



Спірін А. В.

Вінницький  
національний  
аграрний  
університет

Соломка В. О.

Національний  
університет  
біоресурсів і  
природокористування  
України

УДК 631.363.21

## ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРОТРАНСПОРТЕРА ДЛЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНА ДО ПОДРІБНЮВАЧА МАЛОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ

*В статті обосновано перспективність використання транспортера вібраційного типу для дозорованої загрузки зернових матеріалів в измельчитель малої продуктивності і проаналізовано закономірності переміщення зерна по вибрируючій поверхності.*

*In article the perspective of using vibratory conveyor for loading dosage granular materials into the crusher with low productivity and analyzed patterns of movement of grain by a vibrating surface.*

**Постановка проблеми.** Відсутність надійних живильників зерна дробарок малої продуктивності, здатних забезпечити стабільну рівномірну подачу матеріалу до камери подрібнення, обґрунтувала необхідність проведення власних досліджень з цього питання.

**Аналіз останніх досліджень.** Як показав аналіз існуючих конструкцій живильників сипких матеріалів, задачу забезпечення дозованої подачі зерна в малих об'ємах до робочої камери подрібнювачів можна вирішити шляхом застосування коливних конвеєрів, в яких процес транспортування здійснюється за рахунок коливань високої частоти з малою амплітудою. Такий тип дозаторів широко застосовується в гірничорудній промисловості, а в останні роки – і в машинобудуванні, для забезпечення стабільного направленої завантаження заготовками верстатів-автоматів [1,2]. Перевага коливних конвеєрів полягає в простоті конструкції та високій надійності виконання процесу, особливо при малих подачах матеріалу.

В залежності від режимів роботи матеріал може рухатись в коливному транспортері без відриву від робочої поверхні (інерційні транспортери), або з відривом (вібраційні транспортери). Дослідження

показали, що найбільш ефективним, з точки зору забезпечення стабільної подачі матеріалу, є відривний режим роботи живильників сипких матеріалів (вібраційний тип живильників) [1,2]. Крім того, такий режим роботи сприяє створенню псевдозрідженого шару матеріалу, що також підвищує надійність роботи живильників.

**Мета дослідження.** Забезпечити дозовану подачу матеріалу до камери подрібнення зернових дробарок малої продуктивності шляхом застосування живильника вібраційного типу.

**Результати досліджень.** Розглянемо переміщення зернини масою  $m_3$  по поверхні АВ вібралотка, встановленого з від'ємним кутом нахилу  $\alpha$  до горизонту (рис. 1).

Величина кута нахилу поверхні вібралотка до горизонту незначна і знаходиться в межах  $1^\circ \leq \alpha \leq 3^\circ$ , що дозволить забезпечити стабільну дозовану подачу зерна без хаотичного його зсування по лотку.

Якщо площині АВ надати коливних рухів, направлених під кутом  $\beta$  до поверхні площини, то на зернину масою  $m_3$ , що знаходиться на цій площині, будуть діяти сила тяжіння  $G=m \cdot g$ , сила тертя  $F_m=N \cdot f$ , сила нормального тиску  $N$  та знакозмінна сила інерції  $I=a \cdot \omega^2 \cdot m_3 \cdot \sin \varphi$ .

