

СКОЛЬЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ГРУНТА ПО РАБОЧИМ ОРГАНАМ ВИБРОМАШИН

А.В. Архипенко

канд. техн. наук, доцент, e-mail: iten-miu@mail.ru

Международный инновационный университет, Сочи, Россия

Аннотация. Показано, что в режимах движения «без подбрасывания» коэффициент трения материала о грузонесущую поверхность рабочего органа и угол вибраций оказывают существенное влияние на эффективность вибротранспортирования. Коэффициент передачи горизонтальной составляющей скорости вибраций при постоянном значении коэффициента режима работы сначала возрастает с увеличением коэффициента трения, достигая максимума при определённом соотношении коэффициента трения и угла вибраций, а затем плавно снижается.

Ключевые слова: скольжение частиц, грунт, вибромашины, вибротранспортирование.

На технологических и санитарно-гигиенических показателях производственных процессов, связанных с внутрицеховым перемещением сыпучих материалов, негативным образом сказывается сильный износ движущихся частей исполнительных механизмов, значительные потери транспортируемых продуктов в виде пыли и газов, выделение агрессивных газов и др.

В связи с этим в последнее время всё более широко проводятся изыскания в области создания эффективных транспортирующих, транспортно-подающих и транспортно-технологических машин, использующих принцип вибрационного транспортирования [1–3]. Это обусловлено: возможностью использования герметичных грузонесущих органов для транспортирования газо- и пылеобразующих продуктов; возможностью транспортирования горячих (до 800 °С) материалов [4, 5]; простотой включения в автоматизированные технологические линии [4]; сравнительно невысокими затратами на содержание и ремонт; низкой энергоёмкостью и возможностью совмещения транспортирования материала с различными технологическими операциями, такими как охлаждение, нагрев, сушка, возгонка, грохочение, обезвоживание и т. п. [5–11]. Кроме того, вибрационное транспортирование является более «чистым» по экологическим требованиям, так как позволяет транспортировать мелкодисперсные пылевидные материалы по герметичной вибротрубе.

Вибротранспортирующие машины способны заменить такие традиционные виды непрерывного транспорта, как пластинчатые, скребковые, винтовые, ковшевые конвейеры, а при транспортировании горячих сыпучих материалов – и

ленточные. Ограничиваться это может только налипанием пылевидных материалов на рабочие органы машин при угле подъёма рабочего органа более 5° .

Вибротранспортирование отличается простотой конструкций машин и сложностью процессов, протекающих в перемещаемом материале. При выборе кинематических параметров виброконвейеров и вибропитателей учитываются условия их эксплуатации, необходимая производительность и свойства груза (гранулометрический состав, объёмный вес, высота слоя).

В общем случае, при вибротранспортировании реализуется либо режим движения с подбрасыванием, когда груз периодически теряет контакт с грузонесущим органом, либо безотрывный режим движения в виде скольжения по рабочему органу.

На характер процесса значительное влияние оказывает соотношение сил трения и сил инерции в слое транспортируемого материала. При движении виброповерхности из нейтрального положения вверх и вперёд силы трения уменьшаются, а силы инерции увеличиваются, и, как только силы инерции превысят силы трения, частица материала начинает перемещаться по виброповерхности. Когда амплитудное значение вертикальной составляющей ускорения виброповерхности превысит ускорение силы тяжести, частица материала от неё отрывается и совершает полёт по параболе.

Виброповерхность с находящейся на ней частицей с массой m колеблется под углом вибрации β , с амплитудой A и частотой ω по закону $S = A \sin t$.

На частицу действует сила тяжести mg , сила сухого трения $F_{\text{тр}}$, нормальная реакция N и сила инерции $F_{\text{ин}} = -mA^2 \sin t$ (рис. 1).

Уравнения движения частицы относительно виброповерхности будут иметь вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= mA^2 \cos(\alpha + \beta) \sin \omega t + F_{\text{тр}} - mg \sin \alpha, \\ m\ddot{y} &= mA^2 \sin \beta \sin \omega t - mg \cos \alpha + N. \end{aligned} \quad (1)$$

При движении частицы по виброповерхности координата y равна нулю, а сила трения $F_{\text{тр}}$ определяется соотношениями

$$F_{\text{тр}} = \begin{cases} -fN & \text{при } \dot{x} > 0 \\ +fN & \text{при } \dot{x} < 0 \\ f_1N & \text{при } \dot{x} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где f – коэффициент трения скольжения; f_1 – коэффициент трения покоя.

