

УДК 622.648:533.6:531.3+534

С.Н. Пономаренко, канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ОТРЫВА ЧАСТИЦ ГОРНОЙ
ПОРОДЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ВИБРОЛОТКА В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ
ВИБРОАЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ**

С.М. Пономаренко, канд. техн. наук
(ИГТМ НАН України)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ВІДРИВУ ЧАСТОК ГІРСЬКОЇ
ПОРОДИ ВІД ПОВЕРХНІ ВІБРОЛОТКА В ПОЛІ ДІЇ
ВІБРОАЕРОДИНАМІЧНИХ СИЛ**

S.N. Ponomarenko, Ph.D. (Tech.)
(IGTM, NAS of Ukraine)

**RESEARCH OF SPEED OF THE ROCK PARTICLE SEPARATION
FROM THE SURFACE OF VIBRATING TRAYS IN ZONE
OF VIBRO-AERODYNAMIC FORCE ACTION**

Аннотация. Статья направлена на получение новых зависимостей для определения скорости отрыва материальной частицы от поверхности вибrolотка в поле действия вибрационных и аэродинамических сил. Математическая модель движения материальной частицы по наклонной вибрирующей поверхности построена с использованием основных положений классической механики, аэродинамики и теории вибрационного перемещения. Определены характерные особенности перемещения частиц горной породы при виброаэродинамическом способе ее загрузки в пневмотранспортную установку с кольцевым эжектором. В статье предложен новый метод описания процесса отрыва материальной частицы от наклонной вибрирующей поверхности эжектируемым из атмосферы потоком воздуха. Получены соотношения для определения величины и направления скорости отрыва частиц породы от поверхности вибrolотка в зависимости от характера действия вибрационных и аэродинамических сил. Учет аэродинамических свойств частиц породы и конструктивных характеристик вибrolотка приводит к повышению точности модели перемещения породы в вибропневмотранспортных установках. Полученные результаты могут быть применены при расчете и проектировании пневматических закладочных установок с кольцевым эжектором для технологий горного производства.

Ключевые слова: скорость отрыва, вибrolоток, виброаэродинамические силы.

Основной проблемой, сдерживающей широкое промышленное применение трубопроводных пневмотранспортных систем, является значительный удельный расход воздуха, который необходим для обеспечения требуемых производительности и дальности транспортирования. В связи с этим возникает необходимость более досконального исследования взаимосвязи основных технических и технологических параметров пневмотранспортирования.

В первую очередь это относится к характеристикам транспортируемого материала, параметрам подаваемого сжатого воздуха и конструктивным параметрам пневмотранспортной установки.

К основным технологическим параметрам трубопроводных пневмотранспортных установок относятся дальность транспортирования, удельный расход воздуха на перемещение единицы массы или объема транспортируемого материала, а также скорость движения аэросмеси. В качестве характеристик аэросмеси, транспортируемой трубопроводными пневматическими установками, принято рассматривать основные параметры воздушной фазы (плотность и скорость) и твердой фазы аэросмеси (плотность, максимальный диаметр частицы и ее сферичность, а также скорость транспортирования).

Анализ последних достижений в области трубопроводного пневмотранспорта насыпных грузов показывает, что пневмотранспортные установки эжекторного типа могут успешно применяться для транспортирования различного рода сыпучих материалов. Эти установки позволяют эффективно решать различные технологические задачи во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. На горнодобывающих предприятиях закладочные установки эжекторного типа применяются при ведении горных работ с закладкой породой выработанного пространства шахт [1 – 3].

Существующие методы расчета пневмотранспортных установок сориентированы в основном на исследования перемещения аэросмеси по транспортному трубопроводу заданной длины без учета особенностей подачи в трубопровод сжатого воздуха. Наиболее полно вопросы пневмотранспортирования сыпучих материалов рассмотрены в работах [1, 2]. Однако процесс пневмотранспортирования горной породы закладочными установками эжекторного типа имеет свои характерные особенности, которые требуют отдельного подхода к их рассмотрению. Специфика этого процесса, прежде всего, заключается в следующем [1, 3]:

- в наличии эжектируемого из атмосферы потока аэросмеси, состоящей из атмосферного воздуха и загружаемой в установку породы;
- в присутствии в начале транспортного трубопровода (в зоне смешивания эжекторного устройства) трех фаз аэросмеси: эжектирующего потока сжатого воздуха и эжектируемых потоков воздуха и частиц твердого материала;
- в неоднородности фракционного состава пневмотранспортируемой твердой фазы.

Проблема исследования процессов движения сыпучих материалов, включая горные породы, в вибропневмотранспортных трубопроводных системах с применением вибрации и эжектирования воздуха из атмосферы находится на стыке двух крупных научных направлений: вибрационной техники и газодинамики дисперсных сред. На современном этапе развития науки и техники эти процессы, сочетающие в себе особенности поведения сыпучего материала, подверженного непрерывному аэродинамическому и периодическому вибрационному воздействию, не описываются полностью в рамках классических подходов к

проблемам вибропневмотранспорта. Недостаточность разработки теории движения аэросмесей в транспортном трубопроводе в поле действия виброаэродинамических сил не позволяет реализовать на практике передовые идеи по совершенствованию существующих и созданию новых конструкций вибропневмотранспортных трубопроводных систем эжекторного типа.

