

УДК 621.928.23

С.В. Орищенко, аспірант КНУБА

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕТАПІВ РУХУ ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОТА

**Вступ.** Одним з основних показників робочого процесу грохотів є швидкість переміщення маси матеріалу по робочій поверхні. Вона визначає продуктивність і ефективність роботи машини. У сучасних машинах, що працюють у зарезонансній зоні, процес транспортування матеріалу відбувається з підкиданням. Визначенню величини швидкості руху матеріалу по робочому органу присвячено ряд робіт [1-11]. У них досить докладно досліджений процес вібротранспортування матеріалу з підкиданням і наведені розрахункові формули для визначення швидкості її руху по робочому органу. В цих же роботах наведені результати досліджень по визначенню впливу різних параметрів машин (кута нахилу робочого органа, кута вібрації, коефіцієнта тертя матеріалу, про поверхню робочого органа, частоти й амплітуди коливань) на швидкість вібротранспортування. Встановлено, що режим транспортування з підкиданням є найбільш ефективним. Для деяких матеріалів (дрібних класів  $-0,5 +0$  мм) режим безвідривного транспортування дозволяє одержати більш високу ефективність просівання.

**Аналіз досліджень.** Вперше кінематику безвідривного транспортування матеріалу розглянув у своїй роботі Олевський В.А. [4,5]. Усі розрахункові залежності отримані їм із припущення сталості величини коефіцієнта тертя породи об робочий орган, тобто приймається рівність статичного й кінематичного коефіцієнтів тертя. Для резонансних вібротранспортних машин, що працюють із відносно більшими амплітудами (15...30 мм) і частотою 3...5 Гц, при факторі режиму  $\Gamma < 1$  ці формули використовувати неможливо, тому що фактично статичний коефіцієнт тертя не дорівнює кінематичному коефіцієнту тертя. Коефіцієнт тертя в статиці гірської маси суттєво більше, чим при русі. Тому початкові умови відносного руху куска будуть фактично іншими, чим передбачається в роботі [4,5].

У результаті виконаного аналізу встановлено, що швидкість вібротранспортування одиничного куска несуттєво відрізняється від швидкості матеріалу такого ж типу породи, роздробленої до класу  $-15$ мм товщиною, що транспортується шаром, до 25 мм. В зв'язку з цим усі розрахунки проведені для одиничного куска матеріалу. Для спрощення математичної моделі й порівняння розрахунків з результатами теоретичних і експериментальних досліджень, статичний і кінематичний коефіцієнти тертя куска по сталі були прийняті постійними. Маса куска не перевищує 20 % маси робочого органа, який здійснював гармонійні резонансні коливання в одній площині з постійною амплітудою. Кусок матеріалу приймається за матеріальну точку, і його рух по робочій поверхні машини розглядається на декількох етапах.

**Перший етап руху.** Кусок матеріалу й робочий орган (рис.1) рухаються спільно доти, поки спрямована вздовж його поверхні сила інерції ( $F_i$ ), і яка скагується ( $F_{ск}$ ) не перевищать силу тертя ( $F_{тр}$ ).

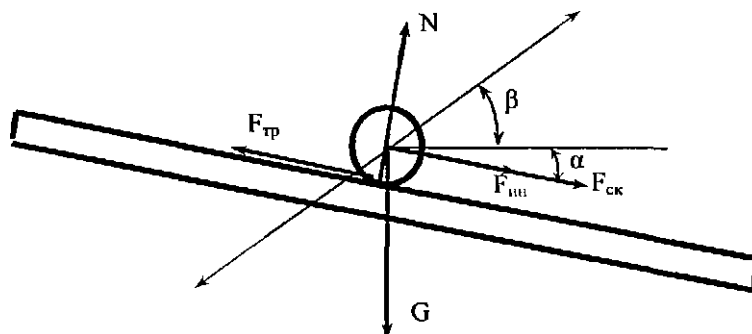


Рисунок 1. Розрахункова схема руху куска матеріалу на похилому грохоті.