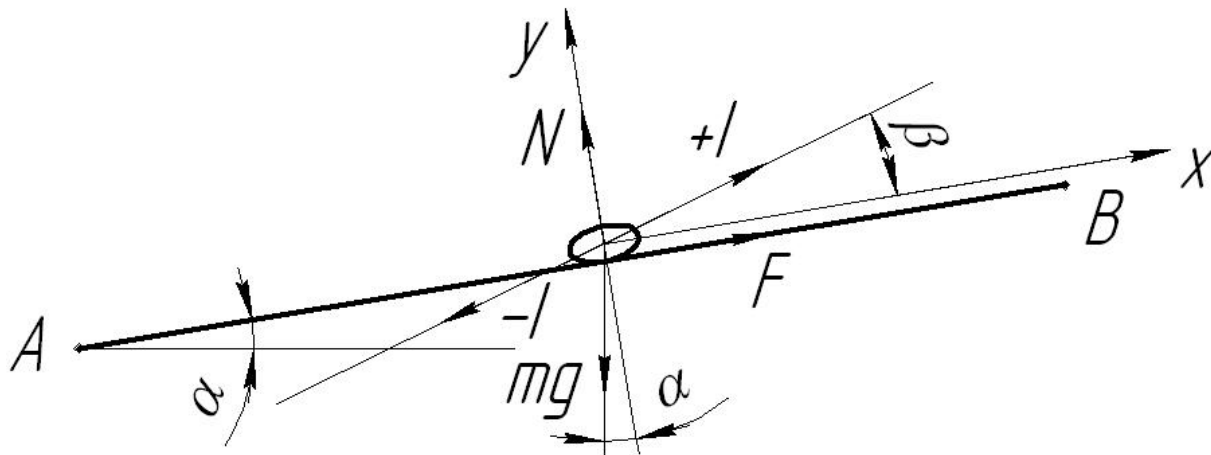


Рис. 1. Схема сил, діючих на зернину, розміщену на поверхні вібрлотка

Умову рівноваги зернини на поверхні AB в нерухомій системі координат XOY можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} F_T = m_3 \cdot g \cdot \sin \alpha \pm I \cdot \cos \beta \\ N = m_3 \cdot g \cdot \cos \alpha \pm I \cdot \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

Для переміщення зернини по поверхні лотка від точки A до точки B необхідно щоб виконувалась умова:

$$\sum X(F_{xi}) > 0,$$

або

$$N = m_3 \cdot g \cdot \cos \alpha - a \cdot \omega^2 \cdot m_3 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta = m_3 \cdot (g \cdot \cos \alpha - a \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta), \quad (3)$$

де  $a$  – амплітуда коливань площини;  
 $\omega$  – кутова швидкість джерела коливань;  
 $\varphi$  – фазовий кут коливань,  $\varphi = \omega t$ .

При умові, що  $g \cdot \cos \alpha > a \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta$ , зернина притискається до поверхні лотка AB і рухається разом з нею, а в протилежному випадку, коли  $a \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta > g \cdot \cos \alpha$  – зернина буде відриватися від поверхні лотка. Фазовий кут коливань  $\varphi$  змінюється в межах від 0 до  $2\pi$ , тому максимальне значення вираз  $a \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta$  набуде при  $\sin \varphi = 1$  ( $\varphi = \pi/2$ ). Отже, максимальне прискорення відносно осі OY лоток (і зернина разом з ним) набуде у випадку, коли  $I_{\max}^y = a \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta$ .

У випадку, коли  $g \cdot \cos \alpha = a \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta$ , наступають

$$I \cdot \cos \beta > m_3 \cdot g \cdot \sin \alpha - F_T,$$

звідки

$$a \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi > \frac{m_3 \cdot g \cdot \sin \alpha - N \cdot f}{m_3 \cdot \cos \beta}. \quad (2)$$

Умова (2) може бути виконана лише при наявності явища мікрвідриву зернини від поверхні AB, тобто  $\sum Y(F_{yi}) > 0$ . Відрив зернини відбувається у випадку, коли сила тиску зернини на поверхню лотка буде рівна 0:

граничні умови (початок відриву зернини від поверхні AB). Відношення  $\Gamma = \frac{a \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta}{g \cdot \cos \alpha} = 1$

називають граничним, а коефіцієнт  $\Gamma$  – динамічним коефіцієнтом режиму роботи коливного транспортеру. При  $\Gamma < 1$  вантаж не відривається від поверхні лотка (інерційні конвеєри), а при  $\Gamma > 1$  – рухається в режимі відриву (вібраційні конвеєри [1]).

Враховуючи, що площина лотка AB здійснює гармонічні коливання під дією сили інерції  $I$  в напрямку її дії (під кутом  $\beta$  до площини AB), то схему переміщення зернини можна відобразити наступним чином (рис. 2).

Діаграму руху зернини по вібрлотку живильника дробарки під дією зовнішніх сил наведено на рисунку 3.

