

JEL: L64

DOI: 10.62911/ete.2024.02.02.12


Modeling the movement of material along the rough surface of a mixer blade installed above a moving conveyor belt

Citation:

Shved, S., Kozak, M., Zaselska, T., Zielova, K., & Dats, N. (2024). Modeling the movement of material along the rough surface of a mixer blade installed above a moving conveyor belt. *Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"*. Vol. 2 No. 2 (2024), 141-152. <https://doi.org/10.62911/ete.2024.02.02.12>


Serhii Shved

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shved_sv@duet.edu.ua
 ORCID ID: 0000-0003-2169-8893


Mariia Kozak

PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: kozakm2011@gmail.com
 ORCID ID: 0000-0002-5104-7074


Tatiana Zaselska

State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: zaselska_to@duet.edu.ua
 ORCID ID: 0009-0001-7601-7349


Kateryna Zielova

laboratory assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: zelova84@gmail.com
 ORCID ID: 0000-0002-5727-0621

Nataliia Dats

laboratory assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: n.o.dats@i.ua
 ORCID ID: 0000-0003-1963-7020

Received: 15/11/2024

Accepted: 22/11/2024

Abstract: The main methods of preparing the metallurgical charge for its further use today include the operation of mixing various materials with different granular composition to obtain a homogeneous mixture. For the preparation of metallurgical charge in the mining and metallurgical industry, continuous action mixers are used, which, unlike batch mixers, have a number of significant advantages, such as high productivity and the possibility of fully automating the process of preparing the necessary mixture. The well-known designs of mixers used in the preparation of metallurgical charge include drum, screw and rotary mixers. Recently, a lot of attention has been paid to rotary mixers, because they are the best among the mixers used in the preparation of metallurgical charge in terms of their main characteristics - productivity and energy consumption. But in a number of cases, rotary mixers do not meet the technological conditions for the preparation of a high-quality mixture. Therefore, increasing its efficiency when preparing the metallurgical charge for sintering or remelting requires a deeper analysis of the operation of the blade rotor, working in conjunction with the movement of the conveyor belt installed above it. Such analysis and research would allow to improve the mixing process to obtain a high-quality mixture of mineral raw materials when using a rotary mixer installed above a moving conveyor belt. Therefore, works aimed at establishing ways of improving this type of equipment are very interesting and relevant today. The paper describes the movement of material particles along the rough surface of the rotor blade of the mixer, which rotates in a layer of loose material transported simultaneously on the conveyor belt, and analyzed which main parameters affect the quality of the mixture preparation. As a result of research, a mathematical model was obtained for a horizontally-directed mixer with rotor cable elements that bring the material layer into a suspended state, which describes the influence of design and mode parameters on the nature of the movement of material particles in a pseudo-viscous medium. It was established that the nature of the movement of particles moving along with the conveyor belt can be considered stable.

Keywords: rotary mixer, metallurgical charge, mixture, conveyor belt, movement of material, quality, mathematical model.




JEL: L64

Modeling the movement of material along the rough surface of a mixer blade installed above a moving conveyor belt

Serhii Shved

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: shved_sv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-2169-8893

Mariia Kozak

PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: kozakm2011@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0002-5104-7074

Tatiana Zaselska

State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: zaselska_to@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0009-0001-7601-7349

Kateryna Zielova

laboratory assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: zelova84@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0002-5727-062

Nataliia Dats

laboratory assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: n.o.dats@i.ua

 ORCID ID: 0000-0003-1963-7020

Abstract: The main methods of preparing the metallurgical charge for its further use today include the operation of mixing various materials with different granular composition to obtain a homogeneous mixture. For the preparation of metallurgical charge in the mining and metallurgical industry, continuous action mixers are used, which, unlike batch mixers, have a number of significant advantages, such as high productivity and the possibility of fully automating the process of preparing the necessary mixture. The well-known designs of mixers used in the preparation of metallurgical charge include drum, screw and rotary mixers. Recently, a lot of attention has been paid to rotary mixers, because they are the best among the mixers used in the preparation of metallurgical charge in terms of their main characteristics - productivity and energy consumption. But in a number of cases, rotary mixers do not meet the technological conditions for the preparation of a high-quality mixture. Therefore, increasing its efficiency when preparing the metallurgical charge for sintering or remelting requires a deeper analysis of the operation of the blade rotor, working in conjunction with the movement of the conveyor belt installed above it. Such analysis and research would allow to improve the mixing process to obtain a high-quality mixture of mineral raw materials when using a rotary mixer installed above a moving conveyor belt. Therefore, works aimed at establishing ways of improving this type of equipment are very interesting and relevant today. The paper describes the movement of material particles along the rough surface of the rotor blade of the mixer, which rotates in a layer of loose material transported simultaneously on the conveyor belt, and analyzed which main parameters affect the quality of the mixture preparation. As a result of research, a mathematical model was obtained for a horizontally-directed mixer with rotor cable elements that bring the material layer into a suspended state, which describes the influence of design and mode parameters on the nature of the movement of material particles in a pseudo-viscous medium. It was established that the nature of the movement of particles moving along with the conveyor belt can be considered stable.