При относительном покое частицы на вибрирующей плоскости (совместное движение при $\ddot{x} = 0$ и $\ddot{y} = 0$) нормальная реакция N определяется из второго уравнения (1):

$$N = mg \cos \alpha - mA^2 \sin \beta \sin \omega t.$$

Для обеспечения безотрывного режима работы необходимо, чтобы частица материала оставалась на вибрирующей поверхности, т. е., чтобы соблюдалось условие $N > 0$, или

$$\frac{g \cos \alpha}{A^2 \sin \beta} > \sin \omega t. \quad (3)$$

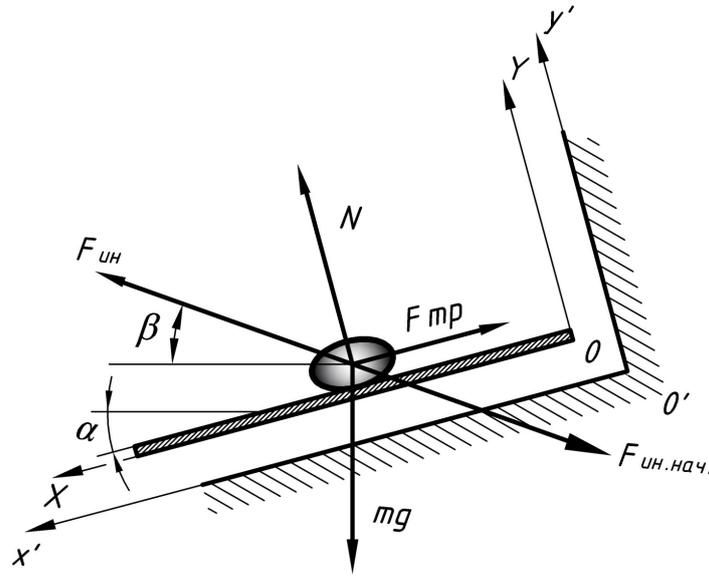


Рис. 1. Схема действия сил на частицу насыпного груза: α – угол наклона грузонесущей поверхности; β – угол вибрации; mg – сила тяжести; N – нормальная реакция грузонесущей поверхности; $F_{ин}$ – сила инерции; $F_{ин.нач}$ – сила инерции в начальный момент времени; XOY – система отсчёта, связанная с грузонесущей поверхностью; $X'O'Y'$ – абсолютная система отсчёта

Частица остаётся в состоянии относительного покоя на плоскости при условии, что сила трения $F_{тр}$ не превосходит по абсолютной величине предельного значения силы статического трения $f_1 N$. Это условие может быть представлено в виде неравенства

$$-f_1 N(t) < F_0(t) < f_1 N(t). \quad (4)$$

Подставляя выражения для силы трения (2) в уравнение (1) для $m\ddot{x}$, получим уравнение скольжения частицы по колеблющейся плоскости

$$\ddot{x} = A\omega^2 \cos(\alpha + \beta) \left(1 \pm \frac{ftg\beta}{\cos\alpha - \sin\alpha tg\beta} \right) \sin\omega t \mp g(f \cos\alpha - \sin\alpha). \quad (5)$$

Верхние знаки в этом уравнении соответствуют «скольжению частицы вперёд» (обгон плоскости, $\dot{x} > 0$), нижние – «скольжению частицы назад» (запаздывание от плоскости, $\dot{x} < 0$).

Для горизонтальной ($\alpha = 0^\circ$) плоскости уравнение (5) примет вид

$$\ddot{x} = A\omega^2 \cos\beta (1 \pm K_f) \sin\omega t \mp fg, \quad (6)$$

где $K_f = ftg$.

Из соотношений (3) и (4) следует, что нормальная реакция горизонтальной поверхности в любой момент времени положительна при выполнении условия

$$K_p = \frac{A^2 \sin\beta}{g} \leq 1$$

и частица, попавшая на виброповерхность с нулевой поперечной составляющей скорости ($\dot{y} = 0$), в дальнейшем остаётся на ней.

