

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРОПНЕВОТРАНСПОРТНЫХ МАШИНАХ С КОЛЬЦЕВЫМ ЭЖЕКТОРОМ

Встановлені основні закономірності стабілізації руху закладального матеріалу на завантажувальній ділянці вібропневмотранспортних машин з кільцевим ежектором. Визначені параметри, що характеризують приведення закладального матеріалу в зважений стан з урахуванням комплексного віброаеродинамічного впливу на завантажувальній ділянці.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF STABILIZING OF MOTION OF ATTLES IN VIBRO-PNEUMONIC-TRANSPORT MACHINES WITH RING EJECTOR

Basic conformities to law of stabilizing of motion of attle are set on the loading area of vibro-pneumonic-transport machines with ring ejector. Parameters are certain, characterizing restoring of attle to a self-weighted state taking into account complex vibroaerodynamic influence on a loading area.

Математические модели, описывающие движение в вибропневмотранспортных машинах (ВПМ) единичной частицы транспортируемого материала при комплексном воздействии на нее виброаэродинамических сил приведены в работах [1, 2], в которых исследованы различные варианты режимов транспортирования сыпучих материалов. Однако применение этих моделей для описания движения потока транспортируемого материала затруднено в связи с неоднородностью фракционного состава закладочного материала и сложностью механизма взаимодействия частиц транспортируемого материала как между собой, так и с несущей средой и грузочным органом. Поэтому, вполне допустимо для прямолинейного движения потока частиц закладочного материала во взвешенном состоянии не учитывать некоторые виды действующих на единичную частицу сил.

Для построения расчетной модели движения закладочного материала на участке его загрузки в ВПМ, представим ограниченный объем перемещаемой ВПМ твердой фазы аэросмеси в виде дисперсоида, основное дифференциальное уравнение прямолинейного движения которого будет иметь вид [3–5]

$$\frac{F_g}{g} \frac{d^2 l}{dt^2} = F_{\mu} - f F_g, \quad (1)$$

где F_g и F_{μ} – соответственно сила тяжести дисперсоида и аэродинамическая сила; l – перемещение; g – ускорение свободного падения; t – время; f – коэффициента обобщенного сопротивления среды (транспортируемого закладочного материала).

В общем случае при определении коэффициента обобщенного сопротивления среды f необходимо учитывать фракционный состав загружаемого закладочного материала, его вес, липкость и проницаемость, силу трения с поверх-

ностью вибролотка и действующие виброаэродинамические силы. Поэтому, на загрузочном участке ВПМ с кольцевым эжектором, учитывая сложность механизма действующих на дисперсоид сил и неоднородность фракционного состава транспортируемого материала, получить точное численное значение коэффициента f расчетным путем не представляется возможным и его, как правило, необходимо определять экспериментально для каждого конкретного случая.

Расписав значения силы тяжести дисперсоида и аэродинамической силы [3–5] и учитывая зависимость коэффициентов сопротивления от параметра Рейнольдса, отнесенного к соответствующей скорости движения, после математических преобразований равенства (1) получим:

$$\frac{1}{2g} \frac{d(u_{\Sigma, \text{cp}} - v_{\text{от}})^2}{dl} = \left(\frac{v_{\text{от}}}{v_{\Gamma}} \right)^{3/2} - f. \quad (2)$$

где $u_{\Sigma, \text{cp}}$ – средняя скорость смешанного потока воздуха в начале транспортного трубопровода ВПМ; $v_{\text{от}}$ – относительная скорость движения дисперсоида на загрузочном участке; v_{Γ} – гидравлическая крупность транспортируемого закладочного материала.

Введя обозначения $x_0 = u_{\Sigma, \text{cp}}/v_{\Gamma}$; $x = v_{\text{от}}/v_{\Gamma}$ и проинтегрировав уравнение (2) в пределах от $x_{\text{н}} = v_{\text{в, cp}}/v_{\Gamma}$ до $x_{\text{к}} = v_{\Sigma, \text{cp}}^{\text{ст}}/v_{\Gamma}$ (где $v_{\text{в, cp}}$ – средняя скорость движения материала на вибрационном участке, $v_{\Sigma, \text{cp}}^{\text{ст}}$ – скорость дисперсоида в конце участка стабилизации) и соответственно $l = 0$ и $l = l_{\text{ст}}$, получим:

$$l_{\text{ст}} = \frac{2v_{\Gamma}^2}{g} \left\{ \sqrt{x_{\text{к}}} - \sqrt{x_{\text{н}}} - \frac{f^{2/3} + x_0}{6f^{1/3}} \left[\frac{1}{6} \ln \frac{(f^{2/3} + f^{1/3} \sqrt{x_{\text{н}}} + x_{\text{н}})(f^{1/3} - \sqrt{x_{\text{к}}})^2}{(f^{2/3} + f^{1/3} \sqrt{x_{\text{к}}} + x_{\text{к}})(f^{1/3} - \sqrt{x_{\text{н}}})^2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \arctg \frac{2\sqrt{3}f^{1/3}(\sqrt{x_{\text{к}}} - \sqrt{x_{\text{н}}})}{3f^{2/3} + (2\sqrt{x_{\text{к}}} + f^{1/3})(2\sqrt{x_{\text{н}}} + f^{1/3})} \right] \right\} \quad (3)$$

Среднюю скорость движения дисперсоида на участке стабилизации $l_{\text{ст}}$ в соответствии с общепринятыми допущениями определим как $v_{\Sigma, \text{cp}} = l_{\text{ст}}/t$, где t – время, за которое частицы перемещаемого закладочного материала на участке $l_{\text{ст}}$ переходят во взвешенное состояние. Это время определяется из решения дифференциального уравнения приведения одиночного дисперсоида во взвешенное состояние (1) с учетом того, что, $\frac{dl}{dt} = u_{\Sigma, \text{cp}} - v_{\text{от}}$. Таким образом, с учетом принятых обозначений:

$$-\frac{v_{\Gamma}}{g} \frac{dx}{x^{3/2} - f} = dt. \quad (4)$$

Интегрируя равенство (4) в пределах $0 \rightarrow t$ и соответственно $x_H \rightarrow x_K$ для $x_K = 1$ получим время, за которое дисперсоид переходит во взвешенное состояние, при помощи которого определим среднюю скорость движения дисперсоида на участке стабилизации:

$$\begin{aligned}
 v_{\Sigma, \text{cp}} = v_s \left\{ 1 - \sqrt{x_H} - \frac{f^{2/3} + x_0}{6f^{1/3}} \left[\frac{1}{6} \ln \frac{(f^{2/3} + f^{1/3} \sqrt{x_H} + x_H)(f^{1/3} - 1)^2}{(f^{2/3} + f^{1/3} + 1)(f^{1/3} - \sqrt{x_H})^2} + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{3}f^{1/3}(1 - \sqrt{x_H})}{3f^{2/3} + (2 + f^{1/3})(2\sqrt{x_H} + f^{1/3})} \right] \right\} / \\
 / \left[\frac{1}{6f^{1/3}} \ln \frac{(f^{2/3} + f^{1/3} + 1)(f^{1/3} - \sqrt{x_H})^2}{(f^{2/3} + f^{1/3} \sqrt{x_H} + x_H)(f^{1/3} - 1)^2} - \right. \\
 \left. - \frac{1}{\sqrt{3}f^{1/3}} \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{3}f^{1/3}(1 - \sqrt{x_H})}{3f^{2/3} + (2 + f^{1/3})(2\sqrt{x_H} + f^{1/3})} \right] \quad (5)
 \end{aligned}$$

Средняя скорость $v_{\text{в,ср}}$ движения закладочного материала на вибрационном участке ВПМ определяется по формуле [6]:

$$v_{\text{в,ср}} = (k_1 - k_2 \sin \beta) A \omega \cos \delta \sqrt{1 - \frac{g^2 \cos^2 \beta}{A^2 \omega^4 \sin^2 \delta}}, \quad (6)$$

где k_1 и k_2 – эмпирические коэффициенты, принимаемые для транспортируемых материалов с объемной плотностью $2,0 \div 2,2 \text{ т/м}^3$ ориентировочно $k_1 = 1 \div 1,08$ и $k_2 = 2 \div 1,8$ [6]; β и δ – соответственно углы наклона вибрирующей поверхности к горизонту и направления действия вынуждающей силы; A и ω – соответственно амплитуда и частота колебаний вибрирующего органа ВПМ.