Keywords: rotary mixer, metallurgical charge, mixture, conveyor belt, movement of material, quality, mathematical model.

Моделювання руху матеріалу по шорсткій поверхні лопаті змішувача, встановленого над рухомою конвеєрною стрічкою

Сергій Швед

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: shved_sv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-2169-8893

Марія Козак

доктор філософії, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: kozakm2011@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0002-5104-7074

Тетяна Засельська

Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: zaselska_to@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0009-0001-7601-7349

Катерина Зелова

асистент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: zelova84@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0002-5727-0621

Наталія Дац

асистент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: n.o.dats@i.ua

 ORCID ID: 0000-0003-1963-7020

Анотація: До основних методів підготовки металургійної шихти до подальшого її використання на сьогоднішній час можна віднести операцію змішування різноманітних матеріалів з різним гранульованим складом для отримання гомогенної суміші. Для підготовки металургійної шихти в гірничо-металургійній промисловості використовують змішувачі безперервної дії, які, на відміну від змішувачів періодичної дії, мають ряд суттєвих переваг, таких як висока продуктивність та можливість повної автоматизації процесу приготування необхідної суміші. До відомих конструкцій змішувачів, які використовуються при підготовці металургійної шихти можна віднести барабанні, гвинтові та роторні. За останній час приділяється багато уваги роторним змішувачам, тому що вони за основними характеристиками - продуктивністю і енергоспоживанням є кращими серед використовуваних змішувачів при підготовці металургійної шихти. Але в ряді випадків роторні змішувачі не задовольняють технологічним умовам підготовки високоякісної суміші. Тому збільшення його ефективності при підготовці металургійної шихти до спікання або переплавлення потребує поглиблення аналізу роботи лопатевого ротора, працюючого сумісно з рухом конвеєрної стрічки, встановленої над нею. Такий аналіз і дослідження дозволили б удосконалити процес змішування для отримання якісної суміші мінеральної сировини при використанні роторного змішувача, встановленого над рухомою конвеєрною стрічкою. Тому роботи, які спрямовані на встановлення шляхів удосконалення такого типу обладнання на сьогодні є дуже цікавими і актуальними. В роботі описано рух частинок матеріалу по шорсткій поверхні лопаті ротора змішувача, який обертається у шарі сипкого матеріалу, транспортованого одночасно по конвеєрній стрічці, та проаналізовано, які основні параметри

впливають на якість підготовки суміші. В результаті досліджень для змішувача горизонтально направленої дії з тросовими елементами ротора, що приводять шар матеріалу в суспандований стан, одержано математичну модель, яка описує вплив конструктивних і режимних параметрів на характер руху частинок матеріалу в псевдов'язкому середовищі. Встановлено, що характер руху частинок, які рухаються разом з конвеєрною стрічкою, можна вважати певним.

Ключові слова: роторний змішувач, металургійна шихта, суміш, конвеєрна стрічка, рух матеріалу, якість, математична модель

Вступ (Introduction)