Безразмерный параметр K_p , представляющий собой отношение амплитудного значения вертикальной составляющей ускорения колеблющейся плоскости к ускорению силы тяжести, называется коэффициентом режима работы вибро-транспортной установки.

Если это неравенство не выполняется, то нормальная реакция $N(t)$ становится равной нулю и происходит отрыв частицы от грузонесущей поверхности (начало полёта). Момент отрыва t_o определяется уравнением

$$\sin \omega t_o = \frac{g}{A\omega^2 \sin \beta} = \frac{1}{K_p}.$$

Дифференциальные уравнения полёта частицы над плоскостью в подвижной системе координат XOY получаются из уравнения (1) при условии, что $N = 0$ и $F_{тр} = 0$.

$$\begin{cases} \ddot{x} = A\omega^2 \cos \beta \sin \omega t \\ \ddot{y} = A\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - g. \end{cases}$$

Так как движение частицы по колеблющейся плоскости без отрыва от неё может происходить лишь при $K_p < 1$, возможны следующие режимы её скольжения:

1. «Скольжение вперёд» и «скольжение назад» с двумя длительными остановками в каждом периоде.
2. «Скольжение вперёд» и «скольжение назад» с двумя мгновенными остановками в каждом периоде.
3. «Скольжение вперёд» и «скольжение назад» с одной длительной и с одной мгновенной остановками в каждом периоде.
4. Скольжение в одном направлении с одной длительной остановкой в каждом периоде.

При движении частицы по плоскости без подбрасывания скорость перемещения её и координата находятся интегрированием уравнения (6) при начальных условиях: $\dot{x}(t^*) = \dot{x}^*$; $x(t^*) = 0$.

$$\dot{x}(t) = -A\omega \cos(1 \pm K_f)(\cos \omega t_{\pm} - \cos \omega t^*) \mp fg(t_{\pm} - t^*) + \dot{x}^*,$$

$$x(t) = A\omega \cos \beta (1 \pm K_f) \cos \omega t^* (t_{\pm} - t^*) - A \cos \beta (1 \pm K_f) (\sin \omega t_{\pm} - \sin \omega t^*) \mp fg \frac{(t_{\pm} - t^*)^2}{2} + \dot{x}^*(t_{\pm} - t^*).$$

Принимая $\dot{x}^* = 0$ (начало скольжения), имеем

$$\dot{x}(t) = -A\omega \cos(1 \pm K_f)(\cos \omega t_{\pm} - \cos \omega t^*) \mp fg(t_{\pm} - t^*), \quad (7)$$

$$x(t) = A\omega \cos \beta (1 \pm K_f) \cos \omega t^* (t_{\pm} - t^*) - A \cos \beta (1 \pm K_f) (\sin \omega t_{\pm} - \sin \omega t^*) \mp fg \frac{(t_{\pm} - t^*)^2}{2}.$$

Момент смены режима движения определяются приравнением уравнения (7) к нулю:

$$\cos \omega t^* - \cos \omega t_{\pm} \mp \frac{K_f}{K_p(1 \pm K_f)} (\omega t_{\pm} - \omega t^*) = 0.$$

Обозначив через δ_{\pm} фазовый угол, соответствующий моменту начала скольжения частицы вперёд или назад, а через φ_{\pm} фазовый угол момента остановки после скольжения частицы и вводя параметр

$$z_{\pm} = \pm \frac{K_f}{K_p(1 \pm K_f)},$$

получим трансцендентное уравнение, определяющее момент смены этапа движения:

$$\cos \varphi_{\pm} - \cos \delta_{\pm} + z_{\pm} (\varphi_{\pm} - \delta_{\pm}) = 0. \quad (8)$$

Решая уравнение (8) графоаналитическим методом, определяется фазовый угол φ_{\pm} как абсцисса, ближайшая к точке пересечения прямой $k = \mp z_{\pm}$, проведённой из точки $(\delta_{\pm}, \cos \delta_{\pm})$ и косинусоиды $z = \cos \delta$ (рис. 2).

