

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ В ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ВИБРАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ**

Кандидат техн. наук **Архипенко А.В.**
(Сочинский Международный инновационный университет)

Доктор техн. наук, профессор **Лозовецкий В.В.**
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал.
Сочинский международный инновационный университет)

**EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL MODELING OF THE MOVEMENT
OF A GRANULAR MEDIUM IN TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL
VIBRATION INSTALLATIONS.**

Ph. D. (Tech.) **Archipenko A.V.**
(Sochi International Innovative University)

Doctor (Tech.), Professor **Lozovetsky V.V.**
(Moscow State Technical University named after N. Bauman,
Mytishchi Branch. Sochi International Innovative University)

Абразивный мелкодисперсный материал, вибрационная установка, транспортно-технологическая машина, коэффициент трения, вибрация, скорость.

Abrasive finely dispersed material, vibration unit, transport and technological machine, coefficient of friction, vibration, speed.

Представлена модель движения абразивных мелкодисперсных материалов в транспортно-подающих и транспортно-технологических машинах в условиях режима движения с подбрасыванием, при котором перемещаемая сыпучая среда периодически теряет контакт с несущим её органом. На характер процесса значительное влияние оказывает соотношение сил трения и сил инерции, действующих на транспортируемый в условиях вибрации материал, проявляющееся через нормальную реакцию слоя груза на рабочую поверхность. Экспериментально определены значения коэффициента трения при движении сыпучего материала вдоль наклонной поверхности в условиях стеснённого движения при скольжении. Выявлено влияние коэффициента трения и угла вибрации на эффективность транспортировки сыпучего материала при скользящем режиме и в условиях движения с подбрасыванием. Получены зависимости скорости виброперемещения частицы материала от параметров вибрации в этих режимах для различных этапов движения. Предложены рекомендации, обеспечивающие оптимальный режим движения сыпучей среды в транспортирующих виброустановках.

A model of the movement of abrasive fine materials in transport-feeding and transport-technological machines under the conditions of a motion with a toss, in which the moving bulk medium periodically loses contact with the body carrying it, is presented. The nature of the process is significantly influenced by the ratio of friction and inertial forces acting on the material transported under vibration conditions, which manifests itself through the normal reaction of the load layer to the working surface. The values of the coefficient of friction were experimentally determined for the movement of bulk material along an inclined surface under conditions of constrained movement during sliding. The influence of the coefficient of friction and the angle of vibration on the efficiency of transportation of bulk material in sliding mode and in conditions of motion with tossing was revealed. The dependences of the speed of vibration displacement of a material particle on the vibration parameters in these modes for various stages of motion are obtained. Recommendations are proposed that ensure the optimal mode of movement of a granular medium in transporting vibratory installations.

В технологических линиях многих производств широко используются ленточные, пластинчатые, скребковые, шнековые конвейеры и питатели, имеющие, несмотря на массовое их применение, ряд недостатков, особенно проявляющихся при транспортировании абразивных мелкодисперсных материалов. На технологические и санитарно-гигиенические показатели производственных процессов негативным образом сказывается сильный износ движущихся частей исполнительных механизмов, значительные потери транспортируемых продуктов в виде пыли и газов, выделение агрессивных газов у нагретых сыпучих материалов и др.

В связи с этим в последнее время все более широко проводятся изыскания в области создания эффективных транспортирующих, транспортно-подающих и транспортно-технологических машин, использующих принцип вибрационного транспортирования [1]. Это обусловлено:

- возможностью использования герметичных грузонесущих органов для транспортирования газо- и пылеобразующих продуктов;
- возможностью транспортирования горячих (до 800°С) материалов [2];

– простотой включения в автоматизированные технологические линии [2];

– сравнительно невысокими затратами на содержание и ремонт; низкой энергоемкостью и возможностью совмещения транспортирования материала с различными технологическими операциями, такими как охлаждение, нагрев, сушка, возгонка, грохочение, обезживание и т. п. [3 – 5].

Вибротранспортирующие машины способны заменить такие традиционные виды непрерывного транспорта, как пластинчатые, скребковые, винтовые, ковшовые конвейеры, а при транспортировании горячих сыпучих материалов – и ленточные. Ограничиваться это может только налипанием пылевидных материалов на рабочие органы машин при угле подъема рабочего органа более 5° .