Рівняння відносного руху частинки в проекціях на рухомі вісі мають вид:

$$\left. \begin{aligned} m \ddot{x} &= -m \ddot{\xi} - mg \sin \alpha + F; \\ m \ddot{y} &= -m \ddot{\zeta} - mg \cos \alpha + N, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де:  $m$  – маса частинки;  $\xi, \zeta$  – проекції коливань площини в нерухомій системі координат, напрямком вісей яких є паралельними вісям рухомої системи координат  $X_0 Y$ , що жорстко зв'язані з площиною.

Прийняв  $\xi = A \cos(\alpha + \beta) \sin \omega t$ ,  $\zeta = A \sin(\alpha + \beta) \sin \omega t$ , момент початку руху куска щодо робочої поверхні (час  $t_n$ ) знаходиться після розв'язку рівняння рівноваги ( $F_{ei} = F_{од} - F_{не}$ ) з рівняння (2)

$$\sin \omega t_i = \frac{f_i g \cos \alpha - g \sin \alpha}{A_0 \omega^2 [\cos(\alpha + \beta) + f_i \sin(\alpha + \beta)]}, \quad (2)$$

де  $\beta$  – кут вібрації, град.;

$\alpha$  – кут нахилу робочого органа, град.;

$\omega$  – кутова частота власних коливань робочого органа машини, рад/с;

$f_n$  – статичний коефіцієнт тертя пари: шматок – сталь;

$A_0$  – амплітуда коливань робочого органа, м;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Другий етап руху. На цьому етапі рушійною силою є сила, рівна по модулю сили тертя, яка зрушує шматок щодо робочого органа. Робочий орган і шматок рухаються в одному напрямку. Диференціальне рівняння руху шматка відносно робочого органа на другому етапі має вигляд

$$\ddot{O}_{02} = f_k [g - A_0 \omega^2 \sin(\alpha + \beta) \sin \omega t] + g \sin \alpha \quad (3)$$

$$\dot{O}_{02} = f_k [gt + A_0 \omega \sin(\alpha + \beta) \cos \omega t] + gt \sin \alpha + C \quad (4)$$

$$O_{02} = 0,5 f_k g t^2 + f_k A_0 \sin(\alpha + \beta) \sin \omega t + 0,5 t_0^2 g \sin \alpha + C_t + D \quad (5)$$

Використовуючи початкові умови другого етапу (при  $t = t_i$  швидкість і переміщення шматка щодо робочого органа дорівнюють нулю), знаходимо постійні інтегрування  $C$  і  $D$ .

Визначивши значення швидкості ( $\dot{O}_{02} = V_2$ ) і переміщення ( $X_{02} = S_2$ ) шматка наприкінці другого етапу ( $t = T/4$ ,  $T$  – період власних коливань машини), знаходимо початкові умови третього етапу.

Третій етап руху. На цьому етапі кусок і робочий орган рухаються в протилежних напрямках, причому рушійна сила зменшується по величині й продовжує збільшувати швидкість куска. Тривалість третього етапу ( $t_3 = T/4 - t_0$ ) знаходиться після розв'язку трансцендентного рівняння (6), яке отримано з умови рівноваги – сила тертя ковзання дорівнює силі інерції:

$$\sin \omega t_0 = \frac{f_k g \cos \alpha - g \sin \alpha}{A_0 \omega^2 [\cos(\alpha + \beta) + f_k \sin(\alpha + \beta)]}, \quad (6)$$

де  $t_0$  – час, обумовлене з умови рівноваги сили тертя ковзання й сили інерції.

Використовуючи (2.10), можна визначити швидкість і переміщення шматка на третьому етапі ( $T/4 \leq t \leq T/2 - t_0$ ):

$$\dot{X}_{03} = f_k [gt + A_0 \omega \sin(\alpha + \beta) \cos \omega t] + gt \sin \alpha + C_1; \quad (7)$$

$$X_{03} = 0,5 f_k g t^2 + f_k A_0 \sin(\alpha + \beta) \sin \omega t + 0,5 t_0^2 g \sin \alpha + C_1 t + D_1 \quad (8)$$



Швидкість ( $V_3 = \dot{X}_{03}$ ) і переміщення ( $\tilde{O}_{03} = S_3$ ) шматка наприкінці третього етапу при  $t = T/2 - t_0$  визначають початкові умови четвертого етапу.