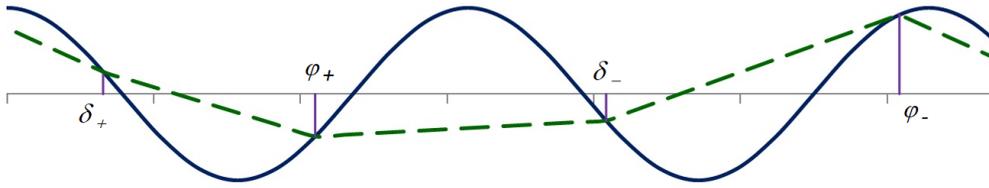


Рис. 2. Графическое определение фазовых углов смены этапа движения ($\beta = 8^\circ$; $f = 0,6$)

Применяя аппарат линейного программирования (рис. 3), можно получить аналитическое решение уравнения (8), и определить граничные параметры режима скольжения. Для 1-го режима скольжения моменты перехода от одного этапа к другому можно обозначить как t_{0+} , t_{+0} , t_{0-} и t_{-0} .

Углы начала скольжения вперёд и скольжения назад определяются из выражений:

$$\delta_+ = \arcsin z_+;$$

$$\delta_- = \begin{cases} \pi - \arcsin z_- & \text{при } \beta + \rho < \frac{\pi}{2} \\ \arcsin z_- & \text{при } \beta + \rho > \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

Фазовые углы смены режимов движения φ_{+0} и φ_{-0} определяются графоаналитическим способом.

Перемещение частицы на этапе скольжения вперёд ($\varphi_{+0} - \delta_+$):

$$S_+ = A \cos \beta (1 + K_f) \left[-z_+ + \right. \\ \left. + \left[\frac{(\varphi_{+0} - \delta_+)^2}{2} + (\varphi_{+0} - \delta_+) \cos \delta_+ - (\sin \varphi_{+0} - \sin \delta_+) \right] \right].$$

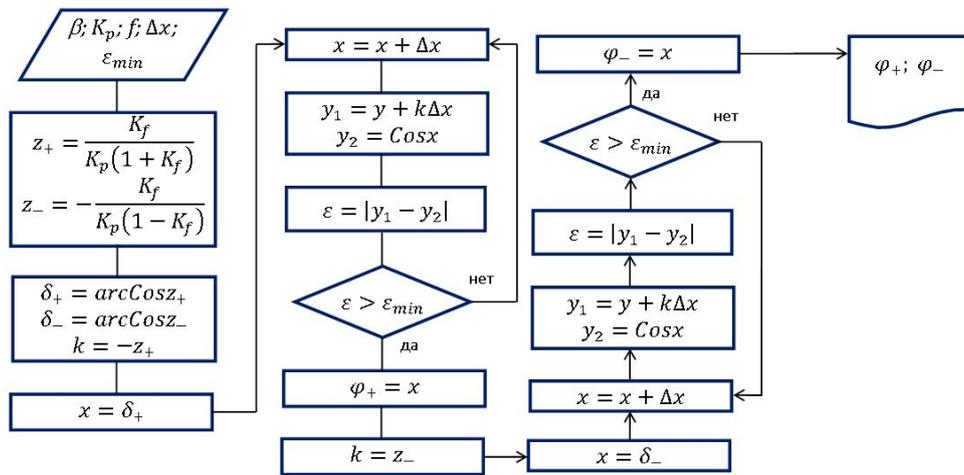


Рис. 3. Блок-схема расчёта фазовых углов

Перемещение частицы на этапе скольжения назад ($\varphi_{-0} - \delta_{-}$) будет равно

$$S_{-} = A \cos \beta (1 - K_f) \left[-z_{-} \frac{(\varphi_{-0} - \delta_{-})^2}{2} + (\varphi_{-0} - \delta_{-}) \cos \delta_{-} - (\sin \varphi_{-0} - \sin \delta_{-}) \right].$$

Средняя скорость движения за время одного периода

$$V_{cp} = \frac{S_{+} + S_{-}}{2\pi} \omega$$

или

$$V_{cp} = A \omega \cos \beta \frac{1}{2\pi} \left\{ (1 + K_f) \left[-z_{+} \frac{(\varphi_{+0} - \delta_{+})^2}{2} + (\varphi_{+0} - \delta_{+}) \cos \delta_{+} - (\sin \varphi_{+0} - \sin \delta_{+}) \right] + (1 - K_f) \left[-z_{-} \frac{(\varphi_{-0} - \delta_{-})^2}{2} + (\varphi_{-0} - \delta_{-}) \cos \delta_{-} - (\sin \varphi_{-0} - \sin \delta_{-}) \right] \right\}. \quad (9)$$