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

Анализ исследований [2, 3, 6] показал, что коэффициент режима работы K_p вибротранспортирующих машин, определяющий их динамическую грузоподъемность, редко доходит до трех. В большинстве случаев, он равен $1,5 \dots 2,6$, а в некоторых случаях даже $0,8 \dots 1,5$ [3, 6]. Увеличение коэффициента режима работы ведет к повышенному шуму при эксплуатации и снижению надежности узлов установок.

Вибрационные питатели с малой длиной виброповерхности можно эксплуатировать при $K_p \leq 70$, при этом движение груза осуществляется по более сложным законам. Дисперсно-динамическая картина в вибрационных транспортно-технологических машинах (сушилки, охладители и т.п.), использующих дополнительную фильтрацию жидкости или воздуха через слой, по своей природе такая же как и в вибротранспортирующих.

В общем случае, при вибротранспортировке реализуется либо безотрывный режим движения, либо режим движения с подбрасыванием, когда груз периодически теряет контакт с грузонесущим органом. На характер процесса значительное влияние оказывает соотношение сил трения и сил инерции вибротранспортируемого материала, проявляющееся через нормальную реакцию слоя груза на рабочую поверхность. При движении виброповерхности из нейтрального положения вверх и вперед силы трения уменьшаются, а силы инерции увеличиваются и, как только силы инерции превьсят силы трения, частицы материала начинают перемещаться по виброповерхности. Когда амплитудное значение вертикальной составляющей ускорения виброповерхности превьсит ускорение силы тяжести, частица материала от нее отрывается и совершает полет по параболе.

Наклонная плоскость с находящейся на ней частицей с массой m совершает прямолинейные гармонические колебания в направлении, образующем угол β с плоскостью, с амплитудой A и частотой ω по закону $S = ASint$.

Угол направления колебаний, называемый углом вибраций, лежит в пределах

$$0 < \beta < \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

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

Уравнения движения частицы относительно плоскости в проекциях на подвижные оси координат будут иметь вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mA^2 Cos\beta Sint + F_{тр} \\ m\ddot{y} = mA^2 Sin\beta Sint - mg + N \end{cases} \quad (2)$$

При движении частицы по вибрирующей плоскости координата y равна нулю, а сила трения $F_{тр}$ определяется соотношениями

$$F_{тр} = \begin{cases} -fN \text{ при } \dot{x} > 0 \\ +fN \text{ при } \dot{x} < 0 \\ f_1 N \text{ при } \dot{x} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

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

Нормальная реакция $N = N(t)$ определяется по второму уравнению (2)

$$N = mg - mA^2 Sin\beta Sint \quad (4)$$

Частица остается на вибрирующей плоскости при положительной нормальной реакции, то есть

$$\frac{g}{A^2 Sin\beta} > Sint \quad (5)$$

При относительном покое частицы на вибрирующей плоскости (т.е. при $\dot{x} = 0$ и $\dot{y} = 0$) сила сухого трения $F_{мп} = F_0$ определяется первым уравнением (2):

$$F_0 = F_0(t) = mA\omega^2 Cos\beta Sint \quad (6)$$

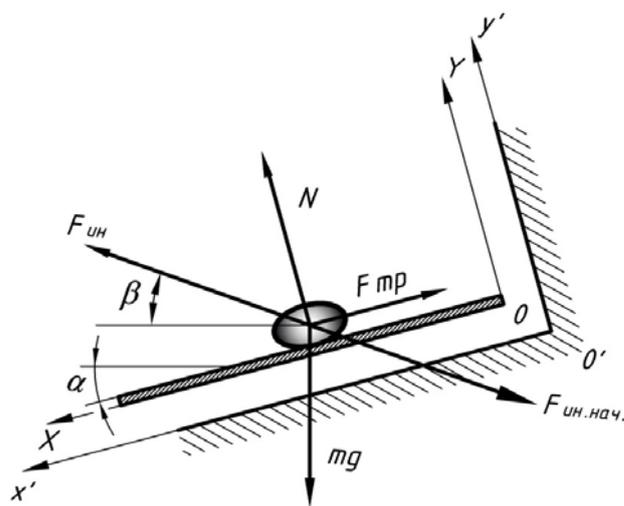


Рис. 1. Схема действия сил на частицу насыпного груза:
 α – угол наклона грузонесущей поверхности;
 β – угол вибрации; mg – сила тяжести;
 N – нормальная реакция грузонесущей поверхности;
 $F_{ин}$ – сила инерции; $F_{ин.нач}$ – сила инерции в начальный момент времени; XOY – система отсчета, связанная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

