закріплення A та B елементарної гнучкої та пружної подовжньої балки-смужки.

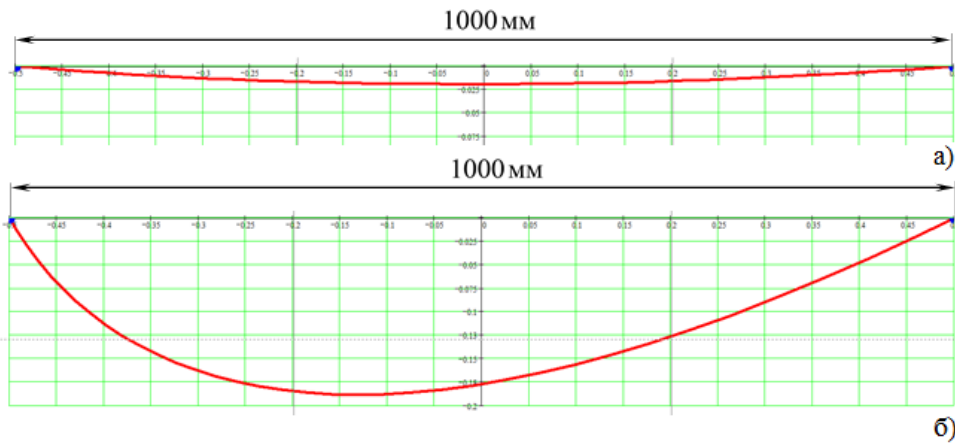
При заданих умовах для визначення рівняння форми балки-смужки відповідно до [Ошибка! Источник ссылки не найден.] слід вирішити систему з трьох рівнянь, що використовують крайові умови при її закріпленні, а також — умову співпадіння її конструктивної довжини в розтягнутому стані з довжиною її кривої вигину, що проходить від однієї точки кріплення до іншої

трьох невідомих параметрів F_H, C_1, C_2 . При заданому закріпленні з незначним перевищенням її розтягнутої довжини над розтягненням між закріпленнями, маємо $C_2 = 0$.

На підставі отриманих розв'язків було сформоване рівняння подовжньої лінії сита

подовження сита на практиці) зміщення стріли прогину в подовжньому напрямку зневажливо мале. Значне зміщення стріли прогину відбувається при великих відносних подовженнях ($\varepsilon = 0,1$), що недопустимо в виробничих умовах.

Розглянемо поперечний перетин сіячої поверхні, що знаходиться під дією однорідного поля сил інерції (рис.5). В цій площині кут вібрації дорівнює нулю.



а- відносне подовження $\epsilon = 0,001$; б- відносне подовження $\epsilon = 0,1$

Рисунок 4 – Форми балок-смужок при різному відносному подовженню ϵ під дією однорідного поля сили інерції при куті вібрації $\beta = 45^\circ$ в системі координат пов'язаної з сіячою поверхнею в її подовжній площині перетину

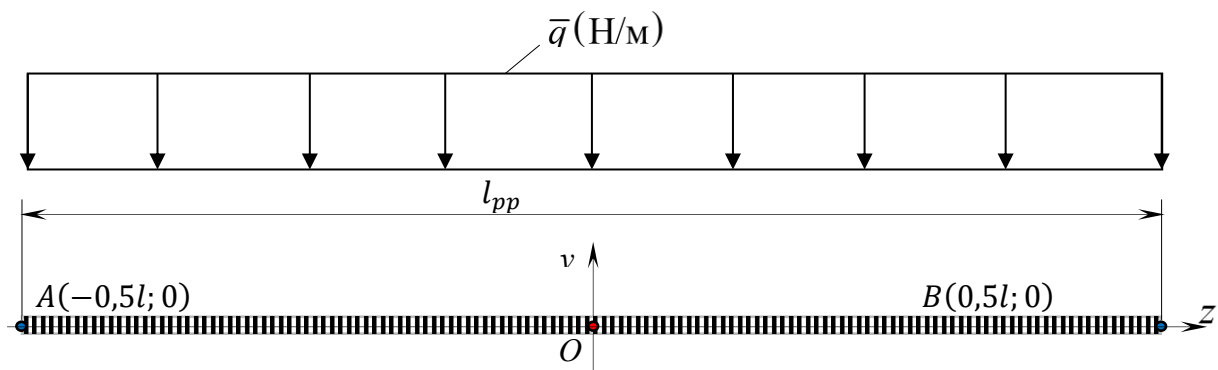


Рисунок 5 – До визначення форми балки-смужки довжиною l_{pp} в поперечній площині сіячої поверхні в умовах однорідного поля сили інерції

