

Волошин А.И.

Пономаренко С.Н.

Институт
геотехнической
механики
им. Н.С. Полякова
НАН Украины

УДК 622.648.6.65:622.647.7.65

ВИБРОПНЕВМОТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Приведені основні результати досліджень переміщення сипких матеріалів в полі дії віброаеродинамічних сил, які дозволили створити вібропневмотранспортні машини нового технічного рівня для транспортування сипких матеріалів

Basic results over of researches of moving of friable materials are brought in the field of action of vibro-aerodynamic forces which allowed to create vibro-pneumotransport machines of new technical level for the portage of friable materials

Посвящается светлой памяти академика В.Н. ПОТУРАЕВА

Основные требования, которые предъявляются к пневмотранспортному оборудованию, это: простота конструкции, сравнительно небольшие габаритные размеры и масса, возможность устойчивой работы оборудования при транспортировании специфических видов транспортируемого материала (влажные и липкие горные породы), и, особенно, исключение возможности закупорок загрузочного участка транспортного трубопровода.

В результате многолетних комплексных теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в Институте геотехнической механики (ИГТМ) им. Н.С. Полякова НАН Украины под руководством академика В.Н. Потураева, было доказано, что наиболее эффективное решение подобного рода задач может быть обеспечено путем использования вибрационного воздействия на сыпучий материал на загрузочном участке.

На основе механики гетерогенных сред под руководством академика В.Н. Потураева, создана фундаментальная теория двухфазных потоков «газ – твердые частицы» в поле действия виброаэродинамических сил. При этом, впервые, на уровне научного открытия (диплом Российской академии естественных наук, Международной академии авторов научных открытий и изобретений № 197 от 26.12.2001г.), установлены закономерности движения сыпучих материалов по транспортному трубопроводу.

В работах [1,2] приведены результаты исследований процессов движения сыпучего материала на вибрационном загрузочно-разгонном участке транспортного трубопровода в рамках модели «материальная частица».

Для оценки эффективного коэффициента трения в этой модели предусмотрена возможность наряду с этапом полета частицы существование этапа скольжения ее по поверхности рабочего органа, а для учета сил трения использована неинерциальная система координат, связанная с колеблющимся рабочим органом. В результате рассмотрения движения частицы в потоке газа по наклонной вибрирующей плоскости было получено выражение для определения величины коэффициента снижения трения $M_q(\Gamma)$ при вибропневмотранспортировании сыпучих материалов:

$$M_q(\Gamma) = 1 - \left\{ \varphi_n - \delta_0 + \frac{1}{2}(2\pi q + \delta_0 - \varphi_n)^2 r + \right. \\ \left. + \Gamma [\cos \varphi_n - \cos \delta_0 - \right. \\ \left. - (2\pi q + \delta_0 - \varphi_n) r \cos \varphi_n] \right\} / 2\pi q,$$

где Γ – параметр вибрации; φ_n и δ_0 – фазовые углы падения и отрыва частицы; $\pi=3,14$; q – кратность периода движения частицы периоду колебаний рабочего органа; r – параметр виброаэродинамического давления.

С использованием приведенного выше соотношения получена зависимость коэффициента снижения трения от параметра

виброаэродинамического
приведенная на рис. 1.

давления,

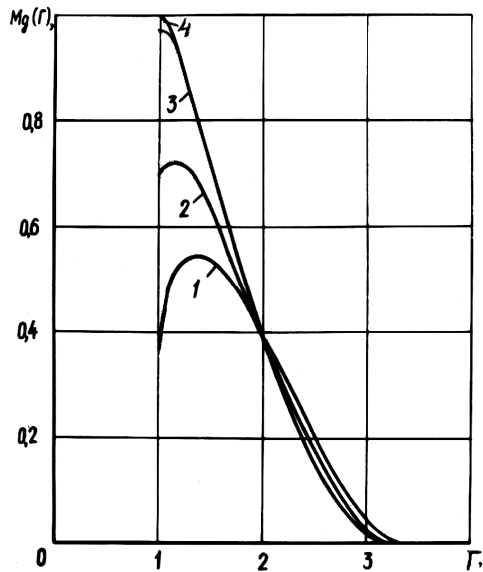


Рис. 1. Зависимость коэффициента снижения трения (Mq) от параметра виброаэродинамического давления (Γ) при значениях r , равном: 0,2 (1); 0,1 (2); $0,625 \cdot 10^{-2}$ (3); 0 (4).