Четвертий етап руху. На цьому етапі ( $T/2 - t_0 \leq t \leq T/2$ ) сила інерції стає менше сили тертя, і остання гальмує рух шматка. Швидкість і переміщення шматка на четвертому етапі перебувають, відповідно, з рівнянь:

$$V_4 = V_3 - \left( \int_0^{t_0} (f_k g - g \sin \alpha) dt_4 - f_k A_0 \omega^2 \sin(\alpha + \beta) \int_{T/2-t_0}^{T/2} \sin \omega t dt \right) \quad (9)$$

$$S_4 = V_3 t_4 - \left( \int_0^{t_0} (f_k g - g \sin \alpha) t_4 dt_4 + f_k A_0 \omega \sin(\alpha + \beta) \int_{T/2-t_0}^{T/2} \cos \omega t dt \right) \quad (10)$$

де  $t_4$  - час в інтервалі від  $t = T/2 - t_0$  до  $T/2$ .

П'ятий етап. На цьому етапі сила тертя гальмує шматок до повної зупинки його на робочому органі. Рівняння руху шматка на п'ятому етапі мають вигляд

$$V_5 = V_4 - \left( \int_0^{t_{05}} (f_k g - g \sin \alpha) dt_5 + f_k A_0 \omega^2 \sin(\alpha + \beta) \int_0^{t_{05}} \sin \omega t_5 dt_5 \right) \quad (11)$$

$$S_5 = V_4 t_5 - \left( \int_0^{t_{05}} (f_k g - g \sin \alpha) t_5 dt_5 - f_k A_0 \omega \sin(\alpha + \beta) \int_0^{t_{05}} \cos \omega t_5 dt_5 \right) \quad (12)$$

де  $t_5$  - час, відлічене від  $t = T/2$  до  $T/2 + t_{05}$ .

Закінчення п'ятого етапу перебуває в результаті розв'язку трансцендентного рівняння (11) при підстановці в нього кінцевих умов:  $t_5 = t_{05}$ ;

$t = T/2 + t_{05}$ ;  $V_5 = 0$ . Тому що  $V_4 > 0$  і  $f_k g / \omega > 0$ , то час закінчення п'ятого етапу ( $t_{05}$ ) без істотної похибки можна визначити з формули

$$t_{05} = \omega^{-1} \left\{ \left[ (f_k g - g \sin \alpha)^2 / (A_0 \omega^2 \sin(\alpha + \beta))^2 - 2[V_4 + A_0 f_k \omega \sin(\alpha + \beta)] / A_0 f_k \omega \sin(\alpha + \beta) \right]^{0.5} - (f_k g - g \sin \alpha) / A_0 f_k \omega^2 \sin(\alpha + \beta) \right\} \quad (13)$$

При певному співвідношенні параметрів режиму вібротранспортування й коефіцієнта тертя, під час руху робочого органа від нижнього положення нагору, можливий рух вантажу назад. Цей режим буде спостерігатися при виконанні умови

$$0,5\dot{O} - t_{05} - t_{06} > 0 \quad (14)$$

де  $t_{06}$  - час, визначаємий з умови рівноваги шматка  $F_{\dot{\alpha}t} - F_{\dot{\alpha}e} = F_{OD}$  на робочій поверхні по формулі

$$\sin \omega t_{06} = \frac{f_k g \cos \alpha + g \sin \alpha}{A_0 \omega^2 [(\cos(\alpha + \beta) - f_k \sin(\alpha + \beta))]} \quad (15)$$

Шостий етап руху. Диференціальне рівняння руху матеріалу назад (вгору) по робочому органу має вигляд

$$\ddot{X}_0 = f_k [g + A_0 \omega^2 \sin(\alpha + \beta) \sin \omega t] - g \sin \alpha \quad (16)$$

Тривалість цього етапу руху шматка матеріалу визначається з рівняння

$$t_6 = 0,5T - t_{05} - t_{06}. \quad (17)$$

Використовуючи кінцеві умови п'ятого етапу ( $t = t_{50}$ , швидкість і переміщення шматка дорівнюють нулю), знаходимо швидкість і переміщення шматка на шостому етапі:

$$V_{06} = gt(f_k - \sin \alpha) - A_0 \omega \sin(\alpha + \beta) \cos \omega t - t_{05} g (f_k - \sin \alpha) \quad (18)$$

$$S_{06} = 0,5gt^2(f_k - \sin \alpha) - f_k A_0 \sin(\alpha + \beta) \sin \omega t - 0,5t_{05}^2 g (f_k - \sin \alpha) - t \cdot t_{05}^2 g (f_k - \sin \alpha) + A_0 \omega \sin(\alpha + \beta). \quad (19)$$

Підставивши в (18) і (19) час закінчення шостого етапу ( $t_6 = 0,5T - t_{06}$ ), знаходимо початкові умови сьомого етапу ( $V_6$ ;  $S_6$ ).