Прийmemo систему координат yOz пов'язану з серединою відрізка, що сполучає точки закріплення A і B розтягнутої елементарної гнучкої та пружної поперечної балки-смужки довжиною l_{pp} . Розв'язуючи систему рівнянь (2) для поперечного перетину

сіячої поверхні було визначено, що коефіцієнт $C_2 = 0$. Таким чином, для поперечної балки-смужки отримуємо рівняння її прогину під дією однорідного поля сил інерції.

$$y_{pp}(z) = \frac{F_{пп}}{q} \cdot \cosh\left(\frac{q}{F_{пп}} \cdot z\right) - \frac{C_{1pp}}{q} \quad (4)$$

Як показав чисельний аналіз залежності (4) деформація поперечної балки-смужки для сіячої поверхні в однорідному полі сил інерції (рис. 6) є симетричною відносно вертикальної осі.

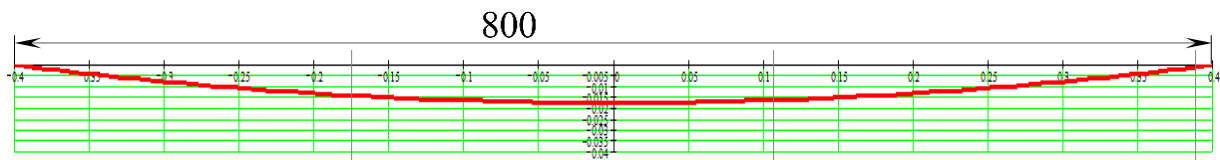


Рисунок 6 – Форма поперечної балки-смужки сіячої поверхні під дією однорідного поля сили інерції

Отримані вирази (3), (4) дозволяють визначити деформацію елементарних балок-смужок в кожній точці сіячої поверхні як функцію двох незалежних координат тривимірного простору вздовж і поперек в прийнятій системі виміру.

Тоді, деформація сіячої поверхні може бути

представлено як добуток функції (3) та (4), складене з (3) в кожній окремо взятій точці. Причому, як співмножник різниці функцій вводиться поправочний коефіцієнт W_{sp1} , який має позитивне безрозмірне значення, а коефіцієнт W_{sp2} є від'ємним, внаслідок того що обидві перемножені

функції мають один і той же алгебраїчний деформованого стану сіячої поверхні може набути знак, а його розмірність m^{-1} . Тоді функція наступний вид:

$$y_{sp}(x, z) = W_{sp1} \cdot [y_{pr}(x) - W_{sp2} \cdot y_{pr}(x) \cdot y_{pp}(z)]. \quad (5)$$

На рис. 7 зображена деформація сіячої поверхні, розрахована за виразом (5)(5).

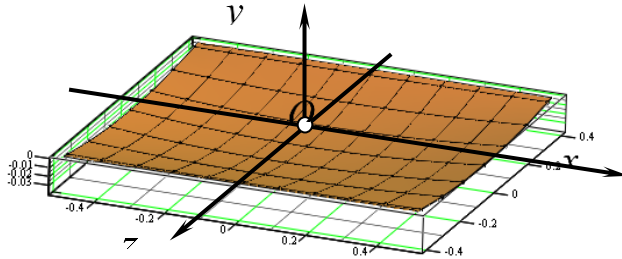


Рисунок 7 – Деформація сіячої поверхні під дією однорідного поля сили інерції

Оскільки, жорсткість тіла в кожній його точці зворотно пропорційна пружній деформації тіла в цих точках, то на підставі функцій деформованого стану сіячої поверхні (3) - (5), можна записати емпіричну функцію жорсткості для точок сіячої поверхні, яка працює в межах закону Гука

$$c(x, z) = - \frac{W_c}{y_{pr}(x, z) - \lambda}, \quad (6)$$

де W_c – поправочний коефіцієнт, що визначається експериментально для обраного способу закріплення сіячої поверхні; λ – нескінченно мале число, яке усуває невизначеність при діленні на нуль в точках закріплення (де $\lambda \neq 0$, але $\lambda \rightarrow 0$, а її від'ємний знак пояснюється тим, що координати деформованого стану, розраховані за (3) – (5) набувають від'ємне значення).