Коэффициент режима K_p , характеризующий режим работы загрузочного органа ВПМ, определяется по равенству [6]:

$$K_p = (A \omega^2 \sin \delta) / (g \cos \beta). \quad (7)$$

Введя обозначения $L_{\text{ст}} = (gl_{\text{ст}}) / (2v_{\Gamma}^2)$; $v_{\text{ст}} = v_{\Sigma, \text{ср}} / v_{\Gamma}$ и $f_{\text{ст}} = f^{1/3}$, для $x_K = 1$ уравнения (4) и (5) примут вид:

$$\begin{aligned}
 L_{\text{ст}} = 1 - \sqrt{x_H} - \frac{f_{\text{ст}}^2 + x_0}{6f_{\text{ст}}} \left[\frac{1}{6} \ln \frac{(f_{\text{ст}}^2 + f_{\text{ст}} \sqrt{x_H} + x_H)(f_{\text{ст}} - 1)^2}{(f_{\text{ст}}^2 + f_{\text{ст}} + 1)(f_{\text{ст}} - \sqrt{x_H})^2} + \right. \\
 \left. + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{3}f_{\text{ст}}(1 - \sqrt{x_H})}{3f_{\text{ст}}^2 + (2 + f_{\text{ст}})(2\sqrt{x_H} + f_{\text{ст}})} \right] ;
 \end{aligned}$$

$$v_{\text{CT}} = \left\{ 1 - \sqrt{x_{\text{H}}} - \frac{f_{\text{CT}}^2 + x_0}{6f_{\text{CT}}} \left[\frac{1}{6} \ln \frac{(f_{\text{CT}}^2 + f_{\text{CT}}\sqrt{x_{\text{H}}} + x_{\text{H}})(f_{\text{CT}} - 1)^2}{(f_{\text{CT}}^2 + f_{\text{CT}} + 1)(f_{\text{CT}} - \sqrt{x_{\text{H}}})^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{3}f_{\text{CT}}(1 - \sqrt{x_{\text{H}}})}{3f_{\text{CT}}^2 + (2 + f_{\text{CT}})(2\sqrt{x_{\text{H}}} + f_{\text{CT}})} \right] \right\} / \left[\frac{1}{6f_{\text{CT}}} \ln \frac{(f_{\text{CT}}^2 + f_{\text{CT}} + 1)(f_{\text{CT}} - \sqrt{x_{\text{H}}})^2}{(f_{\text{CT}}^2 + f_{\text{CT}}\sqrt{x_{\text{H}}} + x_{\text{H}})(f_{\text{CT}} - 1)^2} - \right. \\ \left. - \frac{1}{\sqrt{3}f_{\text{CT}}} \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{3}f_{\text{CT}}(1 - \sqrt{x_{\text{H}}})}{3f_{\text{CT}}^2 + (2 + f_{\text{CT}})(2\sqrt{x_{\text{H}}} + f_{\text{CT}})} \right]$$

На рис. 1, 2 представлены расчетные зависимости, построенные по выше приведенным формулам, и экспериментальные данные по определению в ВПМ длины участка стабилизации и скорости движения закладочного материала от параметров виброаэродинамического воздействия.

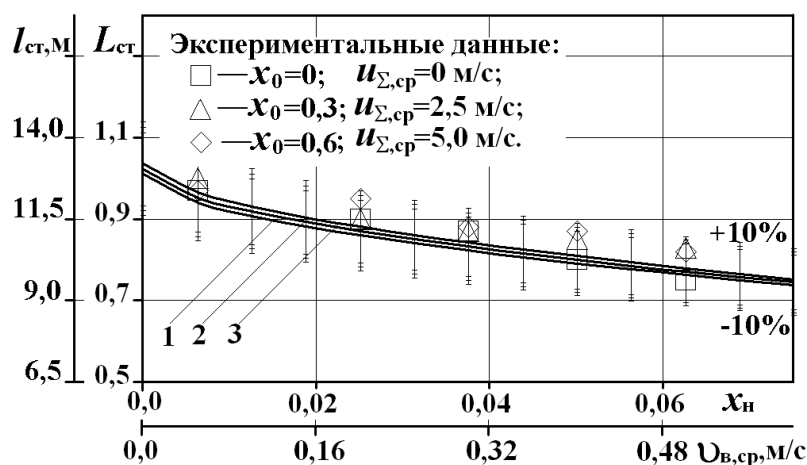


Рис. 1 – Зависимость длины участка стабилизации движения закладочного материала на загрузочном участке ВПМ: 1, 2 и 3 – соответственно результаты расчета для $x_0=0$; 0,3 и 0,6.