З погіршенням якості сировинної бази металургійного комплексу України особливої актуальності набуває використання змішувального обладнання. Таке обладнання має забезпечувати адаптацію до існуючих технологічних процесів і сприяти покращенню якості підготовки шихтових матеріалів перед спіканням і плавленням (*Zaselskiy et al., 2021*). Проте удосконалення такого виду обладнання стримується відсутністю математичних розрахункових моделей, які б дозволили змодельювати технологічні процеси переробки сировини і безпосередньо роботу основних вузлів обладнання, що здійснює його змішування. Розробка таких розрахункових моделей дозволила б визначити раціональні параметри обладнання, які дозволяють підвищити якість підготовки сировини перед процесами спікання і плавлення. Аналіз робіт (*Popolov et al., 2015; Vozniuk et al., 2011; Dilay, et al., 2017*) пов'язаних з розробкою і удосконаленням різного роду змішувачів безперервної дії при підготовці сипких матеріалів до подальшого їх використання показує, що таке обладнання повинне відповідати сучасним тенденціям розвитку даного роду техніки, а саме для металургійних процесів, мати високу продуктивність і одночасно – ступінь змішування сировини при незначних експлуатаційних і капітальних витратах. У ряді технологічних схем металургійного виробництва можна застосувати змішувач безперервної дії, обладнаний еластичними тросовими елементами. Особливості його конструкції детально висвітлені в наукових джерелах (*Golub, et al., 2015; Tipikin, et al., 2013, Kazartsev, et al., 2015; Terentiev, et al., 2018*). Однак удосконалення змішувача, виконаного за такою конструктивною схемою, стримується відсутністю теоретичних досліджень, спрямованих на вивчення руху матеріалу по лопаткам змішувача горизонтально-направленої дії встановленого безпосередньо над конвеєрною стрічкою транспортованого пристрою. Тому вивчення руху матеріалу в роторному змішувачі горизонтально-направленої дії, що працює спільно з шаром транспортуючої сировини на конвеєрній стрічці, є актуальною і своєчасною науковою задачею (*Novak, , et al., 2020; Volokh, et al., 2019*).

У даній роботі розглянуто математичне моделювання руху сипкого матеріалу по лопаткам роторного змішувача та конвеєрній стрічці, що дозволяє, виходячи з технологічних вимог, визначити необхідні раціональні параметри обладнання, що сприяють підвищенню ефективності змішування компонентів металургійної шихти.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

У цьому пристрої конвеєрна стрічка, на яку наноситься шар сипкого матеріалу, кінематично пов'язана з обертовим ротором. На роторі розташовані лопатки, які під час обертання занурюються в шар матеріалу. Конвеєрна стрічка рухається в площині, яка збігається з діаметральною площиною ротора. Водночас відстань між лопатками ротора і поверхнею стрічки зведена до мінімально можливого зазору, що забезпечує точну взаємодію між цими елементами.

Вважається, що коли лопатка виходить із шару сипкого матеріалу, який переміщується стрічкою, вона захоплює за собою частину матеріалу завдяки екскавації. Далі розглядається процес вивільнення захопленого матеріалу з лопатки під час подальшого обертання ротора.

Для спрощення аналізу приймається, що прослизання між лопатками ротора та конвеєрною стрічкою відсутнє.

За таких умов кутова швидкість обертання ротора, яка позначається як ω , повинна відповідати лінійній швидкості руху конвеєрної стрічки. Це забезпечує кінематичну узгодженість між обертанням ротора з лопатками і переміщенням матеріалу на стрічці. Отже, взаємодія між ротором і стрічкою підпорядковується жорсткому кінематичному зв'язку, що виражається у відповідному співвідношенні між швидкостями обох елементів

$$\vec{V} = \omega \cdot R, (1)$$

де ω – кутова швидкість абсолютного обертання ротора, рад/с; \vec{V} – лінійна абсолютна швидкість руху конвеєрної стрічки, м/с; R – максимальний радіус лопатки ротора, м.

Рухомий разом зі стрічкою матеріал змушує оснащений лопатками ротор здійснювати обертання, а, отже, кожна лопатка ротора проходить кілька стадій взаємодії з матеріалом: впровадження лопатки в шар матеріалу; досягнення максимального її заглиблення в шар; захоплення і вертикальний винос (екскавації) порції сипучого продукту з його масиву назовні; викид захопленого сипучого продукту з поверхні лопаті в напрямку руху стрічки конвеєра.

Цілоком процес впровадження лопаток в шар насипного продукту повинен бути налаштований на мінімізацію витрат енергії. У зв'язку з цим висуваємо робочу гіпотезу для визначення профілю лопатей за умови голономного зв'язку ротора зі стрічкою конвеєра (рис.1).