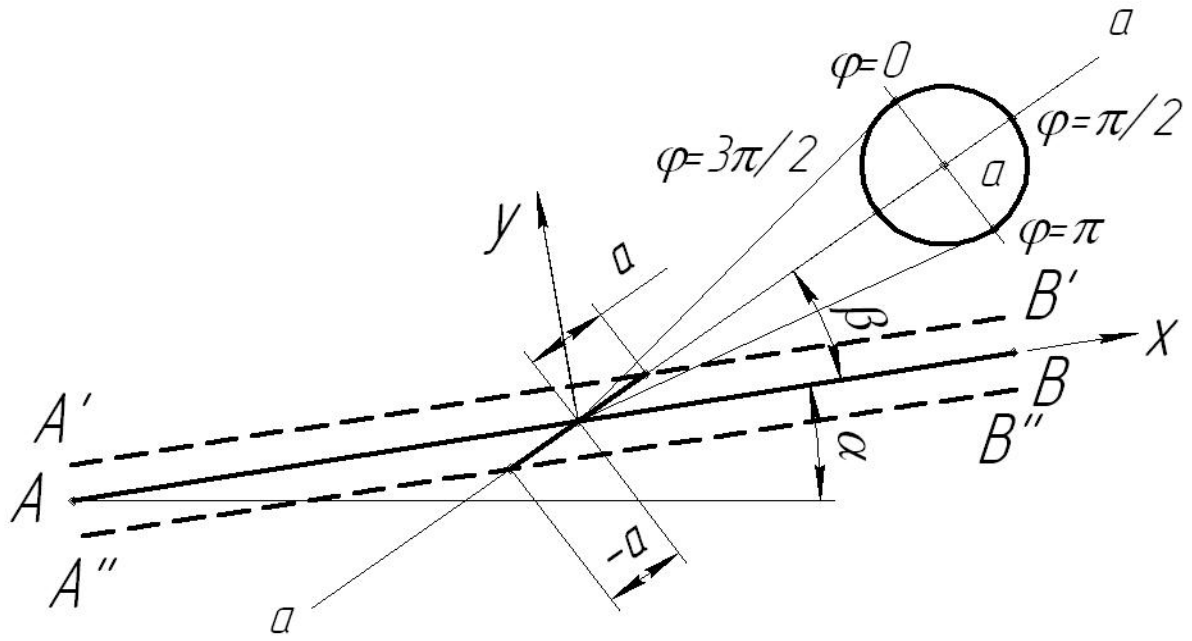


Рис. 2. Схема руху зернини на лотку віброживильника

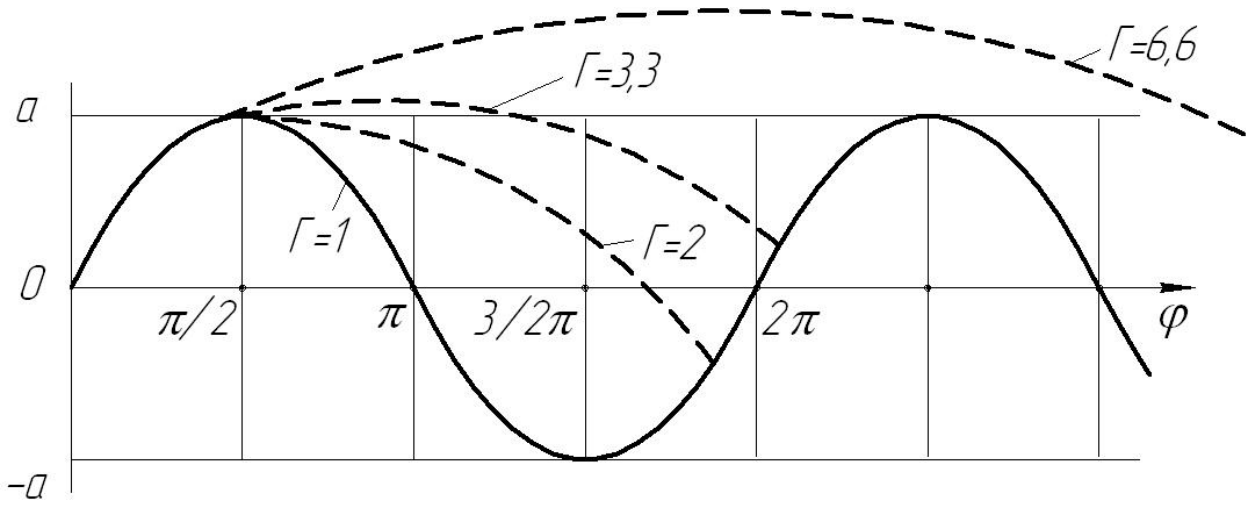
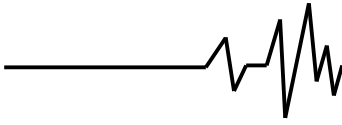