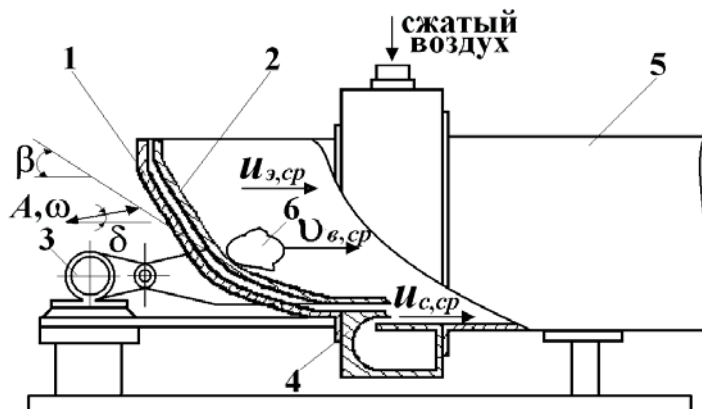
В настоящее время достаточно полно исследованы некоторые прикладные задачи транспортирования сыпучего материала при совместном воздействии на него энергии сжатого воздуха и вибрации. При этом были получены зависимости, которые носят частный эмпирический характер вследствие сложности описания исследуемых механических процессов.

Наиболее полно в Украине, в ближнем и дальнем зарубежье разработаны математические модели транспортирования сыпучего материала в виде материальной частицы, которые адекватны процессу перемещения крупных кусков материала. Однако процесс транспортирования горной породы трубопроводными системами эжекторного типа имеет свои характерные особенности, которые требуют отдельного подхода к их рассмотрению. Вместе с тем поведение сыпучего материала при движении частиц на загрузочно-разгонном участке вибропневмотранспортных трубопроводных систем эжекторного типа, а также механизм смешивания аэросмеси в смесительной зоне кольцевого эжектора изучены недостаточно.

Целью данной работы является получение зависимости для определения скорости отрыва частиц транспортируемого материала от поверхности загрузочного лотка в поле действия виброаэродинамических сил. Актуальность этого вопроса обусловлена необходимостью более точного определения пропускной способности загрузочной зоны пневмотранспортной трубопроводной системы и производительности вибропневмотранспортирования перемещаемого этой системой материала в целом.

Характерной особенностью процесса загрузки породы в вибропневмотранспортную машину (ВПМ) с кольцевым эжектором, принципиальная схема которой представлена на рис. 1, является наличие в загрузочной зоне этой системы комплексного виброаэродинамического воздействия, создаваемого вибрирующим загрузочным лотком и эжектируемым из атмосферы воздушным потоком. По физической сущности в рассматриваемой зоне присутствуют три фазы аэросмеси (см. рис. 1):

- эжектирующего потока сжатого воздуха, вытекающего из кольцевой щели эжекторного устройства со скоростью $u_{c,cp}$, м/с;
- эжектируемого из атмосферы со скоростью $u_{э,cp}$, м/с потока воздуха;
- частиц твердого материала, скорость виброперемещения которых $v_{в,cp}$, м/с.



1 – загрузочный бункер; 2 – вибrolоток; 3 – эксцентриковый вибропривод;
4 – кольцевой эжектор; 5 – транспортный трубопровод; 6 – частица породы
Рисунок 1 – Принципиальная схема ВПМ с кольцевым эжектором

Параметры процесса перемещения горной породы по вибrolотку пневмотранспортной трубопроводной системы определяются гранулометрическим составом загружаемой породы, ее объемным весом, воздухопроницаемостью, взаимодействием частиц породы между собой, высотой слоя материала на поверхности лотка, законом колебаний вибрирующего загрузочного органа и ряда других факторов.

Аналитический учет всех вышеперечисленных факторов в известных непрерывных моделях вибротранспортирования достаточно сложен и практически не реализуем. Поэтому рассмотрим движение единичной частицы горной породы в загрузочной зоне вибропневмотранспортной системы с кольцевым эжектором при следующих допущениях:

- форма и упругие свойства материальной частицы не учитываются;
- вибrolоток рассматривается как абсолютно жесткое тело с шероховатой рабочей поверхностью;
- действие аэродинамической силы направлено вдоль поверхности вибrolотка, при этом силы Сафмена, которая проявляется лишь для очень мелких частиц, и Магнуса – Жуковского, зависящая от угловой скорости частиц, не учитываются.

На единичную частицу горной породы, движущуюся под действием виброаэродинамических сил по наклонному вибrolотку, действует (см. рис. 2):

- аэродинамическая сила F_{μ} , Н;
- квазиупругая сила F_{ϵ} со стороны вибrolотка, совершающего гармонические колебания, Н;
- сила тяжести F_g , Н;
- сила нормальной реакции со стороны вибrolотка N , Н;
- сила трения $F_{тр}$, Н.