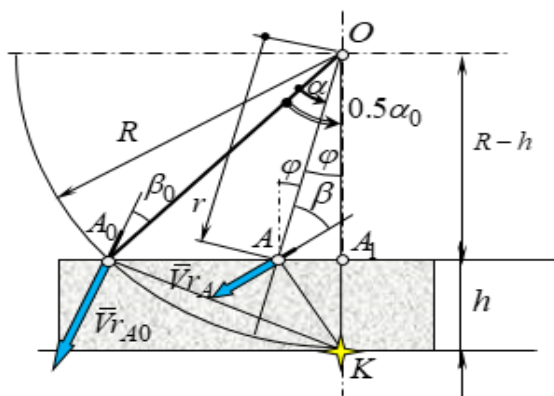


Рисунок 1. До пояснення гіпотези по взаємодії лопатки ротора з шаром матеріалу

Лопатки в діаметральній площині пристрою розробляються так, щоб при контакті з поверхнею шару насипного матеріалу заввишки h їх занурення відбувалося в напрямку лінійної відносної швидкості точки A , де лопатка стикається з вільною поверхнею матеріалу.

Для виконання умов запропонованої гіпотези профіль лопатки в діаметральній площині ротора має бути криволінійним. Дотична до цього профілю в зазначеній площині повинна утворювати кут β із радіусом OA , що проходить через точку контакту A . У такій конфігурації профіль лопатки забезпечує точну відповідність траєкторії відносного руху точки A по поверхні діаметральної площини ротора, а її занурення здійснюється суворо за напрямком вектора відносної швидкості точки A .

Результати (Results)

Для аналізу руху частинки розглянемо дві системи координат, як показано на рис. 2. Одну абсолютно нерухому xOy , пов'язану з горизонтом, а другу tMn рухому (відносну), зв'язану з дотичною до профілю лопатки. Дотична вісь нахилена під кутом θ до радіуса-вектора положення точки.

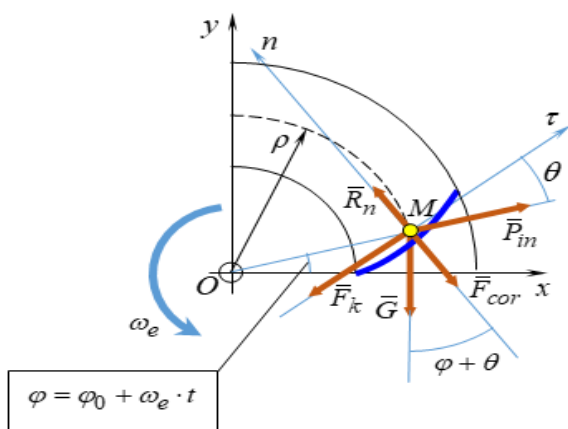


Рисунок 2. Система сил, прикладених до матеріальної точки на лопатці ротора, здійснюючого рівномірне обертання у вертикальній площині

Оскільки площина обертання лопатки має вертикальне розташування, сила ваги, що діє на частинку у відносній системі координат, буде лінійно змінюватися залежно від кута повороту φ , кута нахилу θ дотичної до її профілю, а також від часу з урахуванням напрямку. Цю залежність можна описати таким чином:

$$\begin{cases} G_n = -mg \cdot \cos(\varphi + \theta) \\ G_\tau = -mg \cdot \sin(\varphi + \theta) \end{cases}, (2)$$

Відмітимо, що при рівномірному обертанні ротора його поточний кут повороту легко представити як функцію часу:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_e \cdot t, (3)$$

а кут нахилу дотичною є функція положення точки

$$\theta = \arctg\left(\frac{dy_L}{dx_L}\right), (4)$$

де $\frac{dy_L}{dx_L}$ – похідна функції профілю лопаті, відповідно до вирішення диференціального рівняння (на підставі рис. 1, прийнято умову формування профілю лопаті в діаметральній площині ротора), здобудемо функцію профілю лопаті:

$$y(x) = x \cdot \frac{\sqrt{x^2 - (R-h)^2}}{2 \cdot (R-h)} - \frac{R-h}{2} \cdot \ln\left[\frac{x + \sqrt{x^2 - (R-h)^2}}{R-h}\right], (5)$$

або в результаті чого отримаємо наступний вираз для визначення кута θ :

$$\frac{dy_L}{dx_L} = \frac{\sqrt{x^2 - (R-h)^2}}{R-h}. (6)$$

І з урахуванням того, що при даному виборі систем відліку $x = \rho$, одержимо:

$$\theta = \arctg\left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R-h)^2}}{R-h}\right). (7)$$

Окрім сили ваги у відносній системі відліку на частинку діють: сила інерції в переносному її русі \vec{P}_{in} сила інерції від прискорення Коріоліса \vec{F}_{cor} (вектор прискорення Коріоліса, направлений відповідно до правила Жуковського); дві сили від накладених зв'язків

– \vec{R}_n (реакція по безумовному односторонньому кінематичному зв'язку) і \vec{F}_k (реакція за допомогою кулонівського тертя).