Рис. 3. Діаграма руху зернини на лотку віброживильника

Починаючи з середнього положення ( $\varphi_0=0$ ) площина  $AB$  переміщується в напрямку  $a-a$  на величину ексцентриситету  $a$  в крайнє верхнє положення ( $\varphi_1 = \pi/2$ ). В цьому випадку, сила інерції  $I = m_3 \cdot a \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi$  притискатиме зернину до поверхні  $AB$  і при умові, що  $F_T \geq m_3 \cdot g \cdot \sin \alpha \pm I \cdot \cos \beta$ , вони переміщуються разом без взаємного проковзування. При подальшому збільшенні кута  $\varphi$  ( $\pi/2 < \varphi < 3\pi/2$ ), площина  $AB$  рухається вниз на відстань  $2a$ , сила інерції відриває зернину від поверхні лотка  $AB$  і вона здійснює вільний політ, траєкторія якого визначається кутом кидання  $\beta$ , початковою швидкістю зернини  $V_0$  і залежить від значення коефіцієнта

динамічного режиму  $\Gamma$  роботи віброживильника.

Момент зустрічі зернини з поверхнею вібралотка  $AB$  необхідно підбирати таким чином, щоб вона попала на лоток при його переміщенні вперед і вгору ( $3\pi/2 < \varphi < \pi/2$ ) в положенні, коли час їх спільного руху був би мінімальним, але достатнім для надання зернині необхідного прискорення для наступного відриву і переміщення вздовж поверхні лотка в напрямку від точки  $A$  до  $B$  (рис. 3). Дослідженнями встановлено, що раціональними слід вважати такі режими роботи віброживильника, при яких коефіцієнт динамічного режиму  $\Gamma$  знаходиться в межах  $1 < \Gamma < 3,3$ . При  $\Gamma < 1$  живильник працює як інерційний транспортер, без відриву матеріалу



від поверхні лотка, а при  $\Gamma > 3,3$  виникають значні динамічні навантаження в системі приводу [1].

З точки зору забезпечення стабільної подачі зерна в камеру подрібнення, необхідно знайти швидкість його переміщення вздовж лотка АВ в напрямку від А до В (вздовж осі ОХ). Враховуючи циклічність поздовжніх переміщень лотка, визначимо його максимальну швидкість:

$$V_{Л_{\max}}^x = a \cdot \omega^2 \cdot \cos \beta = a \cdot \pi \cdot \gamma \cdot \cos \beta, \quad (4)$$

де  $\omega = \pi \cdot \gamma$  – частота коливань лотка.

Середня швидкість зернини в напрямку осі ОХ буде менша від максимальної швидкості лотка,  $V_{з_{\text{ср}}}^x < V_{Л_{\max}}^x$ . Тому, для визначення середньої швидкості зернини вздовж лотка необхідно врахувати коефіцієнт швидкості  $K_{ш}$ , який визначається з виразу [3]:

$$K_{ш} = \frac{V_{з_{\text{ср}}}^x}{V_{Л_{\max}}^x}. \quad (5)$$

Значення коефіцієнта  $K_{ш}$  залежить від кінематичних режимів роботи віброживильника і визначається аналітично, або графічним способом, шляхом вимірювання планіметром відповідних площ на графіку швидкостей лотка [2].

В найбільш загальному випадку переміщення зернини по поверхні вібрлотка можна розбити на п'ять етапів і, в залежності від їх комбінацій, розрізняють шість режимів руху матеріалу [1]. Виходячи з наших умов (висока швидкість переміщення вібрлотка) приймемо І-й режим руху зернини, який включає три етапи: розгін, вільний політ і гальмування зернини (рис. 4).