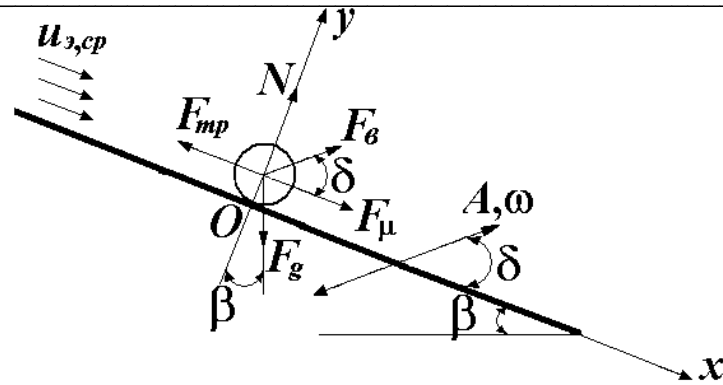


Рисунок 2 – Расчетная схема движения частицы горной породы в загрузочной зоне вибропневмотранспортной системы с кольцевым эжектором

Дифференциальные уравнения движения материальной частицы в подвижной системе координат xOy , жестко связанной с колеблющейся поверхностью лотка вибропневмотранспортной системы и с началом отсчета в точке касания частицы и лотка, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= F_{\mu} + F_6 \cos\delta - F_g \sin\beta - F_{mp}; \\ m\ddot{y} &= F_6 \sin\delta - F_g \cos\beta + N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где m – масса частицы горной породы, кг; x – текущая координата центра масс частицы, м; y – текущая координата поверхности материальной частицы, м.

Рассматриваемые в системе уравнений (1) силы F_{μ} , F_6 , F_g и F_{mp} соответственно равны:

$$F_{\mu} = c_{\mu} S_m \rho_{\text{э}} (u_{\text{э,ср}} - \dot{x})^2 / 2; \quad (2)$$

$$F_6 = mA\omega^2 \cos\omega t; \quad (3)$$

$$F_g = mg; \quad F_{mp} = f_{mp} N, \quad (4)$$

где c_{μ} – коэффициент аэродинамического сопротивления; S_m – площадь миделя частицы породы, м^2 ; $\rho_{\text{э}}$ – объемная плотность эжектируемого воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; $u_{\text{э,ср}}$ – осредненная по площади скорость эжектируемого потока воздуха, $\text{м}/\text{с}$; A – амплитуда колебаний вибрлотка, м; ω – частота колебаний вибрлотка, Гц ; t – время, с; g – ускорение силы тяжести $\text{м}/\text{с}^2$; f_{mp} – коэффициент трения скольжения.

Как показано в работе по машинам непрерывного транспорта авторов Р.Л. Зенкова, И.И. Ивашкова и Л.Н. Колобова коэффициент трения скольжения равен $f_{mp} = \text{tg } \varphi_{\text{в}}$, где $\varphi_{\text{в}}$ – угол внешнего трения породы о поверхность вибрлотка ВПМ, град. Значение этого коэффициента, обычно, определяется эксперимен-

тально. Согласно данным, приведенным в работе по транспортным машинам и комплексам подземных разработок авторов В.Н. Григорьева, В.А. Дьякова и Ю.С. Пухова, значение этого коэффициента может находиться в диапазоне от 0,2 до 1,4 в зависимости от вида транспортируемой породы и материала поверхности вибролотка.

В то же время для каждого конкретного случая существует критическое значение угла φ_v , которое определяет характер передвижения породы по неподвижной поверхности лотка вибропневмотранспортной системы (при отсутствии воздействия виброаэродинамических сил). В зависимости от соотношения угла φ_v и угла наклона лотка к горизонту β , град. (см. рис. 1 и рис. 2) при отсутствии действия виброаэродинамических сил порода покоится на лотке ($\varphi_v > \beta$), покоится или равномерно скатывается ($\varphi_v < \beta$) или скатывается равноускоренно ($\varphi_v < \beta$).

Для материальной частицы, находящейся на поверхности вибролотка ($x = 0$ и $y = 0$), с учетом равенств (2) – (4) из второго уравнения системы (1) получим выражение для определения нормальной реакции вибролотка, а из первого – для силы трения:

$$N = m(g \cos \beta - A \omega^2 \cos \omega t \sin \delta); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_{mp} &= c_{\mu} S_m \rho_{\text{э,сп}} u_{\text{э,сп}}^2 / 2 + mA \omega^2 \cos \omega t \cos \delta - mg \sin \beta = \\ &= f_{mp} N = f_{mp} m (g \cos \beta - A \omega^2 \cos \omega t \sin \delta), \end{aligned} \quad (6)$$

где δ – угол направления линии вектора вибрации, град. (см. рис. 1 и рис. 2).