Сила інерції в переносному русі є функцією відносного положення частинки:

$$|P_{in}| = m \cdot |a_{en}| = m\omega_e^2 \cdot \rho. \quad (8)$$

Сила інерції від дії прискорення Кориоліса є функцією її відносної швидкості, і по модулю приймає значення

$$|F_{cor}| = 2m\omega_e \cdot \dot{\rho}. \quad (9)$$

Силою опори руху частинки в повітрі нехтуємо.

Сила кулонівського тертя частинки з коефіцієнтом тертя ковзання k об поверхню лопатки залежить від притискальної сили, величина якої в точності відповідає реакції опори R по безумовному кінематичному зв'язку. Баланс сил при відносній рівновазі частинки відповідно до схеми дії сил в нормальному до поверхні лопатки напрямі прийме вигляд:

$$R_n - F_{cor} - G \cdot \cos(\phi + \theta) = 0, \quad (10)$$

звідки обчислюємо модуль сили тертя:

$$|F_k| = k \cdot F_{cor} + k \cdot G_n = k \cdot m \cdot 2\omega_e \cdot \dot{\rho} + k \cdot mg \cdot \cos \left[\omega_e t + \phi_0 + \arctg \left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R-h)^2}}{R-h} \right) \right]. \quad (11)$$

На підставі основного рівняння динаміки для відносного руху матеріальної точки відповідно до спрямованості дії сил, приведеної на схемі (рис. 2), маємо:

$$m \cdot \ddot{\rho} = P_{in} - F_k - mg \sin \times \left[\omega_e t + \phi_0 + \arctg \left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R-h)^2}}{R-h} \right) \right]. \quad (12)$$

або після підстановки вхідних величин

$$m \cdot \ddot{\rho} = m\omega_e^2 \cdot \rho - k \cdot m \cdot 2\omega_e \cdot \dot{\rho} - k \cdot mg \cdot \cos \left[\omega_e t + \phi_0 + \arctg \left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R-h)^2}}{R-h} \right) \right] - mg \sin \left[\omega_e t + \phi_0 + \arctg \left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R-h)^2}}{R-h} \right) \right]. \quad (13)$$

де ρ – координата відносного положення частинки (її поточний радіус положення); R – максимальний радіус ротора, або відстань між віссю ротора і поверхнею стрічки конвейера; h – висота шару сипкого продукту на стрічці конвейера; $\omega = V/R$ – кутова швидкість обертання ротора з лопатками; V – швидкість руху конвейера з матеріалом на ньому; k – коефіцієнт тертя ковзання частинки об поверхню лопатки; m – маса частинки; g – прискорення вільного падіння.

Таким чином, диференціальне рівняння процесу ковзання частинки по криволінійній поверхні лопатки в деякому секторі кутів повороту лопатки сформульоване. Залишається з'ясувати, в якому саме секторі положення лопаті цей процес відбувається.

Визначимо допустимий сектор ковзання частинок. У рівнянні (13) фігурує початковий кут розташування лопаті, з якої починається ковзання частинок по її поверхні. Логічно визначити цей початковий кут як кутове положення лопаті в момент, коли її кінцева точка залишає масив матеріалу, як це показано на рис. 3. В такому випадку початковий кут, при якому розпочинається ковзання частинок по поверхні лопаті, буде складати половину опорного кута з від'ємним знаком