Вводя безразмерный коэффициент K_{zi} ($i = 1, 2, 3, 4$) передачи горизонтальной составляющей скорости, равный для 1-го режима работы

$$K_{z1} = \frac{\cos \beta}{2\pi} \left\{ (1 + K_f) \left[-z_{+} \frac{(\varphi_{+0} - \delta_{+})^2}{2} + (\varphi_{+0} - \delta_{+}) \cos \delta_{+} - (\sin \varphi_{+0} - \sin \delta_{+}) \right] + (1 - K_f) \left[-z_{-} \frac{(\varphi_{-0} - \delta_{-})^2}{2} + (\varphi_{-0} - \delta_{-}) \cos \delta_{-} - (\sin \varphi_{-0} - \sin \delta_{-}) \right] \right\}, \quad (10)$$

получим выражение для средней скорости частицы при i -м режиме скольжения

$$V_{cp_i} = A\omega K_{zi},$$

где i – режим скольжения частицы.

Для 2-го режима, переход от одного этапа движения к другому будет происходить в моменты времени t_{+-} и t_{-+} . Учитывая, что при 2-м режиме скольжения $\varphi_{+-} = \delta_{-+}$ и $\varphi_{-+} = \delta_{+-}$ фазовые углы смены этапов будут равны :

$$\begin{cases} \cos \varphi_{+-} = \cos \varphi_{-+} - (\varphi_{+-} - \varphi_{-+}) z_+ \\ \cos \varphi_{-+} = \cos \varphi_{+-} - (\varphi_{-+} - \varphi_{+-} + 2\pi) z_- \end{cases}$$

Решение этих уравнений для определения фазовых углов моментов перехода, будет иметь вид:

$$\begin{cases} \varphi_{+-} = \pi + \frac{\pi}{2}(1 + K_f) - \arcsin \psi \\ \varphi_{-+} = \frac{\pi}{2}(1 - K_f) - \arcsin \psi, \end{cases}$$

где

$$\psi = \frac{\pi K_f}{2 K_p} \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} K_f\right)}.$$

Перемещение частицы за этап скольжения вперёд $(\varphi_{+-} - \varphi_{-+})$ и назад $(\varphi_{-+} + 2\pi - \varphi_{+-})$ определится как

$$\begin{aligned} S_+ &= A \cos \beta (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+-} - \varphi_{-+})^2}{2} - \right. \\ &\quad \left. - (\varphi_{+-} - \varphi_{-+}) \cos \varphi_{-+} - (\sin \varphi_{+-} - \sin \varphi_{-+}) \right], \\ S_- &= A \cos \beta (1 - K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-+} + 2\pi - \varphi_{+-})^2}{2} - \right. \\ &\quad \left. - (\varphi_{-+} + 2\pi - \varphi_{+-}) \cos \varphi_{+-} - (\sin \varphi_{-+} - \sin \varphi_{+-}) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда коэффициент передачи горизонтальной (полезной) составляющей средней скорости K_{z2} в выражении (10) при 2-м режиме скольжения будет равен

$$\begin{aligned} K_{z2} &= \frac{\cos \beta}{2\pi} \left\{ (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+-} - \varphi_{-+})^2}{2} - (\varphi_{+-} - \varphi_{-+}) \cos \varphi_{-+} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (\sin \varphi_{+-} - \sin \varphi_{-+}) \right] + (1 - K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-+} + 2\pi - \varphi_{+-})^2}{2} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (\varphi_{-+} + 2\pi - \varphi_{+-}) \cos \varphi_{+-} - (\sin \varphi_{-+} - \sin \varphi_{+-}) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

При 3-м режиме скольжения, моментами перехода от одного этапа к другому будут t_{0+} , t_{+-} и t_{-0} . Угол начала скольжения вперёд после длительной остановки $\delta_{0+} = \omega t_{0+}$ и фазовые углы, соответствующие моментам перехода от скольжения вперёд к скольжению назад $\varphi_{+-} = \omega t_{+-}$ и от скольжения назад к длительной остановке $\varphi_{-0} = \omega t_{-0}$, определяется также, как и в 1-м режиме.