Як видно з рис. 6 і 7 деформація сіячої поверхні при вібраційно-ударному навантаженні в однорідному полі сил інерції визначається полухвилею в вертикальній площині, причому найбільший її прогин фіксується по центральних вісях інерції сита.

Висновки

В результаті проведених досліджень визначена деформація жорсткої сіячої поверхні вільно укладеної в просторі швелероподібного підситника, котрий закріплений на коробі грохоту та отримано вираз функції його деформованого стану. З розв'язання отриманої функції видно, що при дії вібраційно-ударного навантаження в однорідному полі сил інерції деформацією жорсткого сита буде полухвиля в вертикальній площині з найбільшим її прогином по центральних вісях його інерційної системи.

Перелік посилань

1. Товаровский И. Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* / ИМ НАН України. Дніпропетровськ, 2014. № 28. С. 117-131.
2. Теория и технология подготовки шихтовых материалов для доменной и бездоменной металлургии железа: учебник / Журавлев Ф. М. та ін., Кривой Рог: Чернявский Д. А., 2020. 663 с.
3. Надутый В. П., Гольдин А. А., Погребженский Г. А. Использование резонирующих ленточно-струнных сит в конструкциях вибрационных грохотов. *Кокс и химия*. 1991. № 8. С. 27-28.
4. Червоненко А. Г., Морус В. Л. Износостойкие динамически активные просеивающие поверхности из эластомеров для разделения сыпучих материалов и пульп. *Труды II Международного симпозиума по механике эластомеров*. Дніпро, 1997. Т.1. С. 296-310.
5. Привід полічастотного грохота: пат. 45544 Україна: В07В 1/42. № u200906845; заявл. 30.06.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. 2 с.
6. Шевченко Г. А., Шевченко В. Г. Модель вібраційного полічастотного грохота з обмеженим джерелом збудження. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2015. № 4(80). С. 105-112.
7. Шевченко В. Г., Шевченко Г. О. Щодо використання живильників з віброударним приводом для підвищення продуктивності та безпеки випуску уранових руд. *Геотехнічна механіка*. 2017. № 135. С. 32-45.
8. Shevchenko H., Sushchenko O., Zozulia H. Oscillation modes of vibrating feeders with vibro-impact adaptive drive at the output of reflected ore from chambers of wining blocks. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. 00087. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900087>
9. Shevchenko H., Shevchenko V., Pukhalskyi V. Vibrational feeders with vibro-impact adaptive drive. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. 00085. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900085>
10. Булат А. Ф., Шевченко Г. А. Влияние поличастотных колебаний просеивающих поверхностей вибрационных грохотов на разделение сыпучих материалов. *Научный вестник НГУ*. 2010. № 4. С. 92-97.
11. Полічастотні грохоти для тонкої класифікації і зневоднення подрібнених уранових руд та відходів їх переробки / В. Г. Шевченко та ін. *Геотехнічна механіка*. 2017. № 137. С. 80-92.
12. Шевченко Г. А., Шевченко В. Г., Бобылев А. А. Вибрационные грохоты с поличастотными колебаниями просеивающих поверхностей для тонкого разделения. *Уголь Украины*. 2013. № 2. С. 23-29.

13. Многочастотные грохоты в решении отраслевых проблем классификации сырьевых материалов: кат. обладання. IL Ashdod: Kroosh technologies, 2011. 10 с.
14. Круш И., Борохович Д., Косой Г. Применение технологии kroosh® для процессов разделения сыпучих материалов и полидисперсных суспензий. *Обогащение полезных ископаемых*. 2009. № 14. С. 171-183.
15. Технология Kroosh. *Multifrequencyequipment*. Kroosh Technologies Ltd. URL: <http://kroosh.com/ru/tehnologiya> (дата звернення: 17.04.2022).
16. Колосникове сито: пат. 90387 Україна: В07В 1/46. № а200811090; заявл. 12.09.2008; опубл. 12.09.2008, Бюл. № 8. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/442895/>
17. Studying of movement kinematics of dynamically active sieve / D. Popolov et al. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 23, no. 1. P. 94-97. DOI: <https://doi.org/10.2478/mme-2019-0013>.
18. Вібраційний грохот: пат. 122940 Україна: В07В 1/40, 1/46. № u201710088; заявл. 18.10.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.