Из графика, приведенного на рис. 1, видно, что учет воздушного потока в вибропневмотранспортных установках приводит к существенному снижению приведенного коэффициента трения при $\Gamma < 2$ для мелкодисперсных материалов относительно небольшой плотности и практически не влияет при $2 < \Gamma < 3,3$.

При этом, вибрационное воздействие на сыпучий материал в пределах разгонного участка позволяет значительно (в 10 раз и более) снизить влияние сил трения и существенно увеличить пропускную способность узла загрузки сыпучего материала в пневмотранспортную систему [1-3].

На основе полученных результатов под руководством академика В.Н. Потураева в ИГТМ НАН Украины было развито новое направление в плане разработки пневмотранспортного оборудования – создание вибропневмотранспортных машин циклического (ВПМЦ) и непрерывного (ВПМН) принципа действия [1-4].

ВПМЦ – представляют собой камерные вибропневмотранспортные машины циклического действия, относящиеся к классу машин цехового пневмотранспорта (см. рис. 2). Их производительность составляет до $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ и дальность транспортирования до 2,5 км при габаритах машины 1,2 x 0,7 x 2,5 м.

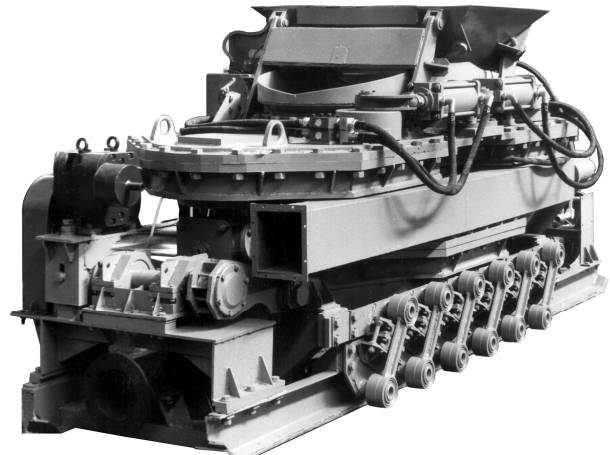


Рис. 2. Вибропневмотранспортная машина ВПМЦ.

В горнодобывающей промышленности ВПМЦ предназначены для использования в инфраструктуре закладочного хозяйства шахт как высокоэффективное средство доставки закладочного материала с участков его подготовки к добычным участкам и закладки в выработанное пространство лавы. Использование таких машин позволяет существенно снизить энергозатраты на транспортирование закладочного материала за счет исключения из стоимости закладочных работ строительства перегрузочных пунктов и эксплуатации других видов транспорта. Техно-экономические показатели работы ВПМЦ позволяет использовать ее в различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве для транспортирования различных видов сыпучих материалов.

ВПМН – представляют собой малогабаритные, вибропневмотранспортные машины непрерывного действия, относящиеся к классу машин участкового пневмотранспорта (см. рис. 3).

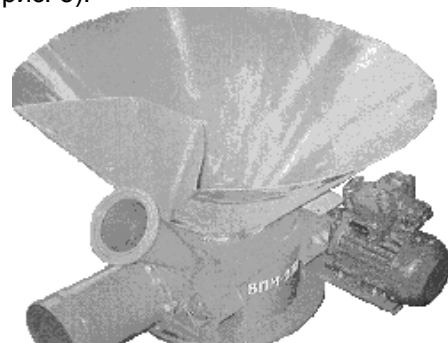
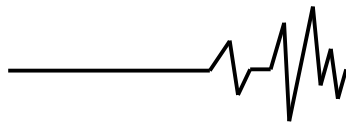


Рис. 3. Вибропневмотранспортная машина ВПМН.

В горнодобывающей промышленности ВПМН предназначены для решения комплекса задач горного производства в технологических



схемах с оставлением горных пород в выработанном пространстве шахт. Машины этого класса характеризуются незначительными массогабаритами (масса до 200 кг, габариты 0,7 x 0,8 x 0,3 м); дальностью транспортирования горной массы до 100 м; производительностью до 30 м³/ч. Они могут располагаться непосредственно на добычном участке и перемещаться по подготовительным выработкам вслед за очистным забоем по всей длине обрабатываемого столба.