Выражение для суммарного перемещения частицы за этапы скольжения вперёд ($\varphi_{+-} - \delta_{0+}$) и назад ($\varphi_{-0} - \varphi_{+-}$) будет иметь вид

$$S = S_+ + S_- = A \cos \beta (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+-} - \delta_{0+})^2}{2} + (\varphi_{+-} - \delta_{0+}) \cos \delta_{0+} - (\sin \varphi_{+-} - \sin \delta_{0+}) \right] + A \cos \beta (1 - K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-0} - \varphi_{+-})^2}{2} + (\varphi_{-0} - \varphi_{+-}) \cos \varphi_{+-} - (\sin \varphi_{-0} - \sin \varphi_{+-}) \right]. \quad (13)$$

Тогда коэффициент передачи горизонтальной составляющей скорости в уравнении (10) запишется как

$$K_{z3} = \frac{\cos \beta}{2\pi} \left\{ (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+-} - \delta_{0+})^2}{2} - (\varphi_{+-} - \delta_{0+}) \cos \delta_{0+} - (\sin \varphi_{+-} - \sin \delta_{0+}) \right] + (1 - K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-0} - \varphi_{+-})^2}{2} - (\varphi_{-0} - \varphi_{+-}) \cos \varphi_{+-} - (\sin \varphi_{-0} - \sin \varphi_{+-}) \right] \right\}. \quad (14)$$

Моментами перехода в 4-м режиме будут t_{0+} и t_{+0} . Угол начала скольжения вперёд после длительной остановки и фазовый угол, соответствующий моменту перехода от скольжения вперёд к длительной остановке φ_{+0} , определяется так же как в 1-м и 3-м режиме.

Перемещение частицы на этапе скольжения вперёд ($\varphi_{+0} - \delta_{0+}$):

$$S_+ = A \cos \beta (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+0} - \delta_{0+})^2}{2} + (\varphi_{+0} - \delta_{0+}) \cos \delta_{0+} - (\sin \varphi_{+0} - \sin \delta_{0+}) \right]. \quad (15)$$

Для коэффициента передачи горизонтальной составляющей скорости в уравнении (10) будем иметь:

$$K_{z4} = \frac{\cos \beta}{2\pi} (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+0} - \delta_{0+})^2}{2} - (\varphi_{+0} - \delta_{0+}) \cos \delta_{0+} - (\sin \varphi_{+0} - \sin \delta_{0+}) \right]. \quad (16)$$

В конкретных случаях при решении практических задач для определения степени влияния коэффициента трения и угла вибрации на эффективность вибротранспортирования целесообразно вычислить все возможные значения K_z и построить графики изменения K_z в зависимости от коэффициента трения при заданных значениях коэффициента режима работы и угла вибрации β .

Для построения графиков зависимости коэффициента передачи горизонтальной составляющей K_z при ограничениях, задаваемых коэффициентом режима работы K_p , при определённых значениях угла вибрации и при изменении коэффициента трения f нужно задаться последовательно величиной $K_p = [0,2; 1,0]$ с шагом 0,1 и, при постоянном значении угла вибрации β , выяснить режим движения. Затем по формулам (9), (11), (13) и (15) вычисляются значения K_z при различных значениях коэффициента трения.

Пользуясь этими графиками, легко можно оценить эффективность вибротранспортирования и вычислить скорость виброперемещения при заданных значениях A , ω , β , K_p и известном коэффициенте трения скольжения транспортируемого груза по формуле (10), где значение K_z берётся из соответствующего графика.

При построении графиков зависимости $K = F(f)$ при постоянном значении коэффициента режима работы вычисления достаточно произвести для одного угла вибрации. Для этого находятся условия, при которых коэффициент передачи скорости, определяемый равенствами (10), (12), (14) и (16), будет постоянным при неизменном значении коэффициента режима работы и переменном угле вибраций.