В начальный момент времени $t = 0$ равенства (5) и (6) будут иметь вид

$$N = m(g \cos \beta - A \omega^2 \sin \delta); \quad (7)$$

$$F_{mp} = c_{\mu} S_m \rho_{\text{э,сп}} u_{\text{э,сп}}^2 / 2 + mA \omega^2 \cos \delta - mg \sin \beta = f_{mp} m (g \cos \beta - A \omega^2 \sin \delta). \quad (8)$$

Анализ зависимостей (5) – (8) показывает, что:

– уменьшению силы нормальной реакции со стороны вибролотка вибропневмотранспортной системы способствует увеличение инерционной силы, обусловленной действием вибрации;

– увеличению силы трения способствует суммарное действие силы эжектируемого из атмосферы воздуха и силы инерции при снижении ее значения за счет угла наклона вибролотка;

– в начальный момент времени численное значение силы нормальной реакции и силы трения с учетом действия вибрационной силы меньше значений этих сил, полученных для наклонной плоскости.

В последующий момент времени $t > 0$ скорость частицы увеличивается, а давление частицы на вибролоток уменьшается $N \rightarrow 0$. В этот момент времени

частица, оторвавшись от поверхности вибрлотка, совершает микрополет в направлении транспортирования. В момент отрыва ($t = t_0$ и $N = 0$) наступает равновесие действующих на частицу сил в проекции на ось Oy . Тогда из равенства (5), рассматриваемого для $t = t_0$, с учетом соотношения (3) следует:

$$mg \cos \beta = mA \omega^2 \cos \omega t_0 \sin \delta; \quad (9)$$

$$\cos \omega t_0 = g \cos \beta / A \omega^2 \sin \delta = 1 / \Gamma. \quad (10)$$

Значение $\cos \omega t_0$ или его обратная величина Γ , которая в вибротехнике называется коэффициентом режима, характеризует режим работы вибрлотка вибропневмотранспортной системы, а его величина ωt_0 представляет собой фазовый угол начала отрыва. При этом, как следует из равенства (10), вибрлоток вибропневмотранспортной системы с кольцевым эжектором должен работать в режиме $\Gamma \geq 1$. Режимы транспортирования насыпных материалов, в том числе горной породы, в зависимости от значений коэффициента режима подробно рассмотрены в работе [2].

В то же время для момента отрыва частицы от поверхности вибрлотка ($t = t_0$ и $F_{mp} = 0$) из равенства (6) имеем:

$$c_{\mu} S_{\mu} \rho_{\varepsilon} u_{\varepsilon, cp}^2 / 2 + mA \omega^2 \cos \omega t_0 \cos \delta = mg \sin \beta \quad (11)$$

или с учетом равенства (10)

$$c_{\mu} S_{\mu} \rho_{\varepsilon} u_{\varepsilon, cp}^2 / 2 + mA \omega^2 \cos \delta / \Gamma = mg \sin \beta. \quad (12)$$

Таким образом, в момент отрыва частицы от поверхности вибрлотка сила веса этой частицы в проекциях на оси выбранной системы координат уравнивается:

– в вертикальном направлении квазиупругой силой действия вибрации (равенство (9));

– в горизонтальном направлении суммарным действием виброаэродинамических сил (равенство (11)).

Полученные закономерности справедливы, как следует из равенства (10), при значениях угла $\beta < 90^0$ и $\delta \neq 0$. В то же время, решая совместно уравнения (9) и (11), получим:

$$c_{\mu} S_{\mu} \rho_{\varepsilon} u_{\varepsilon, cp}^2 / 2 = mg (\sin \beta - \cos \beta \operatorname{ctg} \delta). \quad (13)$$

Как видно из полученного равенства, в момент отрыва аэродинамическая сила, действующая вдоль поверхности вибрирующей наклонной поверхности вибрлотка, уравнивается разностью проекций силы веса и ее инерционной составляющей, обусловленной действием вибрации.

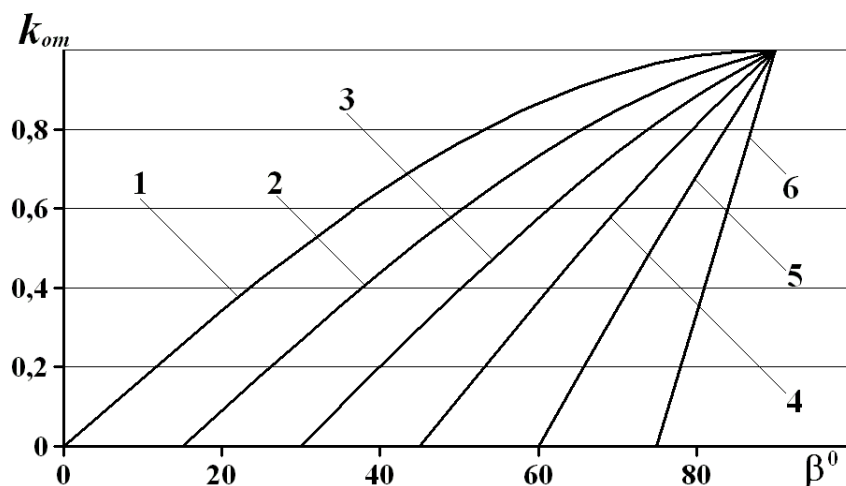
Разделив обе части соотношения (13) на mg , получим:

$$c_{\mu} S_{\mu} \rho_{\text{э,сп}} u_{\text{э,сп}}^2 / (2mg) = \sin\beta - \cos\beta \operatorname{ctg}\delta = k_{om} \geq 0, \quad (14)$$

где k_{om} – коэффициент отрыва эжектируемым из атмосферы потоком воздуха частиц горной породы от поверхности вибрлотка вибропневмотранспортной системы с кольцевым эжектором.