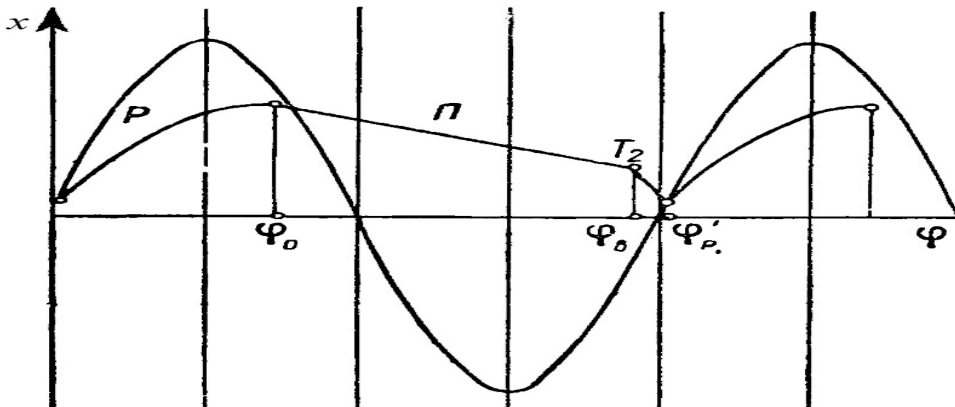


Рис. 4. Графік переміщення зернини по поверхні вібрлотка живильника в режимі 1

Виходячи з фізико-механічних властивостей зерна та з метою забезпечення його необхідної подачі до камери подрібнення (50...150 кг/год.) виникла необхідність в аналітичному обґрунтуванні раціональних параметрів і режимів роботи вібрлотка живильника:

- розмірів та кута нахилу до горизонту дна вібрлотка;
- частоти та напрямку коливань вібрлотка;
- амплітуди коливань (ексцентриситет кривошипа);
- швидкості переміщення зерна вздовж вібрлотка.

Для забезпечення ефективного переміщення зерна по поверхні вібрлотка в напрямку від А до В, кут прикладення збуджуючої сили вібратора повинен знаходитися в межах  $20^{\circ} < \beta < 30^{\circ}$  [2]. Бажано, щоб лінія дії збуджуючої сили (кут  $\beta$ ) проходила через центр інерції вібрлотка, який, як правило, співпадає з центром мас при

симетричному розміщенні вузлів віброживильника. У випадку недотримання цієї вимоги, система отримає додаткові навантаження у вигляді крутного моменту, який перешкоджає переміщенню зерна по лотку і зменшує його поступальну швидкість.

Завантажувальні патрубкі живильника не повинні жорстко з'єднуватися з вібрлотком, щоб не впливати на кінематичні режими його роботи.

Застосування запропонованої схеми віброживильника дозволяє забезпечити необхідну продуктивність, але суттєво ускладнює конструкцію подрібнювача зернових матеріалів. Для усунення цього недоліку шарнірно зафіксуємо один кінець поверхні в точці О, а другий будемо колівати навколо цього шарніра (рис. 5).

Проаналізуємо траєкторії руху частинок на колівній поверхні і самої поверхні, прийнявши до уваги, що поверхня має кут нахилу  $\alpha$  до горизонтальної осі ОХ.



Розглянемо сили, що діють на частинку (зернину, або елементарний об'єм матеріалу), яка знаходиться на поверхні  $OX_1$  в точці  $X_1$  при

здійсненні нею кутових коливань з кутовими параметрами  $\Theta$ ,  $\dot{\Theta}$ ,  $\ddot{\Theta}$