$$\phi_0 = -0,5\alpha_0. (14)$$

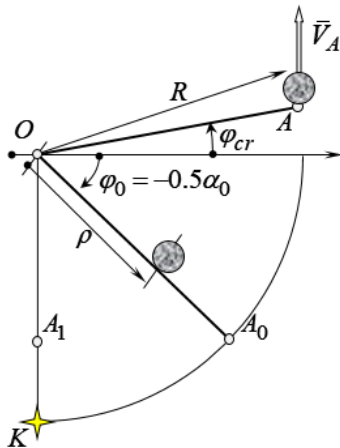


Рисунок 3. До визначення сектору процесу ковзання частинок по поверхні лопатки

Під час ковзання частинок по поверхні лопатки в процесі її обертання навколо осі ротора необхідно визначити максимально допустимий кут повороту ϕ_{cr} . Цей кут встановлюється з урахуванням умови, що остання частинка повинна безпечно покинути поверхню лопатки. Зокрема, напрямок її абсолютної швидкості після відділення не повинен призводити до падіння частинки на наступні лопатки ротора. Таким чином, критерійний кут визначається рівним нулю

$$\phi_{cr} = 0. (15)$$

Завдяки застосуванню крайових умов (14) та (15) відкривається можливість для проведення аналізу результатів розв'язку диференціального рівняння (13), що дозволяє оптимізувати геометрію пристрою та режими його руху. Процес ковзання частинок по поверхні лопатки досліджується для сектора положення лопаті, що визначається через відповідну нерівність.

$$\phi_0 \leq \phi \leq \phi_{cr}. (16)$$

Якщо процес ковзання останньої, найповільнішої частинки по поверхні лопатки виходить за межі діапазону, визначеного нерівністю (16), вважаємо його неприпустимим.

Для подальшого аналізу розміщуємо кілька частинок на робочій поверхні лопатки, рівномірно розташованих на різних радіальних відстанях одна від одної, і досліджуємо їх ковзання по поверхні лопатки згідно з умовами, що впливають з нерівності (16).

Розв'язок диференціального рівняння (13) здійснюватиметься чисельними методами для кожної з вибраних частинок. При інтерпретації отриманих результатів буде враховано рівномірний обертальний рух ротора з лопатками відповідно до заданого закону:

$$\phi(t) = \phi_0 + \omega_e \cdot t = \phi_0 + \frac{v}{R} \cdot t, (17)$$

у допустимому діапазоні:

$$-0,5\alpha_0 \leq \phi \leq 0, (18)$$

Для проведення розрахунків була використана програма, розроблена на основі рівнянь (13) та (18). Результати чисельного моделювання представлені на рис. 4 для таких базових параметрів: кількість частинок на лопатці, розташованих рівномірно в радіальному напрямку

— 5; зовнішній радіус ротора з лопатками — 1 м; коефіцієнт тертя ковзання частинки по поверхні лопатки — 0,4.

В якості значень незалежних змінних параметрів прийнято: швидкість руху стрічки конвейєра з масивом матеріалу — 10 м/с; коефіцієнт крупності ротора з лопатками, що визначається як відношення висоти шару матеріалу до зовнішнього радіусу ротора з лопатками — 0,2 (внаслідок чого висота шару матеріалу становить 200 мм). Радіус початкового положення частинок збільшується пропорційно їх індексу. Частинка з нульовим індексом в початковому положенні знаходиться в області маточини ротора з лопатками.

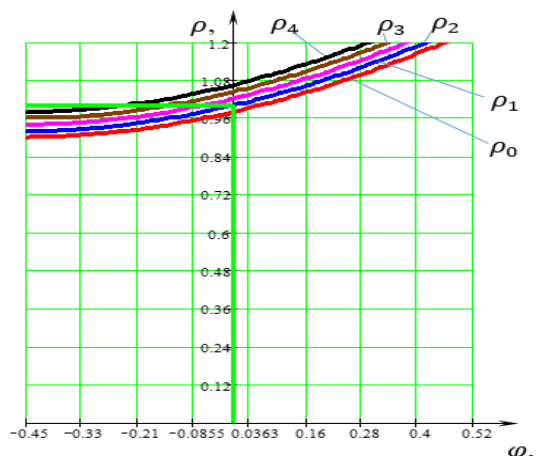


Рисунок 4. Обрані параметри змінних повністю забезпечують ефективне розвантаження

Зона кута повороту лопаті, що відповідає умові (16), має вигляд прямокутної області, обмеженої з правого боку критичним кутом φ_{cr} та зверху радіусом R . Якщо при досягненні лопаткою критичного кута φ_{cr} найповільніша частинка на лопатці (з нульовим індексом) не покидає її поверхню, тобто не досягає радіусу R , це свідчить про те, що деякі частинки, які рухаються з низькою швидкістю, під час обертання ротора з лопатками не підкидаються в напрямку руху конвейєра. Такі частинки знову захоплюються ротором і потрапляють у зону входу лопаток до масиву матеріалу.