Частица остается в состоянии относительного покоя на плоскости при условии, что сила трения F_0 не пре-

восходит по абсолютной величине предельного значения силы статического трения $F_{max} = f_1 N$. Это условие может быть представлено в виде неравенства

$$-f_1 N(t) < F_0(t) < f_1 N(t) \quad (7)$$

После ряда преобразований с использованием первого уравнения в выражении (2), уравнения для силы трения (3) и выражения (4) получим уравнение движения частицы по горизонтальной плоскости, совершающей прямолинейные гармонические колебания

$$\ddot{x} = A\omega^2 \cos\beta (1 \pm \operatorname{tg}\beta \operatorname{tg}\rho) \sin\omega t \mp \operatorname{tg}\rho, \quad (8)$$

где $\rho = \operatorname{arctg}f$ – угол трения скольжения.

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

Уравнение (8) применительно только к скольжению частицы по плоскости, т.е. для фрагментов движения «скольжение частицы вперед» и «скольжение частицы назад».

Из соотношений (4) и (5) следует, что нормальная реакция в любой момент времени положительна при выполнении условия

$$K_p = \frac{A^2 \sin\beta}{g} \leq 1, \quad (9)$$

и частица, попавшая на вибрирующую плоскость с нулевой поперечной составляющей скорости ($\dot{y} = 0$), в дальнейшем остается на плоскости.

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

Если неравенство (9) не выполняется, то нормальная реакция $N(t)$ равна нулю, и происходит отрыв частицы от грузонесущей поверхности (начало полета). Момент отрыва t_0 определяется уравнением

$$\sin\omega t_0 = \frac{g}{A\omega^2 \sin\beta} = \frac{1}{K_p} \quad (10)$$

Дифференциальные уравнения полета частицы над плоскостью в подвижной системе координат XOY получаются из (2) при условии, что $N = 0$ и $F_{тр} = 0$:

$$\begin{cases} \ddot{x} = A\omega^2 \cos\beta \sin\omega t \\ \ddot{y} = A\omega^2 \sin\beta \sin\omega t - g \end{cases} \quad (11)$$

Так как движение частицы по колеблющейся плоскости без отрыва от нее может происходить лишь при $K_p < 1$, возможны следующие режимы ее движения частицы с периодом $T = \frac{2\pi}{\omega} T_0$:

1 - «скольжение вперед» и «скольжение назад» с двумя длительными остановками в каждом периоде;

2 - «скольжение вперед» и «скольжение назад» с двумя мгновенными остановками в каждом периоде;

3 - «скольжение вперед» 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.

Для 1-го режима, при движении частицы по плоскости без подбрасывания, скорость перемещения ее и координата находятся интегрированием уравнения (8) при начальных условиях: $\dot{x}(t^*) = \dot{x}^*$; $x(t^*) = 0$ (верхний знак «скольжение вперед», нижний – «скольжение назад»).

$$\dot{x}(t) = -A\omega \cos\beta (1 \pm \operatorname{tg}\beta \operatorname{tg}\rho)$$

$$(\cos\omega t - \cos\omega t^*) \mp \operatorname{tg}\rho (t - t^*) + \dot{x}^* \quad (12)$$

$$\begin{aligned} x(t) = & -A\omega \cos\beta (1 \pm \operatorname{tg}\beta \operatorname{tg}\rho) \cos\omega t^* (t - t^*) - \\ & - A\cos\beta (1 \pm \operatorname{tg}\beta \operatorname{tg}\rho) (\sin\omega t - \sin\omega t^*) \mp \\ & \mp \operatorname{tg}\rho \frac{(t - t^*)^2}{2} \dot{x}^* (t - t^*) \end{aligned} \quad (13)$$

Момент смены режима движения определяются приравниванием нулю уравнения (12):

$$\begin{aligned} \cos\omega t^* - \cos\omega t_{\pm} \mp \frac{\operatorname{tg}\beta \operatorname{tg}\rho}{K_p (1 \pm \operatorname{tg}\beta \operatorname{tg}\rho)} (\omega t_{\pm} - \omega t^*) + \\ + \frac{\dot{x}^*}{A\omega \cos\beta (1 \pm \operatorname{tg}\beta \operatorname{tg}\rho)} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Обозначив через $\delta_+ = \omega t_+^*$ и $\delta_- = \omega t_-^*$ фазовые углы, соответствующие моментам начала скольжения частицы вперед и назад, а через $\varphi_+ = \omega t_+$ и $\varphi_- = \omega t_-$ фазовые углы моментов остановки после скольжения частицы вперед и назад и вводя обозначения

$$K_f = \operatorname{tg}\beta \operatorname{tg}\rho; \quad z_+ = \frac{K_f}{K_p (1 + K_f)}; \quad z_- = -\frac{K_f}{K_p (1 - K_f)};$$

$$\xi_* = \frac{\dot{x}^*}{A\omega \cos\beta}; \quad a_+ = \xi_* \frac{1}{1 + K_f}; \quad a_- = \xi_* \frac{1}{1 - K_f},$$