В момент отрыва эжектируемым из атмосферы потоком воздуха частиц горной породы от поверхности вибрлотка вибропневмотранспортной системы с кольцевым эжектором $k_{om} \rightarrow 1$. По физическому смыслу этот коэффициент аналогичен показателю взвешенности, который подробно проанализирован в работе по пневмотранспортированию сыпучих материалов [2].

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента отрыва эжектируемым из атмосферы потоком воздуха материальной частицы от поверхности вибрлотка от угла наклона вибрлотка, построенные по формуле (14) для различных значений угла действия вектора вибрации. Анализ построенных зависимостей показывает следующую закономерность – с уменьшением величины угла наклона вибрлотка к горизонту, необходимо увеличивать величину угла действия вектора вибрации. При этом, в случае выполнения с вертикальной вибрирующей поверхностью ($\beta = 90^0$), материальная частица на этой поверхности не задерживается и зависает в эжектируемом из атмосферы потоке воздуха ($k_{om} = 1$).



1– угол $\delta = 90^0$; 2– угол $\delta = 75^0$; 3– угол $\delta = 60^0$; 4– угол $\delta = 45^0$;
5– угол $\delta = 30^0$; 6– угол $\delta = 15^0$

Рисунок 3 – Зависимость коэффициента отрыва эжектируемым из атмосферы потоком воздуха частиц горной породы от поверхности вибрлотка от угла наклона вибрлотка

При анализе приведенных на рис. 3 зависимостей было установлено:

– зависимость коэффициента отрыва материальной частицы, движущейся по поверхности вибрлотка в потоке эжектируемого из атмосферы воздуха, от угла наклона вибрлотка имеет вид полинома 3-ей степени (коэффициенты аппроксимации линий тренда $R^2 = 1$);

– коэффициенты кубического уравнения аппроксимирующей кривой определяются углом действия вектора вибрации и эти зависимости аппроксимиру-

ются также кубическими уравнениями (коэффициенты аппроксимации линий тренда $R^2 \approx 1$).

С учетом равенств (2) – (6) система уравнений (1) будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= c_{\mu} S_m \rho_{\vartheta} (u_{\vartheta, cp} - \dot{x})^2 / (2m) + A\omega^2 (\cos\delta + f_{mp} \sin\delta) \cos\omega t - g (\sin\beta + f \cos\beta) \\ \ddot{y} &= A\omega^2 (\cos\delta - \sin\delta) \cos\omega t + (g - 1) \cos\beta \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

В теории вибротранспортирования допускается скорость перемещения материальной частицы принимать равной скорости перемещения вибрлотка, совершающим гармонические колебания. В этом случае из равенства (3) следует, что $\dot{x} = A\omega \sin\omega t$. Таким образом, первое уравнение системы (15) можно представить в виде

$$\ddot{x} = a_x (u_{\vartheta, cp} - b_x \sin\omega t)^2 + c_x \cos\omega t + d_x, \quad (16)$$

где

$$a_x = c_{\mu} S_m \rho_{\vartheta} / (2m); \quad b_x = A\omega; \quad c_x = A\omega^2 (\cos\delta + f_{mp} \sin\delta); \quad d_x = -g (\sin\beta + f_{mp} \cos\beta)$$

Проинтегрировав последнее равенство в пределах от начальных условий (при $t = 0$ $\dot{x} = 0$) до момента отрыва частицы от поверхности вибрлотка (при $t = t_0$ $\dot{x} = v_{0,x}$, где $v_{0,x}$ – проекция скорости отрыва частицы на ось Ox), получим:

$$\dot{x}|_0^{v_{0,x}} = \left[\frac{2u_{\vartheta, cp} a_x b_x}{\omega} \cos\omega t + \frac{a_x b_x^2}{\omega} \left(\frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\omega t \right) + \frac{c_x}{\omega} \sin\omega t + (a_x u_{\vartheta, cp}^2 + d_x) t \right] \Big|_0^{t_0} + C,$$

где C – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий и, с учетом принятых выше обозначений, равная $C = -2u_{\vartheta, cp} a_x b_x / \omega = -2u_{\vartheta, cp} a_x A$.