References

1. Tovarovskiy, I. G. (2014). Normativnaia otsenka vliianiia parametrov domennoi plavki na raskhod koksa i proizvoditelnost. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 28, 117-131
2. Zhuravlev, F. M. et al. (2020). Teoriia i tekhnologiiia podgotovki shikhtovykh materialov dlia domennoi i bezdomennoi metallurgii zheleza. Cherniavskii D. A.
3. Nadutyi, V. P., Goldin, A. A., & Pogrebizhenskii, G. A. (1991). Ispolzovanie rezoniruiushchikh lentochno-strunnykh sit v konstruktssiakh vibratsionnykh grokhotov. *Koks i khimiia*, (8), 27-28
4. Chervonenko, A. G., & Morus, V. L. (1997). Iznosostoikie dinamicheski aktivnye proseivaiushchie poverkhnosti iz elastomerov dlia razdeleniia sypuchikh materialov i pulp. In *Trudy II Mezhdunarodnogo simpoziuma po mekhanike elastomerov*. Vol. 1, pp. 296-310
5. Bulat, A. F., Shevchenko, H. O., & Shevchenko, V. H. (2009). Pryvid polichastotnoho hrokhota. (Patent No. 45544). Ukrpatent. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/265793/>
6. Shevchenko, G. A., & Shevchenko, V. G. (2015). Model vibratsionnogo polichastotnogo grokhota s ogranichennym istochnikom vobuzhdeniia. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiiakh*, (4(80)), 105-112
7. Shevchenko, V. H., & Shevchenko, H. O. (2017). Shchodo vykorystannia zhyvylnykh z vibroudarnym pryvodom dlia pidvyshchennia produktyvnosti ta bezpeky vypusku uranovykh rud. *Geo-technical Mechanics*, (135), 32-45
8. Shevchenko, H., Sushchenko, O., & Zozulia, H. (2019). Oscillation modes of vibrating feeders with vibro-impact adaptive drive at the output of reflected ore from chambers of wining blocks. *E3S Web of Conferences*, 109, 00087. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900087>
9. Shevchenko, H., Shevchenko, V., & Pukhalskyi, V. (2019). Vibrational feeders with vibro-impact adaptive drive. *E3S Web of Conferences*, 109, 00085. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900085>
10. Bulat, A. F., & Shevchenko, G. A. (2010). Vliianie polichastotnykh kolebanii proseivaiushchikh poverkhnostei vibratsionnykh grokhotov na razdelenie sypuchikh materialov. *Naukoviy visnik NGU*, (4), 92-97
11. Shevchenko, V. H. et al. (2017). Polichastotni hrokhoty dlia tonkoi klasyfikatsii i znevodnennia podribnenykh uranovykh rud ta vidkhdov yikh pererobky. *Geo-technical Mechanics*, (137), 80-92
12. Shevchenko, G. A., Shevchenko, V. G., & Bobylev, A. A. (2013). Vibratsionnye grokhoty s polichastotnymi kolebaniiami proseivaiushchikh poverkhnostei dlia tonkogo razdeleniia. *Ugol Ukrainy*, 1(2), 23-29
13. Многочастотные грохоты в решении отраслевых проблем классификации сырьевых материалов: кат. обладання. IL Ashdod: Kroosh technologies, 2011. 10 с.
14. Krush I., Borokhovich D., & Kosoi G. (2009). Primenenie tekhnologii kroosh® dlia protsessov razdeleniia sypuchikh materia-lov i polidispersnykh suspenszii. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh*, (14), 171-183
15. Tekhnologiya Kroosh. *Multifrequencyequipment*. Kroosh Technologies Ltd. <http://kroosh.com/ru/tehnologiya>
16. Berheman, H. V., Pelykh, I. V., Ivaschenko, V. P., Uchytel O. D., Petrenko, V. O., Onatskyi S. M., & Shybko, O. V. (2008). Kolosnykove syto (Patent 90387). Ukrpatent. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/442895/>
17. Popolov, D. et al. (2019). Studying of movement kinematics of dynamically active sieve. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 23(1), 94-97. <https://doi.org/10.2478/mme-2019-0013>.
18. Uchytel, O. D., Zaselskyi, V. Y., Popolov, D. V. (2018). Vibratsiinyi hrokhot (Patent 122940). Ukrpatent. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/690302/>

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.05.2024