Сьомий етап руху. Швидкість руху шматка на сьомому етапі (гальмування шматка) знаходиться з рівняння

$$V_{07} = V_6 - gt(f_k + \sin \alpha) + f_k A_0 \omega \sin(\alpha + \beta) \cos \omega t \quad (20)$$

Наприкінці сьомого етапу швидкість шматка дорівнює нулю, отже, тривалість етапу ( $t_7$ ) знаходиться після розв'язку трансцендентного рівняння

$$V_6 - gt_7(f_k + \sin \alpha) + f_k A_0 \omega \sin(\alpha + \beta) [\cos \omega(0,5T - t_{06} + t_7) - \cos \omega(0,5T - t_{06})] = 0 \quad (21)$$

Таким чином, знаючи час закінчення сьомого етапу, можна визначити переміщення шматка:

$$S_7 = V_6 t_7 - 0,5gt_7^2(f_k + \sin \alpha) + f_k A_0 \sin(\alpha + \beta) \sin \omega t_7. \quad (22)$$

Середню швидкість руху шматка по робочому органу, знаючи його переміщення (з урахуванням знака, тобто напрямку руху) на кожному етапі ( $S_i$ ), можна визначити по формулі

$$V_{\text{AD}} = \omega (\sum S_i) / 2\pi.$$

### Висновки.

1. Отримані аналітичні залежності руху вібраційного грохота із врахуванням впливу всіх даних сил в системі.
2. Запропоновані відповідні етапи руху, що відображають реальні взаємодії частинок матеріалу і поверхні грохота.
3. Практичне застосування запропонованих аналітичних залежностей потребує визначення коефіцієнтів опору, що є задачею подальших досліджень.

### Література

1. Спиваківський А.О. Вібраційні конвеєри, живильники й допоміжне обладнання / А.О. Спиваківський, І.Ф. Гончаревич. - М.: Машинобудування, 1972.-326 с.
2. Левенсон Л.Б. Дробильно-сортувальні машини й установки / Л.Б. Левенсон, П.М. Цигельний. - М.: Госстройиздат, 1952. - 562 с.
3. Бауман В.А. Дослідження вібраційного живильника /В.А.Бауман//Сб. тр. Ленінградського інституту механізації будівництва (ЛИМС). - Л.-М.: Стройиздат, 1939.
4. Олевський В.А. Кінематика грохотів /В.А.Олевський. - Л.-М.: ГНТИ, 1941. - Частина I і II.-156 с.
5. Олевський В.А. Параметри режиму й продуктивності грохотів/ В.А.Олевський // Збагачення руд. - 1967- №3 (69). - С. 31-37.
6. Блехман І.І. Вібраційне переміщення / І.І. Блехман, Г.Ю. Джанелідзе. -М.: Наука, 1964. -410 с.
7. Потураєв В.Н. Вібраційні транспортуючі машини / В.Н. Потураєв, В.Н. Франчук, А.В. Червоненко. - М.: Машинобудування, 1964.-214 с.
8. Биховський І.І. Основи теорії вібраційної техніки. /І.І.Биховський// -М.: Машинобудування, 1969. - 142 с.
9. Гончаревич І.Ф. Визначення швидкості вібротранспортування вібраційного живильника-грохота / І.Ф. Гончаревич, А.В. Юдин // Тр. ИГД Минчермета. - Свердловськ, 1970. -№25. - Ст. 172-176.
10. Биховський І.І. Основи теорії вібраційної техніки / І.І.Биховський.-М.: Машинобудування, 1969.-363 с.
11. Юдин А.В. Швидкість руху матеріалу на вібраційному колосниковому гуркоті / А.В. Юдин, І.Ф. Гончаревич, А.Н. Шилін // Збагачення руд.-Л.,1969.-№4.-С. 108-110.