получим трансцендентное уравнение, определяющее моменты смены режимов движения

$$\cos\varphi_{\pm} = \cos\delta_{\pm} - z_{\pm} (\varphi_{\pm} - \delta_{\pm}) + a_{\pm} \quad (15)$$

Решение уравнения (15) с помощью графика функции $z = \cos\delta$ позволяет определить величину φ_{\pm} .

Перемещение и средняя скорость движения частицы определяются для режимов движения без подбрасывания.

Моменты перехода одного этапа движения к другому обозначим как t_{0+} , t_{+0} , t_{0-} и t_{-0} . Углы начала скольжения вперед и скольжения назад определяются из выражений:

$$\delta_+ = \operatorname{arcsin} z_+;$$

$$\delta_- = \begin{cases} \pi - \operatorname{arcsin} z_- \text{ при } \beta + \rho < \frac{\pi}{2} \\ \operatorname{arcsin} z_- \text{ при } \beta + \rho > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (16)$$

Фазовые углы смены режимов движения $\varphi_{\pm 0}$ и φ_{-0} определяются графоаналитическим способом.

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

$$S_+ = ACos\beta(1+K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+0} - \delta_+)^2}{2} + (\varphi_{+0} - \delta_+)Cos\delta_+ - (Sin\varphi_{+0} - Sin\delta_+) \right] \quad (17)$$

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

$$S_- = ACos\beta(1-K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-0} - \delta_-)^2}{2} + (\varphi_{-0} - \delta_-)Cos\delta_- - (Sin\varphi_{-0} - Sin\delta_-) \right] \quad (18)$$

Полный путь частицы за время одного периода

$$S_T = S_+ + S_- \quad (19)$$

Средняя скорость движения

$$V_{cp} = \frac{S_T}{2\pi} \omega \quad (20)$$

После подстановки в уравнение (20) всех входящих в него выражений получим следующее выражение:

$$V_{cp} = A\omega Cos\beta \frac{1}{2\pi} \left\{ (1+K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+0} - \delta_+)^2}{2} + (\varphi_{+0} - \delta_+)Cos\delta_+ - (Sin\varphi_{+0} - Sin\delta_+) \right] + (1-K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-0} - \delta_-)^2}{2} + (\varphi_{-0} - \delta_-)Cos\delta_- - (Sin\varphi_{-0} - Sin\delta_-) \right] \right\} \quad (21)$$

Обозначим

$$K_z = \frac{1}{2\pi} \left\{ (1+K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+0} - \delta_+)^2}{2} + (\varphi_{+0} - \delta_+)Cos\delta_+ - (Sin\varphi_{+0} - Sin\delta_+) \right] + (1-K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-0} - \delta_-)^2}{2} + (\varphi_{-0} - \delta_-)Cos\delta_- - (Sin\varphi_{-0} - Sin\delta_-) \right] \right\} \quad (22)$$

и подставим выражение (22) в уравнение (21). Уравнение для средней скорости частицы примет вид

$$V_{cp} = A\omega K_z Cos\beta, \quad (23)$$

где $K_z = K_1$ – безразмерный коэффициент передачи горизонтальной составляющей скорости при 1-м режиме работы.

Для 2-го режима переход от одного этапа движения к другому будет происходить в моменты времени t_{+} и t_{-} . Им будут соответствовать фазовые углы:

$$\begin{cases} Cos\varphi_{+-} = Cos\varphi_{-+} - (\varphi_{+-} - \varphi_{-+})z_+ \\ Cos\varphi_{-+} = Cos\varphi_{+-} - (\varphi_{-+} - \varphi_{+-} + 2\pi)z_- \end{cases} \quad (24)$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{+-} = \pi + \frac{\pi}{2}(1+K_f) - arcSin\psi \\ \varphi_{-+} = \frac{\pi}{2}(1-K_f) - arcSin\psi \end{cases}, \quad (25)$$