Таким образом, скорость отрыва частицы от поверхности вибрлотка в проекции на ось Ox будет равна:

$$\begin{aligned} v_{0,x} &= \frac{2u_{\vartheta, cp} a_x b_x}{\omega} \cos\omega t_0 + \frac{a_x b_x^2}{\omega} \left(\frac{\omega t_0}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\omega t_0 \right) + \\ &+ \frac{c_x}{\omega} \sin\omega t_0 + (a_x u_{\vartheta, cp}^2 + d_x) t_0 - 4u_{\vartheta, cp} a_x A. \end{aligned} \quad (17)$$

Принимая $S_m = \pi d^2 / 4$ и $m = \pi d^3 \rho_m / 6$, где d – эквивалентный диаметр частицы, м², а ρ_m – объемная плотность породы, кг/м³, с учетом равенства (10) и обозначений равенства (16), зависимость (17) можно представить в виде:

$$v_{0,x} = K_1 u_{\varepsilon, cp} \frac{A}{\Gamma} + \frac{K_1 A^2 \omega}{2} \left(\Phi - \frac{\sqrt{\Gamma^2 - 1}}{\Gamma^2} \right) + K_2 A \omega \frac{\sqrt{\Gamma^2 - 1}}{\Gamma} + K_3 \frac{\Phi}{\omega} - 2K_1 u_{\varepsilon, cp} A, \quad (18)$$

где $K_1 = \frac{3c_{\mu} \rho_{\varepsilon}}{2d \rho_m}$ – характеристика аэродинамических свойств транспортируемой

породы, отнесенная к единице эквивалентного диаметра ее единичной частицы;

$\Phi = \omega t_0 = \arccos\left(\frac{1}{\Gamma}\right)$ – фазовый угол начала отрыва единичной частицы;

$K_2 = \cos\delta + f_{mp} \sin\delta$ – угловая характеристика направления отрыва единичной

частицы с учетом трения скольжения; $K_3 = \frac{K_1 u_{\varepsilon, cp}^2}{2} - g(\sin\beta + f_{mp} \cos\beta)$ – аэро-

динамическая характеристика полета единичной частицы с учетом направления эжектирования.

Проинтегрировав второе уравнение системы (15) в пределах от начальных условий (при $t = 0$ $\dot{y} = 0$) до момента отрыва частицы от поверхности вибрлотка (при $t = t_0$ $\dot{y} = v_{0,y}$, где $v_{0,y}$ – проекция скорости отрыва частицы на ось Oy), получим:

$$\dot{y}|_0^{v_{0,y}} = \left[A\omega(\cos\delta - \sin\delta)\sin\omega t + t(g - 1)\cos\beta \right] \Big|_0^{t_0}.$$

В этом равенстве постоянная интегрирования равна нулю, что следует из принятых начальных условий. С учетом принятых выше обозначений и равенства (10) проекция скорости отрыва частицы от поверхности вибрлотка на ось Oy будет равна:

$$v_{0,y} = A\omega(\cos\delta - \sin\delta)\sqrt{1 - \frac{1}{\Gamma^2}} + \frac{\Phi}{\omega}(g - 1)\cos\beta. \quad (19)$$

Зная проекции скорости отрыва частицы от поверхности вибрлотка вибропневмотранспортной системы, можно найти ее модуль и направление по формулам

$$|v_0| = \sqrt{v_{0,x}^2 + v_{0,y}^2}; \quad \alpha_x = \arccos(v_{0,x}/|v_0|); \quad \alpha_y = \arccos(v_{0,y}/|v_0|), \quad (20)$$

где v_0 – скорость отрыва частицы, м/с; α_x – угол между вектором скорости отрыва и осью Ox , град.; α_y – угол между вектором скорости отрыва и осью Oy , град.

Необходимо отметить, что в теории вибротранспортирования довольно часто применяется известная как формула В. А. Баумана следующая формула:

$$v_{\text{ср}} = (k_1 - k_2 \sin \beta) A \omega \cos \delta \sqrt{1 - \Gamma^{-2}}, \quad (21)$$

где $v_{\text{ср}}$ – осредненная скорость вибротранспортирования породы вибрототком, м/с; k_1 и k_2 – эмпирические коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств перемещаемого материала

Равенство (21) обычно применяется при нахождении средней скорости вибротранспортирования слоя насыпного материала. Численные значения скорости перемещения единичной частицы и скорости слоя материала могут различаться в силу самой специфики процесса их транспортирования.

В таблице 1 приведены результаты расчета скоростей отрыва частицы от поверхности вибрототка и средней скорости вибротранспортирования слоя материала в зависимости от конкретных режимов работы вибрототка.

Таблица 1 – Расчетные значения скорости отрыва частицы от поверхности вибрототка в зависимости от режима его работы

№ п/п	Режим работы вибрототка ВПМ						Скорость, м/с			
	A, мм	ω , Гц	δ , град	β , град	Γ	Φ	$v_{0,x}$	$v_{0,y}$	$ v_0 $	$v_{\text{ср}}$
1	6	60	30	5	1,05	0,44	0,13	0,12	0,18	0,12
2	8				1,47	0,83	0,32	0,25	0,41	0,28
3	10				1,84	1,00	0,49	0,33	0,59	0,40
4	12				2,21	1,10	0,64	0,40	0,75	0,51
5	14				2,58	1,17	0,79	0,45	0,91	0,62
6	16				2,95	1,23	0,94	0,51	1,07	0,72
7	6	80	30	5	1,97	1,03	0,40	0,26	0,48	0,33
8		100			3,1	1,2	0,60	0,32	0,68	0,45
9	6	60	45	5	1,56	0,87	0,22	0,13	0,26	0,18
10			60		1,91	1,02	0,21	0,04	0,22	0,14
11			75		2,14	1,08	0,16	-0,07	0,17	0,08
12	6	60	30	15	1,14	0,50	0,13	0,13	0,19	0,09
13				30	1,27	0,67	0,15	0,17	0,23	0,03
14				45	1,56	0,97	0,16	0,19	0,25	-0,05
15				60	2,20	1,09	0,17	0,20	0,27	-0,13
16				70	3,20	1,26	0,18	0,19	0,26	-0,18