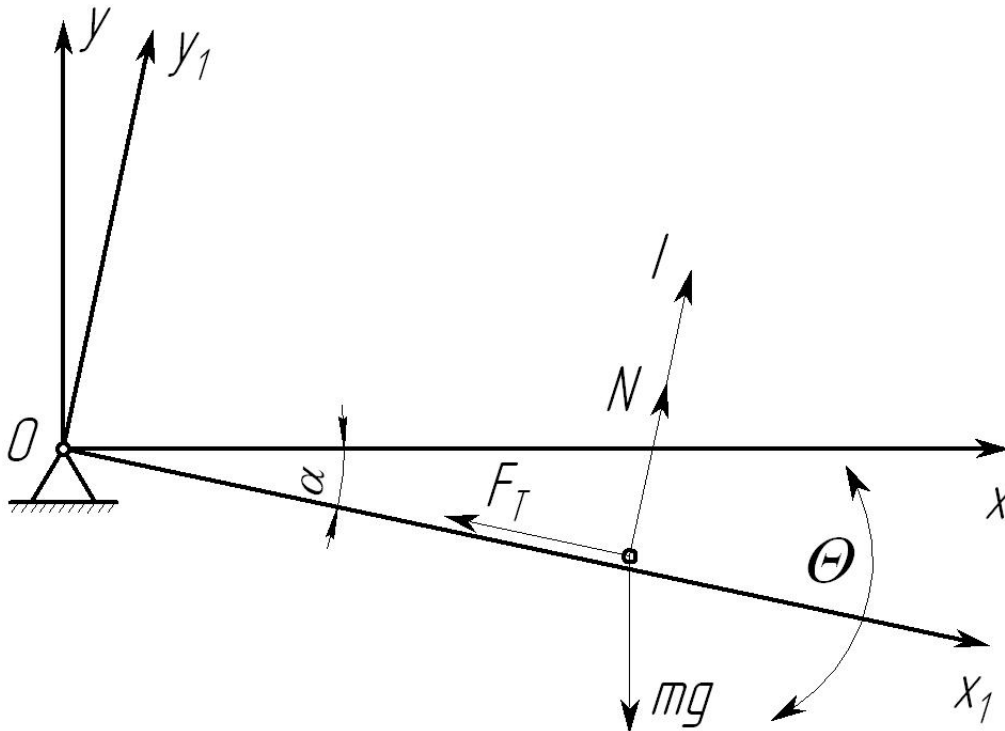


Рис. 5. Аналіз сил, що діють на зернину, яка знаходиться на коливній поверхні

З точки зору забезпечення транспортування матеріалу по поверхні, що коливається, важливо знати компоненти зміщень, швидкостей та прискорень точок цієї поверхні. Для визначення вказаних компонент розглянемо їх кутові зміщення, швидкості та прискорення повороту поверхні навколо точки  $O$ , які виражаються наступними залежностями (рис. 5):

$$\Theta = \arctg \frac{Y_{1M}}{X_{1M}} = \arctg \frac{r \cdot \sin(\omega t)}{L + r \cdot \cos(\omega t)};$$

$$\dot{\Theta} = \frac{r \cdot \omega \cdot (r + L \cdot \cos(\omega t))}{L^2 + r^2 + 2 \cdot L \cdot r \cdot \cos(\omega t)};$$

$$\ddot{\Theta} = - \frac{L \cdot r \cdot (L^2 - r^2) \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)}{(L^2 + r^2 + 2 \cdot L \cdot r \cdot \cos(\omega t))^2}.$$

В вертикальній площині на матеріал, що знаходиться на поверхні  $OX_1$  (зерно, для спрощення візьмемо одну зернину) діють сила

тяжіння  $G = m \cdot g$  та сила інерції  $I$ , проекцію якої на вісь  $OY$  визначимо за виразом:

$$I = m \cdot \ddot{\Theta} \cdot x_1 \cdot \cos(\theta + \alpha), \quad (7)$$

де  $m$  – маса зернини, кг;

$\ddot{\Theta}$  – кутове прискорення зернини,  $c^{-2}$ ;

$x_1$  – відстань зернини до центра коливань, м.

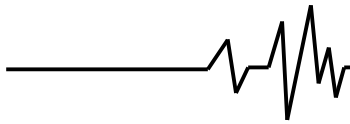
Тоді, умова відриву частинки (елемента об'єму) від поверхні площини, що коливається:

$$m(\ddot{\Theta} \cdot x_1 \cdot \cos(\theta + \alpha) - g) \geq 0. \quad (8)$$

В момент відриву зернини від поверхні, що коливається, рівняння рівноваги в проекції на вісь  $OY$  матиме вигляд:

$$m \cdot \ddot{\Theta} \cdot x_1 \cdot \cos(\Theta + \alpha) - m \cdot g = 0. \quad (9)$$

Підставивши у вираз (9) значення  $\Theta$  і  $\ddot{\Theta}$  з (6), після відповідних перетворень, одержимо:



$$\frac{L \cdot r (L^2 - r^2) \omega^2 \cdot x_1 \cdot \sin(\omega t)}{(L^2 + r^2 + 2L \cdot r \cdot \cos(\omega t))^2} \cdot \cos\left(\arctg \frac{r \cdot \sin(\omega t)}{L + r \cdot \cos(\omega t)} + \alpha\right) + g = 0. \quad (10)$$