Учитывая большое разнообразие технологических схем использования ВПМН, а также тот факт, что обеспечение этих машин сжатым воздухом является высокоэнергоемким процессом, стратегическим направлением в разработке машин данного класса принято создание их типоразмерного ряда. Такой подход позволяет минимизировать потребление ВПМН сжатым воздухом путем возможности выбора в каждом конкретном случае типоразмера ВПМН с показателями назначения в наиболее полной мере адаптированными к условиям их практического применения.

Отличительная особенность ВПМН, разработанных в ИГТМ НАН Украины под руководством академика В.Н. Потураева, заключается в рациональном взаимном расположении кольцевого эжектора с загрузочным бункером питателем и вибрационным загрузочным лотком.

Благодаря такой конструктивной схеме компоновки основных элементов машины сыпучий материал подается в транспортный трубопровод с использованием комплексного виброаэродинамического воздействия на перемещаемый материал. Вибролоток в конструкциях данного типа предназначен для создания в зоне загрузки вибрируемого слоя материала и тем самым снижения эффективного коэффициента трения материала о стенки загрузочного устройства. Вследствие этого достигается снижение затрат энергии и, соответственно, сжатого воздуха на разгон материала. При этом происходит уменьшение потерь полного давления на инерционный разбег перемещаемого материала и снижаются потери давления несущей среды (воздуха) в загрузочном бункере. В конечном счете, все это позволяет существенно увеличить эффективность транспортирования сыпучих материалов.

Экспериментальные исследования и промышленная эксплуатация ВПМН показали, что при постоянных параметрах работы машины длину транспортного трубопровода можно увеличивать лишь до определенного

предела. Дальнейшее наращивание става транспортного трубопровода приводит к образованию его закупорки перемещаемым сыпучим материалом и возникновению обратных потоков аэросмеси [3,4].

Такое состояние вопроса обуславливает актуальность необходимости теоретического и экспериментального исследования физической картины взаимодействия несущей среды и транспортируемого сыпучего материала. В работе [4] приведена, полученная на основании выполненных исследований формула для определения скорости эжектируемого из атмосферы воздуха ($u_{э,ср}$):

$$u_{э,ср} = \left\{ \frac{\rho_H S (1 - \alpha_{2,раз})}{\rho_э S_э (1 - \alpha_2)} \left[2 \frac{p_H - p_L}{\rho_H \left(f_\Sigma \frac{L}{D} + \mu \right)} \right]^{3/2} - \frac{\rho_c S_c u_{э,ср}^3}{\rho_э S_э (1 - \alpha_2)} \right\}^{1/3},$$

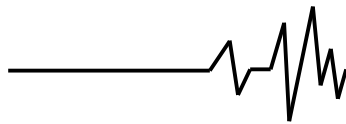
где ρ_H , $\rho_э$, ρ_c – соответственно плотность воздуха в начале транспортного трубопровода, эжектируемого и эжектирующего потоков, кг/м³; S , $S_э$, S_c – соответственно площадь транспортного трубопровода, зоны загрузки и среза кольцевой щели эжектора, м²; $\alpha_{2,раз}$, α_2 – соответственно коэффициент заполнения сыпучим материалом проходного сечения разгонного участка и загрузочной зоны, p_H , p_L – соответственно давление воздуха в начале и в конце транспортного трубопровода, Па; f_Σ – интегральный коэффициент сопротивления движению аэросмеси; L , D – длина и диаметр транспортного трубопровода, м; μ – коэффициент местных сопротивлений, $u_{э,ср}$ – осредненное значение скорости эжектирующего потока воздуха, м/с.

При этом, интегральный коэффициент сопротивления движению аэросмеси прямо пропорционален массовой концентрации (λ), сопротивлению транспортируемого материала (c_μ) и транспортного трубопровода (α_2^m), а также квадрату коэффициента относительной скорости ($\varphi_{от}^2$) движения аэросмеси

$$f_\Sigma = \lambda + c_\mu \alpha_2^m \varphi_{от}^2.$$

Коэффициент относительной скорости движения аэросмеси равен

$$\varphi_{от} = (u - v)/u = 0,02 \div 0,12,$$



где u и v – скорости движения соответственно воздуха и сыпучего материала в транспортном трубопроводе, м/с.