где

$$\psi = \frac{\pi K_f}{2 K_p} \frac{1}{Sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} K_f\right)} \quad (26)$$

Перемещение частицы за этап скольжения вперед ($\varphi_{+-} - \varphi_{-+}$) определяются как

$$S_+ = ACos\beta(1+K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+-} - \varphi_{-+})^2}{2} - (\varphi_{+-} - \varphi_{-+})Cos\varphi_{+-} - (Sin\varphi_{+-} - Sin\varphi_{-+}) \right] \quad (27)$$

Перемещение частицы за этап скольжения назад ($\varphi_{-+} + 2\pi - \varphi_{+-}$) при 2-м режиме составит:

$$S_- = ACos\beta(1-K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-+} + 2\pi - \varphi_{+-})^2}{2} - (\varphi_{-+} + 2\pi - \varphi_{+-})Cos\varphi_{-+} - (Sin\varphi_{-+} - Sin\varphi_{+-}) \right] \quad (28)$$

Тогда выражение для средней скорости движения частицы, при 2-м режиме, также может быть представлено в виде уравнения (23), но K_z в этом случае будет равен

$$K_z = K_2 = \frac{1}{2\pi} \left\{ (1+K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{\pm} - \varphi_{\mp})^2}{2} - (\varphi_{\pm} - \varphi_{\mp})Cos\varphi_{\mp} - (Sin\varphi_{\pm} - Sin\varphi_{\mp}) \right] + (1-K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{+} + 2\pi - \varphi_{-})^2}{2} - (\varphi_{+} + 2\pi - \varphi_{-})Cos\varphi_{-} - (Sin\varphi_{+} - Sin\varphi_{-}) \right] \right\} \quad (29)$$

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

Выражения для перемещения частицы за этапы скольжения вперед ($\varphi_{+-} - \delta_+$) и назад ($\varphi_{-0} - \varphi_{+-}$) будут иметь вид:

$$S_+ = A \cos \beta (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+-} - \delta_+)^2}{2} + (\varphi_{+-} - \delta_+) \cos \delta_+ - (\sin \varphi_{+-} - \sin \delta_+) \right]; \quad (30)$$

$$S_- = A \cos \beta (1 - K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-0} - \varphi_{+-})^2}{2} + (\varphi_{-0} - \varphi_{+-}) \cos \varphi_{+-} - (\sin \varphi_{-0} - \sin \varphi_{+-}) \right]. \quad (31)$$

Тогда выражение для коэффициента передачи горизонтальной составляющей скорости в уравнении (23) запишется:

$$K_z = K_3 = \frac{1}{2\pi} \left\{ (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{\pm} - \delta_+)^2}{2} - (\varphi_{\pm} - \delta_+) \cos \delta_+ - (\sin \varphi_{\pm} - \sin \delta_+) \right] + (1 - K_f) \left[-z_- \frac{(\varphi_{-0} - \varphi_{+-})^2}{2} - (\varphi_{-0} - \varphi_{+-}) \cos \varphi_{+-} - (\sin \varphi_{-0} - \sin \varphi_{+-}) \right] \right\} \quad (32)$$

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

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

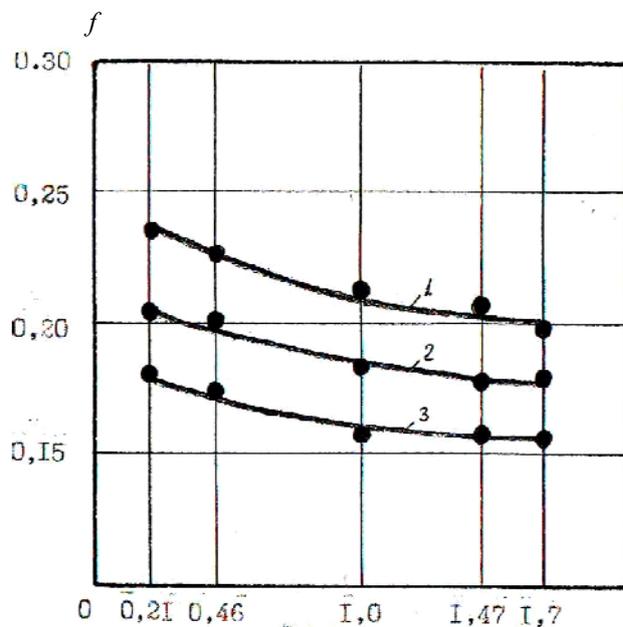
$$S_+ = A \cos \beta (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+0} - \delta_+)^2}{2} + (\varphi_{+0} - \delta_+) \cos \delta_+ - (\sin \varphi_{+0} - \sin \delta_+) \right] \quad (33)$$