Таким чином, критерієм ефективності та доцільності роботи пристрою є той випадок, коли всі частинки покидають прямокутну область, не перетинаючи її праву межу.

Після відриву частинки сипкого матеріалу від поверхні лопатки вона здійснює вільний політ, при цьому рухаючись під дією набутої кінетичної енергії. Відрив кожної частинки відбувається в строго визначений момент часу, коли лопатка досягає конкретного кута положення (рис. 5).

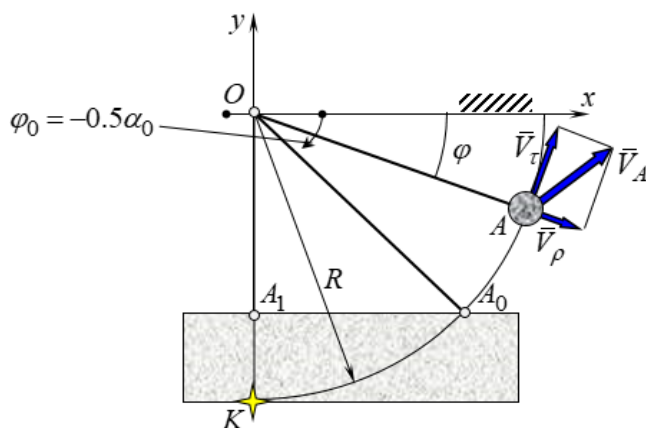


Рисунок 5. Для обчислення вектора швидкості частинки під час її відділення від лопатки

Згідно з принципом складання векторів швидкості, можна записати наступну рівність:

$$\vec{V}_A = \vec{V}_t + \vec{V}_\rho, \quad (19)$$

де \vec{V}_A – вектор абсолютної швидкості частинки при її вильоті з поверхні лопатки; \vec{V}_ρ – вектор радіальної швидкості руху частинки; \vec{V}_t – вектор дотичної складової швидкості частинки.

Кожен з векторних доданків можна обчислити за його абсолютною величиною за допомогою наступних рівнянь:

$$\vec{V}_t = V; \quad (20)$$

$$\vec{V}_\rho = \frac{d\rho}{dt}. \quad (21)$$

Вираз (21) виводиться на основі отриманого розв'язку диференціального рівняння (13).

При проекції на осі абсолютних координат xOy та врахуванні негативного значення кута ϕ , рівняння (19) набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} V_{Ax} = -V \sin \phi + V_\rho \cos \phi \\ V_{Ay} = V \cos \phi + V_\rho \sin \phi \end{cases} \cdot (22)$$

Після обчислення проекцій абсолютних швидкостей частинок та врахування кутового положення лопатки, розв'язуємо диференціальне рівняння руху для кожної частинки, що дає змогу отримати закон її руху до моменту контакту з поверхнею матеріалу

$$\begin{cases} x = \int V_{Ax} dt + C_x \\ y = \int V_{Ay} dt + C_y \end{cases} \cdot (23)$$

Постійні інтеграції визначаються на основі початкових умов для початкового моменту часу:

$$\begin{cases} x(0) = R \cdot \cos \phi \\ y(0) = R \cdot \sin \phi \end{cases} \cdot (24)$$

Відстань від осі ротора до місця падіння кожної частинки у момент T вздовж поверхні матеріалу на конвеєрі визначиться:

$$L = x(T), \quad (25)$$

При цьому вертикальна координата всіх частинок, що впали, буде одна і та ж, рівна:

$$y(T) = h - R, \quad (26)$$

Таким чином, визначення подовжніх розмірів зони розсіювання на поверхні матеріалу, який рухається разом з конвеєрною стрічкою, можна вважати завершеним.

Приклад обчислення цієї зони за попередніми початковими умовами руху ротора і стрічки конвеєра наведено на рис. 6.