Расчеты выполнены для следующих исходных данных: $1 < \Gamma \leq 3,2$; $0 \leq u_{\text{э,ср}} \leq 10$ м/с; $\rho_s = 1,2$ кг/м³; $\rho_m = 2200$ кг/м³; $d = 0,08$ м; $c_\mu = 0,5$; $f_{mp} = 0,7$; $g = 9,81$ м/с²; $k_1 = 1,08$ и $k_2 = 1,8$. В качестве базовых параметров, определяющих режим работы вибрототка, приняты значения $A=0,006$ м; $\omega=60$ Гц; $\delta = 30^\circ$ и $\beta = 5^\circ$.

Анализ результатов расчета, приведенных в таблице 1, с учетом соотношения (14) и условия $v_{0,y} \geq 0$ (которое необходимо для отрыва частицы от поверхности вибрототка) позволяет говорить о следующих закономерностях виброаэродинамической загрузки породы в вибропневмотранспортную систему с кольцевым эжектором:

– проекция скорости отрыва от поверхности вибротка единичной частицы на ось Ox положительна, что свидетельствует о том, что частица при исследуемых режимах работы вибротка всегда смещается вниз;

– численное значение модуля скорости отрыва от поверхности вибротка единичной частицы насыпного материала и ее проекций на ось Ox превышают значения скорости транспортирования слоя этого материала. Совпадение численных значений проекции скорости отрыва на ось Oy и скорости транспортирования слоя материала возможно при $\Gamma \rightarrow 1$;

– наличие эжектируемого потока воздуха оказывает существенное влияние лишь при достаточно высоких скоростях этого потока, что возможно по мере приближения к концу зоны смешения кольцевого эжектора;

– максимальная эффективность работы вибротка достигается при высокоамплитудном и низкочастотном режиме его работы с углами $\beta \rightarrow 0$ и $\delta = 30^\circ$.

В таблице 2 приведены результаты расчета значений углов наклона вектором скорости отрыва частицы к координатным осям для исследуемых выше параметров при $A=0,006$ м; $\omega=60$ Гц.

Таблица 2 – Расчетные значения углов наклона векторов скорости отрыва частицы к координатным осям

β , град	$\delta = 30^\circ$		$\delta = 45^\circ$		$\delta = 60^\circ$		$\delta = 75^\circ$	
	α_x , град	α_y , град	α_x , град	α_y , град	α_x , град	α_y , град	α_x , град	α_y , град
5	43	47	30	60	10	80	23	113
15	45	45	32	58	10	80	28	118
30	48	42	34	56	8	82	41	130
45	49	41	34	56	1	89	56	146
60	49	41	29	61	14	104	67	157
75	45	45	18	72	31	121	72	162

Анализ расчетных данных, приведенных в таблице 2, показывает:

– направление скорости отрыва материальной частицы от поверхности вибротка вибропневмотранспортной системы с кольцевым эжектором не совпадает с направлением действия вибрации;

– при угле $\delta \geq 60^\circ$ направление скорости отрыва материальной частицы от поверхности вибротка приближается к нормали к этой поверхности и меняет свое направление при $\beta > 45^\circ$;

– рациональное значение режимных углов составляет $\beta \rightarrow 0$ и $30^\circ \leq \delta \leq 45^\circ$.

В работах [1, 3] рассмотрены особенности физической картины эжектирования воздуха из атмосферы в вибропневмотранспортной системе с кольцевым эжектором. Учитывая эти особенности, можно утверждать, что в верхней части грузочного бункера оборудования данного типа (см. рис. 1) скорость эжектируемого потока воздуха имеет незначительные значения. В этом случае первым, вторым и пятым слагаемыми в формуле (18) можно пренебречь в виду малости их порядка по сравнению с другими слагаемыми. Тогда равенство (18) будет иметь более простой вид:

$$v_{0,x} = K_2 A \omega \frac{\sqrt{\Gamma^2 - 1}}{\Gamma} + K_3 \frac{\Phi}{\omega},$$

которое, совместно с зависимостями (19) и (20), вполне приемлемо для инженерного расчета скорости отрыва материальной частицы от поверхности лотка вибропневмотранспортной системы с кольцевым эжектором.