Позначивши ліву частину рівняння (10) через  $G$ , побудуємо графіки  $G = f(\omega, r, L, x_1, \alpha, m_s)$  в залежності від кута повороту кривошипу  $\varphi = \omega t$ , аналіз яких показав, що в функції  $t$  на момент відриву зернини від площини найбільш суттєво впливає зміна кутової швидкості  $\omega$  обертання кривошипу  $AM$ . Відрив зернини відбувається при переміщенні площини з

крайнього верхнього положення в момент переходу кривої через вісь  $X$  ( $G = 0$ ). На рис.6 наведено приклад визначення моменту відриву зернини від площини при різних значеннях кутової швидкості кривошипу і при фіксованих інших параметрах ( $r = 1,5\text{мм}$ ,  $L = 0,2\text{м}$ ,  $x_1 = 0,05\text{м}$ ,  $\alpha = 2^\circ$ ,  $m_s = 0,04\text{г}$ ).

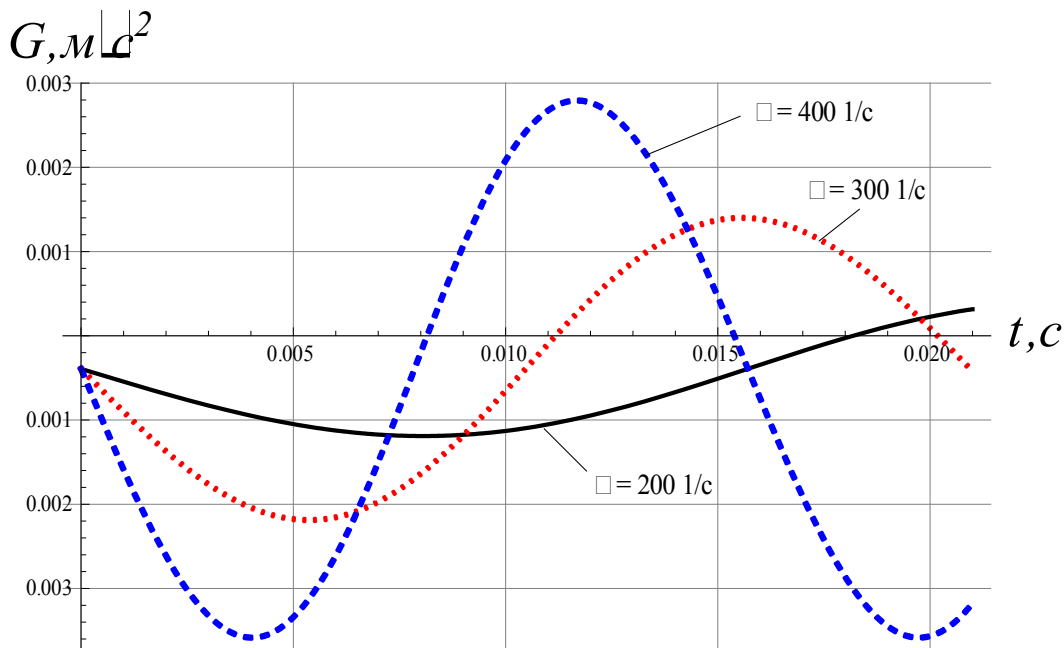


Рис. 6. Визначення моменту відриву зернини від поверхні, що вібрує, при різних значеннях  $\omega$

Аналогічно визначаємо вплив решти факторів на умови відриву зернини і будуємо графіки залежностей.

### Висновки

Найбільш доцільним способом дозованої подачі зернової маси до робочої камери подрібнювача малої продуктивності слід вважати вібраційний, що характеризується високою частотою коливань та малою амплітудою.

Аналіз руху зернини по площині, що коливається, дозволив визначити вплив основних факторів на раціональні параметри, що забезпечують надійну дозовану подачу зернової маси до подрібнювача малої продуктивності.

Проведені аналітичні дослідження є основою для розрахунку числових значень подачі зернової маси до подрібнювача.

Слід відмітити, що при визначенні характеру руху зернової маси по площині, що коливається, необхідно враховувати і ефект псевдозріженого шару, що є предметом додаткових досліджень.

### Література

1. Повидайло В.А. Расчет и конструирование вибрационных питателей. М.: Машгиз, 1962.- 152 с.
2. А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1983.- 487 с.
3. Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973.- 832 с.