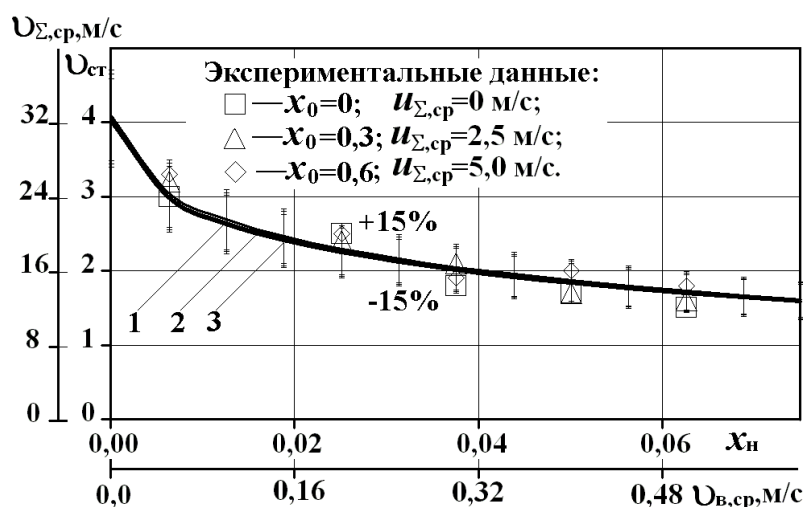


Рис. 2 – Зависимость скорости стабилизации движения закладочного материала на загрузочном участке ВПМ: 1, 2 и 3 – соответственно результаты расчета для $x_0=0$; 0,3 и 0,6.

При расчете средней скорости вибротранспортирования $v_{в,ср}$ (параметров вибрационного воздействия) приняты значения коэффициентов $k_1=1,08$; $k_2=1,8$; угла направления вибрации $\delta=30$ град и угла наклона вибрирующей поверхности вибротолка к горизонту $\beta=0$ град, а коэффициент режима K_p , согласно [2], выбран $K_p=3$.

Обобщенный коэффициент сопротивления f движению дисперсоида можно рассматривать в качестве коэффициента приведенного трения, который согласно [2], определяется как $f=M_g(K_p)tg\rho_f$ (где $M_g(K_p)<1$ – коэффициент снижения трения при вибропневмотранспортировании, значения которого исследованы в работе [2]; $\rho_f=arctg f_{тр}$ – угол трения скольжения; $f_{тр}$ – коэффициент трения). Согласно [1, 2], $f_{тр}=0,4\div 0,5$. Принимая $M_g(K_p)=0,75$ и $f_{тр}=0,5$, получим для построения расчетных зависимостей значение $f=0,35$.

В соответствии с результатами теоретических и экспериментальных исследований процесса пневмотранспортирования различных видов сыпучих материалов, в том числе и закладочных [3], на загрузочном участке ВПМ с достаточной степенью точности можно принимать $v_r=v_{тр}$, где $v_{тр}$ – скорость трогания. Для материалов с объемной плотностью $2,0\div 2,2$ т/м³ и расчетной крупностью $40\div 45$ мм в этой же работе было получено значение $v_{тр}=8$ м/с, которое использовано при построении расчетных зависимостей и обработке результатов экспериментальных исследований, приведенных на рис. 1, 2.

В качестве параметра аэродинамического влияния на транспортируемый закладочный материал принята скорость эжектируемого потока воздуха, которая в расчете принята по результатам экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились на специально оборудованном стенде ВПМ с кольцевым эжектором на территории опытно-промышленного полигона ИГТМ НАН Украины. В качестве исследуемых при транспортировании ВПМ материалов использовалась угольная порода, щебенка фракцией 20-40 и 60-80 мм, керамзит и глина.

Экспериментальные исследования и расчет с варьированием эмпирических коэффициентов k_1 и k_2 показали, что вследствие малых значений измеряемого параметра ($v_{в,ср}\leq 0,7$ м/с) и погрешностью измерений 10-15%, различия при определении средней скорости транспортирования угольной породы, щебенки, керамзита, гравия и глины находились в пределах погрешности измерений. Поэтому для проведения анализа полученных данных были приняты обобщенные результаты по всей группе исследуемых материалов, которые соответствуют применяемым в горнодобывающей промышленности закладочным материалам по плотности и гранулометрическому составу.

Как видно из представленных на рис. 1 – рис. 2 результатов, на загрузочном участке ВПМ длина участка стабилизации движения закладочного материала и скорость его перемещения линейно зависят от параметров виброаэродинамического воздействия, убывая с ростом $v_{в,ср}$ и возрастая с увеличением $v_{\Sigma,ср}$, при этом для закладочных материалов диапазон рациональных значений $9<l_{ст}\leq 11$ м и $13\leq v_{\Sigma,ср}\leq 18$ м/с обеспечивается при $0,2\leq v_{в,ср}\leq 0,5$ м/с.

На рис. 3 приведены зависимости средней скорости вибротранспортирования ВПМ исследуемых материалов без эжектирования и с эжектированием воздуха из атмосферы от амплитудно-частотной характеристики ВПМ при $\beta=0$.