Научная новизна приведенных в работе результатов исследований движения по наклонной вибрирующей поверхности материальной частицы в потоке эжектируемого из атмосферы воздуха заключается в следующем:

- отрыв материальной частицы от поверхности вибрлотка происходит под действием вибрации и аэродинамической силы воздушного потока;
- коэффициент отрыва материальной частицы от поверхности вибрлотка зависит от углов наклона вибрлотка к горизонту и действия вектора вибрации, которые аппроксимируются кубическими уравнениями;
- величина скорости отрыва материальной частицы, движущейся в потоке воздуха, от поверхности вибрлотка зависит не только от параметров вибрации, но и от аэродинамических характеристик эжектируемого потока воздуха и перемещаемого материала.

Выполненные исследования позволяют определить характерные особенности перемещения частиц горной породы при виброаэродинамическом способе ее загрузки в вибропневмотранспортные системы с кольцевым эжектором. Полученные результаты дополняют существующие методы расчета вибропневмотранспортных трубопроводных систем учетом аэродинамических свойств транспортируемого твердого материала и специфики работы вибропневмотранспортного оборудования эжекторного типа. Практическая ценность результатов исследований состоит в развитии теоретических представлений о процессе вибропневмотранспортирования и в расширении области применения полученных конкретных результатов в расчетно-конструкторской и инженерной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В.Н. Потураев, А.Ф. Булат, А.И. Волошин [и др.]. – Киев: Наукова думка, 2001. – 176 с.
2. Волошин А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – Киев: Наукова думка, 2001. – 521 с.
3. Волошин А.И. Использование эжекторных закладочных машин в технологиях горного производства / А.И. Волошин, А.И. Коваль, С.Н. Пономаренко // Уголь Украины. – 2011, № 4. – С.40 – 44.

REFERENCES

1. Poturayev, V.N., Bulat, A.F., Voloshin, A.I., Ponomarenko, S.N. and Voloshin, A.A. (2001), *Mekhanika vibratsionno-pnevmaticheskikh mashin ezhektornogo tipa* [Mechanics vibration-pneumatic machine the ejector type], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Voloshin, A.I. and Ponomaryev, B.V. (2001), *Mekhanikai pnevmotransportirovaniya sypushikh materialov* [Mechanics the pneumatic transport of bulk materials], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
3. Voloshin, A.I., Koval A.I. and Ponomarenko, S.N. (2011), "Prospects of the use of the ducted stowing machines in technologies of mining production", *Coal of Ukraine*, vol. 4, pp. 40 – 44.

Об авторе

Пономаренко Сергей Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник в отделе вибропневмотранспортных систем и комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, ponomarenko@ua.fm

About the author

Ponomarenko Sergei Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher of Department of vibropneumatic Transport Systems and Complexes, M.S. Polyakov Institute Geotechnical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, ponomarenko@ua.fm

Анотація. Стаття спрямована на отримання нових залежностей для визначення швидкості відриву матеріальної частки від поверхні вібрототка в полі дії вібраційних та аеродинамічних сил. Математична модель руху матеріальної частки по похилій віброуючій поверхні побудована з використанням основних положень класичної механіки, аеродинаміки та теорії вібраційного переміщення. Визначені характерні особливості переміщення часток гірської породи при віброаеродинамічному способі її завантаження в пневмотранспортний пристрій з кільцевим ежектором. В статті запропонований новий метод опису процесу відриву матеріальної частки від похилої віброуючої поверхні потоком повітря, яке ежектуюється із атмосфери. Отримано співвідношення для визначення величини та напрямку швидкості відриву часток породи від поверхні вібрототка залежно від характеру дії вібраційних і аеродинамічних сил. Врахування аеродинамічних властивостей часток породи та конструктивних характеристик вібрототка приводить до підвищення точності моделі переміщення породи в вібропневмотранспортних пристроях. Отримані результати можуть бути застосовані при розрахунку та проектуванні пневматичних закладальних пристроїв з кільцевим ежектором для технологій гірничого виробництва.

Ключові слова: швидкість відриву, вібрототок, віброаеродинамічні сили.

Abstract. The paper presents new dependencies for defining velocity of material particle separation from the surface of vibrating tray in zone of vibration and aerodynamic forces action. A mathematical model of material particle motion along inclined vibrating surface was built by using basic assumptions of classical mechanics, aerodynamics and theory of vibration displacement. Characteristic features of the rock particle displacement were defined at vibro-aerodynamic method of feeding the particles to the pneumotransporter with annular ejector. The paper presents a new method for describing the process of material particle separation from inclined vibrating surface with the help of air flow ejected from the atmosphere. Ratios were obtained for determining magnitude and direction of the rock particle separation from the surface of vibrating trays depending on nature of vibration and aerodynamic forces action. Taking into account aerodynamic properties of the rock particles and structural characteristic of vibrating trays provides improved accuracy of model of rock moving on the vibro-pneumatic transporters. The results obtained can be used for calculating and designing various pneumatic stowing machines with the annular ejector for mining technologies.

Keywords: separation velocity, vibrating trays, vibro-aerodynamic force.

Стаття поступила в редакцію 14.05. 2013

Рекомендовано к публикации чл.-корр. НАН Украины Волошиным А.И.