Пневмотранспортирование по трубопроводу сыпучего материала, в соответствии с приведенным выше уравнением, возможно лишь при $p_H > p_L$ и эжектирование воздуха из атмосферы через загрузочную воронку будет возможно лишь при $u_{э,ср} > 0$. Случай, когда скорость эжектируемого из атмосферы воздуха $u_{э,ср} \leq 0$ характеризует момент прекращения процесса эжекции, закупорку транспортируемым материалом трубопровода и образование обратного потока аэросмеси.

Кроме этого, исследования физики процессов смешивания воздушных потоков в эжекторных устройствах ВПМН, выполненные в ИГТМ НАН Украины под руководством академика В.Н. Потураева на базе основных положений теорий турбулентных струй и прикладной газовой динамики (газовые эжекторы), позволили получить основные характеристики взаимодействия воздушных потоков при их смешивании в эжекторных установках.

При выполнении исследований была получена зависимость для оценки влияние угла взаимодействия между эжектируемым и эжектирующим потоками газа (γ), рассматриваемого в локальном смысле, на относительные потери кинетической энергии на смешивание потоков δE [4,5]:

$$\delta E = \frac{n \left(1 + \frac{u_{э,ср}^2}{u_{с,ср}^2} - 2 \frac{u_{э,ср}}{u_{с,ср}} \cos \gamma \right)}{(1+n) \left(1 + n \frac{u_{э,ср}^2}{u_{с,ср}^2} \right)},$$

где n – коэффициент эжекции.

На рис. 4 и рис. 5 приведены результаты расчета и экспериментальные значения зависимости относительных потерь энергии на смешивание воздушных потоков в кольцевом эжекторе ВПМН от длины транспортного трубопровода и угла (ϵ) установки щели кольцевого эжектора относительно оси транспортирования. Величина отношения площадей (s) проходного сечения транспортного трубопровода (S) и среза кольцевой щели эжектора (S_c) в этих зависимостях равна $s = 2$ и $s = 4$.

Как видно из представленных на рис. 4 и рис. 5 графических зависимостей (относительная погрешность расчета и экспериментальных значений не превышает

$\pm 10\%$), относительные потери δE увеличиваются с ростом, как угла γ , так и отношения площадей (s), линейно уменьшаясь с ростом длины транспортного трубопровода. Это обстоятельство обусловлено тем, что для большего значения L необходим сжатый воздух с большим давлением и меньшей скоростью истечения.

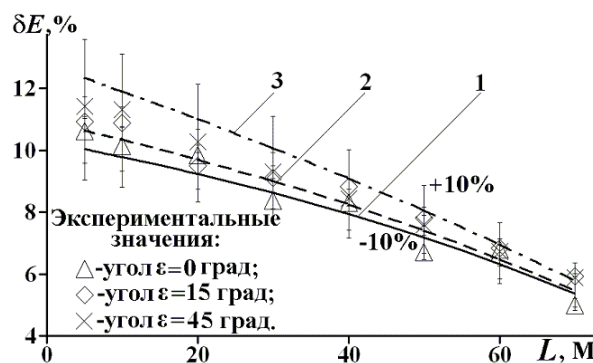


Рис. 4. Потери кинетической энергии на смешивание для $s = 2$ в зависимости от длины транспортного трубопровода (1,2 и 3 – результаты расчета):

- сплошная линия – для угла $\epsilon = 0^\circ$;
- пунктирная линия – для угла $\epsilon = 15^\circ$;
- штрихпунктирная линия – для угла $\epsilon = 45^\circ$.