Анализ выражений (10), (12), (14) и (16) показывает, что коэффициент передачи скорости будет постоянным при неизменной величине коэффициента режима работы и изменяющемся угле вибраций лишь при условии

$$ftg\beta = const. \quad (17)$$

Таким образом, зная значение коэффициента передачи скорости для одного угла вибрации β , легко найти по равенству (17) значение коэффициента трения f при другом угле вибрации, которому соответствует такое же значение K_z при неизменном значении коэффициента режима работы.

Анализ полученных данных для значений коэффициента передачи горизонтальной составляющей скорости вибраций показывает, что в режимах движения «без подбрасывания» коэффициент трения материала о грузонесущую поверхность рабочего органа и угол вибраций оказывают существенное влияние на эффективность вибротранспортирования. Коэффициент передачи горизонтальной составляющей скорости вибраций при постоянном значении коэффициента режима работы сначала возрастает с увеличением коэффициента трения, достигая максимума при определённом соотношении коэффициента трения и угла вибраций, а затем плавно снижается.

Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе параметров вибротранспортирующей установки и подбирать такие соотношения между коэффициентом режима работы и параметром $ftg\beta$, которые обеспечат максимальное значение коэффициента передачи скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. М. : Машиностроение, 1968. 362 с.
2. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. М. : Высшая школа, 1977. 255 с.
3. Гончаревич И.Ф., Гудушаури Э.Г., Гаврилина Л.В. Модернизация транспортно-перегрузочной техники методами вибротехнологий // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 2. С. 9–14.
4. Тропман А.Г., Бельков Н.И., Макеева Ю.Н. Вибрационные конвейеры для транспортирования горячих материалов. М. : Машиностроение, 1972. 327 с.
5. Гончаревич И.Ф. Динамика вибрационного транспортирования. М. : Наука, 1972. 244 с.
6. Бельков Н.И. Исследование закономерностей и особенностей вибрационного перемещения тонкоизмельченных сыпучих материалов: дис. канд. техн. наук. Л., 1974. 178 с.
7. Локтионова О.Г. Динамика вибрационных технологических процессов и машин для переработки неоднородных гранулированных сред: дисс. д-ра техн. наук. Курск, 2008. 238 с.
8. Леонтьева А.И., Брянкин К.В., Дегтярев А.А., Орехов В.С. Моделирование и расчёт процесса сушки термолабильных материалов в виброаэрокипящем слое: монография. Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. 80 с.
9. Бабичев А.П. Технологическое применение колебаний или ... вибрационные технологии // Вестник ДГТУ. 2005. Т. 5, № 3. С. 1–11.
10. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной техники и технологии. М. : 1981. 320 с.
11. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой. М. : Наука, 1972. 340 с.
12. Архипенко В.П. Механико-технологические основы создания вибрационных машин для бункеризации, выпуска и контейнерной обработки: дисс. д-ра техн. наук. Днепропетровск, 1996. 346 с.
13. Гончаревич И.Ф. Вибрация – нестандартный путь: вибрация в природе и технике. М. : Наука, 1986. 209 с.
14. Силин А.Н. Обоснование параметров и разработка вибрационного выпускающего устройства с маятниковой подвеской для сыпучих материалов: дисс. канд. техн. наук. М., 1993. 182 с.
15. Архипенко А.В. Активные бункерные вибростенки: дис. канд. техн. наук. Белгород, 1999. 143 с.
16. Лютов В.Н. Обоснование параметров и разработка вибропитателей с криволинейным профилем рабочего органа для выпуска сыпучих материалов из бункеров: дисс. канд. техн. наук. М., 1990. 170 с.

**CONSERVATION OF THE SOIL PARTICLES BY THE WORKING ORGANS
OF THE VIBROMACHINE****A.V. Arhipenko**

Ph.D. (Eng.), e-mail: iten-miu@mail.ru

International Innovation University, Sochi, Russia

Abstract. It is shown that in the modes of motion "without tossing" the coefficient of friction of the material on the load-carrying surface of the working body and the angle of vibrations have a significant impact on the efficiency of vibrotransportation. The transfer coefficient of the horizontal component of the vibration velocity at a constant the value of the operating mode coefficient first increases with an increase in the friction coefficient, reaching a maximum at a certain ratio of the coefficient of friction and the angle of vibration, and then gradually decreases.

Keywords: sliding particles, soil, vibrators, vibrotransportation.

Дата поступления в редакцию: 25.01.2023