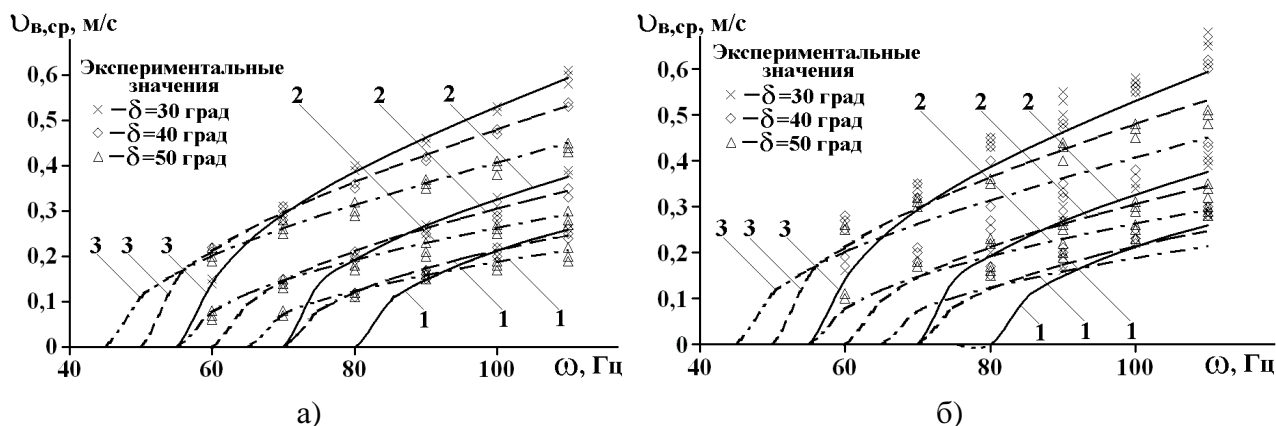


Рис. 3 – Экспериментальные данные и расчетные зависимости средней скорости вибротранспортирования исследуемых материалов ВПМ: (а – без эжектирования; б – с эжектированием; сплошные линии – результаты расчета для $\delta=30^\circ$; пунктирные – $\delta=40^\circ$; штрихпунктирные – $\delta=50^\circ$) для амплитуды колебаний: 1 – 0,002 м; 2 – 0,004 м; 3 – 0,006 м.

Как следует из рис. 3, при малых скоростях вибротранспортирования закладочных материалов ($v_{в,ср} \leq 0,1$ м/с) использование вынуждающей силы более эффективно с увеличением ее угла действия δ . В диапазоне скоростей $0,1 \leq v_{в,ср} \leq 0,3$ м/с происходит перемена эффективности использования вынуждающей силы в сторону уменьшения угла δ , а максимальное значение средней скорости транспортирования обеспечивается при $\delta=30^\circ$, $A=0,006$ м и максимально возможной частоте вынужденных колебаний ω .

Таким образом, анализ полученных результатов и данных, приведенных в работах [1, 2, 5] показывает, что рациональными параметрами вибрационного воздействия на перемещаемый закладочный материал, обеспечивающими режим работы ВПМ со скоростью вибротранспортирования в диапазоне $0,2 \leq v_{в,ср} \leq 0,5$ м/с, при $\delta=30$ град, $\beta=0$ град и $f=0,35$ можно считать значение частоты колебаний вибротолка $\omega \leq 60$ Гц и амплитуды $A \geq 0,01$ м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потураев В.Н. Вибрационно-пневматическое транспортирование сыпучих материалов/ В.Н. Потураев, А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К. : Наук. думка, 1989. – 248 с.
2. Волошин А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И. Волошин, Б.В. Пономарев.– Киев: Наук. думка, 2001. – 521 с.
3. Клячко Л.С. Пневматический транспорт сыпучих материалов / Л.С. Клячко, Э.Х. Одельский, Б.М. Хрусталеv.– Минск: Наука и техника, 1984. – 216 с.
4. Потураев В.Н. Определение основных параметров виброаэродинамической загрузки сыпучим материалом пневмотранспортных установок эжекторного типа / В.Н. Потураев, А.И. Волошин, С.Н. Пономаренко // Вибрационные и волновые транспортно-технологические машины.– Киев: Наук. думка, 1991.–С.22– 30.
5. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В.Н. Потураев, А.Ф. Булат, А.И. Волошин [и др.]. – Киев: Наукова думка, 2001. – 176 с.
6. Вибрационные машины для выпуска и доставки руды / В.Н. Потураев, В.И. Дырда, О.К. Авдеев [и др.].– Киев: Наук. думка, 1981. – 152 с.