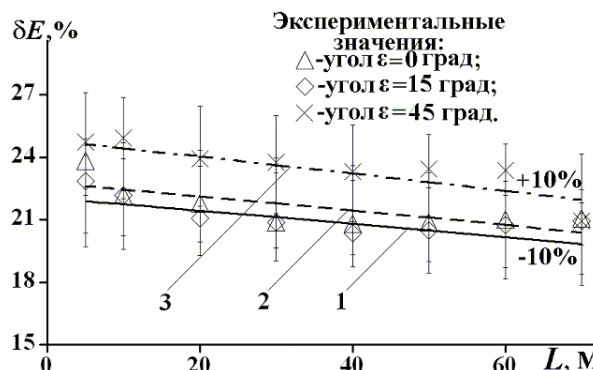
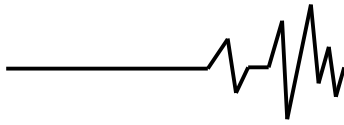


Рис. 5. Потери кинетической энергии на смешивание для $s = 4$ в зависимости от длины транспортного трубопровода (1,2 и 3 – результаты расчета):

- сплошная линия – для угла $\epsilon = 0^\circ$;
- пунктирная линия – для угла $\epsilon = 15^\circ$;
- штрихпунктирная линия – для угла $\epsilon = 45^\circ$.

Кроме этого, для относительно малых скоростей истечения воздуха ($s = 2$; см. рис. 4) на относительные потери δE угол взаимодействия γ наиболее существенно влияет для относительно коротких длин транспортного трубопровода L , а для относительно больших длин – это влияние уменьшается. В то же время для относительно



больших скоростей истечения воздуха из кольцевого эжектора ($s=4$; см. рис. 5) относительные потери δE практически прямо пропорциональны углу взаимодействия γ по всей длине трубопровода L .

Анализ и обобщение полученных результатов, приведенных на рис. 4 и рис. 5 позволили сделать следующие выводы:

- потери энергии на смешивание эжектируемого и эжектирующего потоков газа в ВПМН с кольцевым эжектором прямо пропорциональны углу (ε) наклона кольцевой щели эжектора к направлению транспортирования;

- рациональное отношение площадей сечения транспортного трубопровода и среза кольцевой щели эжектора ВПМН находится в диапазоне от 2 до 4 при $\varepsilon = 0$;

Таким образом, обобщая выше приведенное с результатами исследований, приведенных в работах [4,5], получаем:

- до настоящего времени в вопросах турбулентного смешивания газовых потоков не рассматривались отличительные особенности взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков газа в установках с кольцевым эжектором и центральным сопловым устройством;

- комплексные теоретические и экспериментальные исследования физики процессов смешивания потоков газа в эжекторных устройствах ВПМН, выполненные на базе основных положений теорий турбулентных струй и прикладной газовой динамики (газовые эжекторы), и использование апробированных методов инструментальных измерений позволили получить основные закономерности взаимодействия потоков газа при их смешивании в эжекторных установках.

Результаты исследований позволили получить неизвестную ранее закономерность, взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков газа в камере смешения кольцевого эжектора (диплом Российской академии естественных наук, Международной академии авторов научных открытий и изобретений № 423 от 02.12.2011г.), которая представляет собой научную новизну в теории смешивания турбулентных струй, дополняя описание физики процесса знаниями того, что:

- истечение эжектирующего потока газа из кольцевого эжектора происходит в виде несвободной турбулентной струи, имеющей форму полого цилиндра;

- внутри этого цилиндра за счет аксиального охвата эжектируемого газового потока и эжектирующим потоком формируется турбулентный пограничный слой поверхности тангенциального разрыва в виде конической поверхности, направленной своей вершиной в сторону движения газовых потоков;

- величина угла при вершине конусообразного пограничного слоя смешивающихся газовых потоков прямо пропорциональна потерям энергии смешанного газового потока;

- выравнивание газодинамических параметров смешивающихся эжектирующего и эжектируемого газовых потоков в пограничном слое происходит без наличия сечения запираания эжектора, которое существует в эжекторных установках с центральным соплом.

Знание полученной закономерности позволяет за счет выбора ориентации кольцевой щели эжектора относительно направления транспортирования увеличить полную энергию смешанного потока аэросмеси путем снижения ударных потерь энергии при истечении эжектирующего потока газа из кольцевой щели эжектора и смешивании его с эжектируемым потоком.

Литература

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. – 519 с.
3. 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.
4. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В.Н. Потураев, А.Ф. Булат, А.И. Волошин, С.Н. Пономаренко, А.А. Волошин – Киев: Наукова думка, 2001. – 176 с.
5. Пономаренко С.Н. Исследование угла взаимодействия газовых потоков при их смешивании в кольцевом эжекторе / С.Н. Пономаренко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: (Зб. наук. праць). – Краматорськ, 2005. – С. 174–179.