Для коэффициента передачи горизонтальной составляющей скорости в уравнении (23) будем иметь:

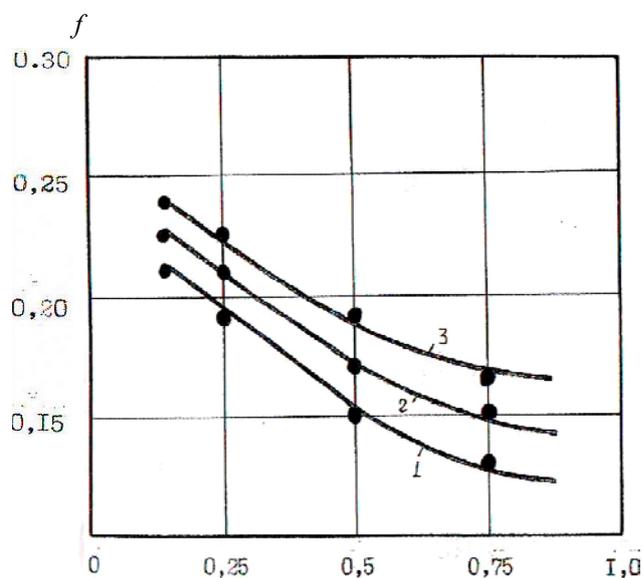
$$K_z = K_4 = \frac{1}{2\pi} \left\{ (1 + K_f) \left[-z_+ \frac{(\varphi_{+0} - \delta_+)^2}{2} - (\varphi_{+0} - \delta_+) \cos \delta_+ - (\sin \varphi_{+0} - \sin \delta_+) \right] \right\} \quad (34)$$

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

Коэффициент трения скольжения является величиной, влияющей на процесс движения сыпучей среды, и явился объектом экспериментального исследования для абразивного мелкодисперсного материала, движущегося вдоль наклонной поверхности (рис. 1). Для опытов отбиралась представительная проба элементов порядка (3000±10000), что соответствует условиям представительности по ГОСТ 17495-72 "Методы отбора и подготовки проб для определения физико-механических характеристик насыпных материалов".



a)



б)

Рис. 2. Изменение коэффициента внешнего трения f в зависимости от:

a – фракционного состава при температуре:
1 – 100°С; 2 – 140°С; 3 – 180°С,

б – нормального давления (МПа) для фракционного состава:
1 – 10/7; 2 – 7/5; 3 – 3/2

На рис. 2 и в табл. 1 приведены результаты экспериментального исследования коэффициента трения f о стальную стенку модельной установки при различной её влажности.

Исследования проводились при среднем значении пористости ε около стенки, равном $\varepsilon = 0,34$, и при изменении влажности сыпучей среды от 0 до 60%. Результаты экспериментальных исследований коэффициента трения f представлены на рис. 3, из которого следует, что он зависит от влажности, с увеличением которой он уменьшается.

Таблица 1

**Результаты экспериментального исследования
коэффициента трения $d_{жк} = (10,61 \div 13,18)$
при различной влажности $W\%$**

$W, \%$	$P, \text{Н}$	$\bar{P}_1, \text{Н}$	$\bar{P}_2, \text{Н}$	$\bar{S}_1, \text{Н}$	$\bar{S}_2, \text{Н}$	f_-
0	12,0	8,0	4,0	5,1	2,77	0,58
0	18,0	12,0	6,0	7,3	3,7	0,60
20	12,0	8,0	4,0	4,06	2,1	0,49
20	18,0	12,0	6,0	5,17	2,7	0,50
40	12,0	8,0	4,0	2,98	1,5	0,37
40	18,0	12,0	6,0	4,55	2,3	0,375
60	12,0	8,0	4,0	2,02	1,1	0,23
60	18,0	12,0	6,0	2,75	1,25	0,25

Аппроксимацию этой зависимости предлагается выполнить в виде алгебраического полинома 3-й степени:

$$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d,$$

где a, b, c, d – коэффициенты полинома; x – влажность материала засыпки, %; y – коэффициент трения.