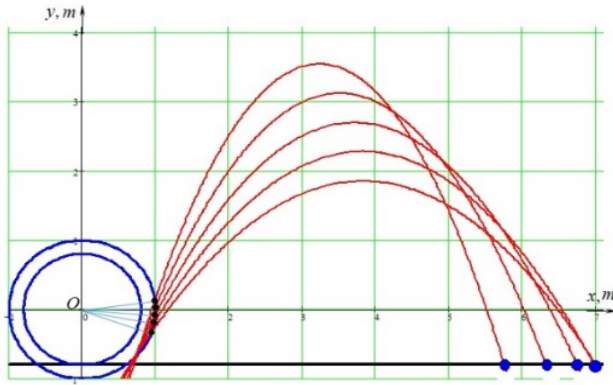


Рисунок 6. Розсіювання частинок однією лопаткою для заданого ротора

З одержаних залежностей і відповідно до рис. 6 розсіюючої частини, можна зробити висновок про те, що ефективна екскавація матеріалу буде істотним чином залежати від геометричних розмірів колеса, швидкість транспортування матеріалу і його висоти на конвеєрній стрічці, а також фізико-механічних.

Висновки (Conclusions)

У роботі представлено розроблену розрахункову комп'ютерну математичну модель, яка дозволяє проаналізувати рух матеріалу на конвеєрній стрічці з подальшою його обробкою на лопатках роторного змішувача, що дозволить вибирати раціональні конструктивні і кінематичні параметри обладнання виходячи з технологічних умов і задач, пов'язаних з удосконаленням якості підготовки металургійної шихти перед її спіканням і плавленням, що стане обґрунтуванням для визначення оптимуму такого критерію як забезпечення рівномірного розподілу частинок після змішування і об'єму питомих енерговитрат на перемішування

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація, адміністрація проекту, Ш.С.; концептуалізація формальний аналіз, К.М.; методика, програмне забезпечення, З.Т.; перевірка, візуалізація, З.К.; аналітичні дані, Н.Д. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Dilay, I., Teplukh, Z., Tykhan, M., Stasiuk, I., & Kubara, I.-R. Z. (2017). Vplyv zovnishnikh tyskiv u dynamichnykh zmishuvachakh haziv. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5 (88)), 59–65. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.26256>
- Golub, G., Myhailovych, Y., Achkevych, O., & Chuba, V. (2019). Optymizatsiia kutovoi shvydkosti barabannykh zmishuvachiv. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7 (99)), 64–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166944>

- Kazartsev D. I., & Panchenko O. V. (2015): Obruntuvannia parametriv mekhanizmu peresuvannia ahrehatu "shtabeleukladach" z urakhuvanniam nerivnosti reikovo kolii. Molod: nauka ta innovatsii materialy III-yi Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv i molodykh uchenykh: Vol. 3.. 6–7. <https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/molod-nauka-ta-innov/pdf-2015/20160328-04.pdf>
- Novak, A. I., Hnieushev, V. O.(2020). Sposib ryinyvannya girskyx porid vbychom. Visnyk Nationality universita vodnogo gospodarstva and prirodnokorystuvannia, 2, 193-202. <https://doi.org/10.31713/vt2202018T>
- Terentiev, O. M., Kryuchov A. I., Kleschov A. I., Gontar P. A. (2018). Plazmo mexanical ryinyvannia vyboiyyv. KPI Sicorskogo. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23339>
- Tipikin, O. M., & Zabolotnyi, K. S. (Eds.). (2016). Obruntuvannia parametriv perekhidnoi dilianky skladskoho konveiera shtabeleukladacha. NAUKOVA VESNA 2016: materialy VII-yi Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv i molodykh uchenykh. 40-41. <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/Haykova%20vesna%202016.pdf>
- Volokh, V. O., Lohvynenko, M. V., Poliakov, B. A. (2019). Prystrij dlia usuchennia zaivysannia sypkoho materialua boruinvanniay ohosvodu. Technical service of agriculture, forestry and transpor tsystems, 16, 102-109. <http://ts.khntusg.com.ua/index.php/ts/article/view/41/37>
- Vozniuk, V., Kvasha, M., & Mikulonok, I. (2012). Analiz enerhositylovykh parametriv roturnoho zmishuvacha. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(5(50), 56–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2011.1793>
- Zaselskiy, V., Popolov, D., & Zaselskiy, I. (2015). Industrial research of portal mixer-homogenizator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1(74), 20–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40536>
- Zaselskiy, V., Popolov, D., Zaytsev, H. & Shepelenko, M. (2021) Upgrade of conveyor line for coal charge preparation with the use of modern grading-and-mixing equipment, *Science and Innovation*, 17(3), 67–77. <https://doi.org/10.15407/scine17.03.067>