Подбор значений коэффициентов с помощью процедуры Левенберга-Маккардта в среде MathCad-14 дает для функций коэффициента внешнего трения от влажности следующие выражения:

$$f = 3,78 \cdot 10^{-7} W^3 - 5,75 \cdot 10^{-5} W^2 - 0,0037W + 0,59.$$

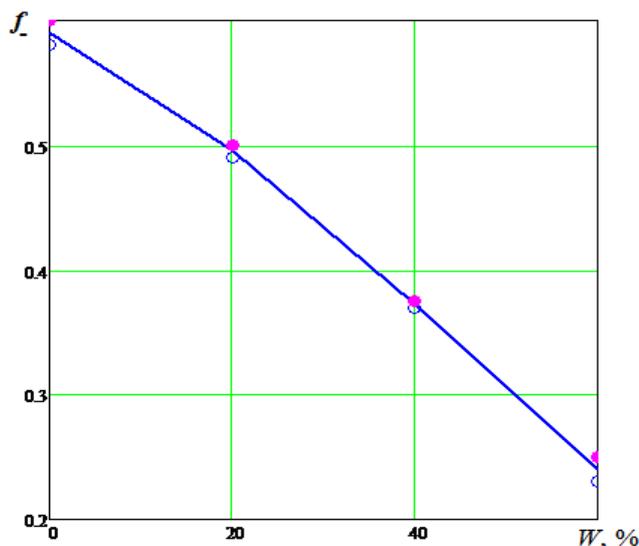


Рис. 3. Зависимость коэффициента f от влажности частиц при $d_{жк} = (10,61 \div 13,18)$ мм: о – опытные точки для уплотняющей нагрузки $P = 12$ Н; ● – опытные точки для уплотняющей нагрузки $P = 18$ Н; — – расчёт по зависимости

По формулам (22, 29, 32 и 34) строятся зависимости коэффициента передачи горизонтальной составляющей скорости K_z при ограниченных значениях вертикальной составляющей ускорения, задаваемых коэффициентом режима работы $K_p = [0,2; 1,0]$ с шагом 0,1, при значениях угла вибрации $\beta = [15^\circ; 30^\circ]$ с шагом 5° .

Пользуясь этими графиками, легко можно оценить эффективность вибротранспортировки и вычислить скорость виброперемещения при заданных значениях A, ω, β, K_p и известном коэффициенте трения сколь-

жения транспортируемого груза по формуле (23), где значение K_z берется из соответствующего графика.

При построении графиков зависимости $K = F(f)$, при постоянном значении коэффициента режима работы, вычисления достаточно произвести для одного угла вибрации, например $\beta = 30^\circ$. Для этого находятся условия, при которых коэффициент передачи скорости, определяемый равенствами (22, 29, 32, 34), будет постоянным при неизменном значении коэффициента режима работы и переменном угле вибраций.

Анализ указанных выражений показывает, что коэффициент передачи скорости будет постоянным при неизменной величине коэффициента режима работы и изменяющемся угле вибраций лишь при условии

$$\operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \rho = \operatorname{const} \quad (35)$$

Таким образом, зная значение коэффициента передачи скорости для одного угла вибрации β , легко найти по равенству (35) значение коэффициента трения ($\operatorname{tg} \rho_2$) при другом угле вибрации β_2 , которому соответствует такое же значение K_z при $K_p = \operatorname{const}$.

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 определенном 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 $\operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \rho$, которые обеспечат максимальное значение коэффициента передачи скорости.

Выводы

1. Выявлено влияние коэффициента трения и угла вибрации на эффективность вибротранспортирования сыпучего материала.
2. Получены зависимости скорости виброперемещения частицы материала от параметров вибрации в режиме подбрасывания и в скользящем режиме для различных этапов движения.
3. Предложены рекомендации по определению степени влияния коэффициента трения и угла вибрации на эффективность вибротранспортировки.

Список принятых обозначений

A – амплитуда вибрации;

$a_+ = \xi_* \frac{1}{1 + K_f}$ – безразмерный коэффициент;

$a_- = \xi_* \frac{1}{1 - K_f}$ – безразмерный коэффициент;

f – коэффициент трения скольжения;

f_1 – коэффициент трения покоя;

$F_{ин}$ – сила инерции;

$F_{ин.нач}$ – сила инерции в начальный момент времени;
 $F_{тр}$ – сила сухого трения, действующая на частицу материала;
 F_0 – сила трения при в относительном покое;
 g – ускорение свободного падения;
 K_p – коэффициент режима работы вибротранспортирующей установки;
 $K_f = tg \beta tg \rho$ – безразмерный коэффициент;
 K_z – безразмерный коэффициент передачи горизонтальной составляющей скорости, равный для 1,2,3, и 4-го режимов работы, соответственно, K_1, K_2, K_3 и K_4 ;
 m – масса частицы материала;
 N – нормальная реакция грузонесущей поверхности;
 P – сила тяжести, действующая на частицу материала;
 S – перемещение наклонной плоскости;
 S_+ перемещение частицы на этапе скольжения вперед;
 S_- перемещение частицы на этапе скольжения назад;
 S_T – полный путь частицы за время одного периода;
 t – мгновенное время;
 t_0 – момент отрыва частицы от грузонесущей плоскости;
 t_{0+}, t_{+0}, t_{0-} и t_{-0} – моменты перехода одного этапа движения к другому;
 T – период движения частицы;
 V_{cp} – средняя скорость движения частицы;
 \dot{x}, \dot{y} проекции скорости вибрации на оси координат;
 \ddot{x}, \ddot{y} проекции ускорения вибрации на оси координат;
 XOY – система отсчета, связанная с грузонесущей поверхностью;
 $X'O'Y'$ – абсолютная система отсчета;
 $\dot{x}(t^*) = \dot{x}^*$ – ускорение частицы при движении «без подбрасывания» в начальный момент времени t^* ;
 $z_+ = \frac{K_f}{K_p(1+K_f)}$ – безразмерный коэффициент;
 $z_- = -\frac{K_f}{K_p(1-K_f)}$ – безразмерный коэффициент;
 α – угол наклона грузонесущей поверхности;
 β – угол вибраций;
 $\delta_+ = \omega t_+^*$ и $\delta_- = \omega t_-^*$ – фазовые углы, соответствующие моментам начала скольжения частицы «вперед» и «назад» относительно грузонесущей поверхности;
 $\xi_* = \frac{\dot{x}^*}{A\omega \cos \beta}$ – безразмерный коэффициент;
 ρ – угол трения скольжения;
 $\varphi_+ = \omega t_+$ и $\varphi_- = \omega t_-$ фазовые углы моментов остановки после скольжения частицы «вперед» и «назад»;
 $\psi = \frac{\pi K_f}{2 K_p} \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} K_f\right)}$ – безразмерный коэффициент;
 ω – частота вибрации.

Литература

1. Гончаревич И.Ф., Гудушаури Э.Г., Гаврилина Л.В. Модернизация транспортно-перегрузочной техники методами вибротехнологий // Машиностроение и инженерное образование. – 2014. - №2.
2. Тропман А.Г., Бельков Н.И., Макеева Ю.Н. Вибрационные конвейеры для транспортирования горячих материалов. - М., «Машиностроение», 1972.
3. Бельков Н.И. Исследование закономерностей и особенностей вибрационного перемещения тонкоизмельченных сыпучих материалов. Дисс. канд. техн. наук. - Ленинград, - 1974. - 178 с.
4. Моделирование и расчёт процесса сушки термолабильных материалов в виброаэрокипящем слое: монография / А.И. Леонтьев, К.В. Брянкин, А.А. Дегтярев, В.С. Орехов – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 80 с.
5. Бабичев А.П. Технологическое применение колебаний или вибрационные технологии // Вестник ДГТУ, Ростов-на-Дону. - 2005. - Т.5. - №3(25).
6. Архипенко В.П. Механико-технологические основы создания вибрационных машин для бункеризации, выпуска и контейнерной обработки. Дисс. докт. техн. наук.- Днепропетровск, 1996.
7. Силин А.Н. Обоснование параметров и разработка вибрационного выпускающего устройства с маятниковой подвеской для сыпучих материалов. Дисс. канд. техн. наук. - М., 1993.
8. Архипенко А.В. Активные бункерные вибростенки. Дисс. канд. техн. наук. - Белгород, 1999.
9. 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.

Сведения об авторах

Архипенко Андрей Валентинович, кандидат технических наук, Сочинский международный инновационный университет,
 354000, Краснодарский край, гор. Сочи, ул. Орджоникидзе, 10 "А".

Тел.: +7(967)643-58-83

E-mail: andrei-arhipenko@mail.ru.

Лозовецкий Вячеслав Владимирович, д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана,
 Мытищи 5, ул. 1-ая Институтская, д. 1.
 Тел. 8-915-347-48-00
 E-mail: lozovetsky@mail.ru.