

А.И. Волошин, чл.-корр. НАН Украины,
С.Н. Пономаренко, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
Ю.Н. Игнатович, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

**ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ АЭРОСМЕСИ
НА ЗАГРУЗОЧНОМ УЧАСТКЕ ВИБРОПНЕВОТРАНСПОРТНЫХ
СИСТЕМ С КОЛЬЦЕВЫМ ЭЖЕКТОРОМ**

О.І. Волошин, чл.-кор. НАН України,
С.М. Пономаренко, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Ю.М. Ігнатович, канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ІГТМ НАН України)

**ОСОБЛИВОСТІ РУХУ АЕРОСУМІШІ НА ЗАВАНТАЖУВАЛЬНІЙ
ДІЛЬНИЦІ ВИБРОПНЕВОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ
З КІЛЬЦЕВИМ ЕЖЕКТОРОМ**

A.I. Voloshyn, Cor. member NASU,
S.N. Ponomarenko, Ph. D. (Tech), Senior Researcher,
Y. N. Ignatovich, Ph. D., Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

**SPECIFICITY OF THE AIR MIXTURE FLOWING
IN THE FEED SECTOR OF THE VIBRO-PNEUMATIC TRANSPORT
SYSTEMS WITH ANNULAR EJECTORS**

Аннотация. Статья направлена на исследование параметров и режимов движения аэросмеси на загрузочном участке трубопроводных систем пневмотранспорта с кольцевым эжектором. Приведены характерные особенности взаимодействия потоков воздуха на смешительном участке кольцевого эжектора. Выполнен анализ синхронных и асинхронных режимов движения аэросмеси на загрузочном участке вибропневмотранспортных систем с кольцевым эжектором. Получена зависимость для определения коэффициента рассеивания кинетической энергии аэросмеси с учетом технологических и режимных параметров работы оборудования данного типа. В статье предложен новый подход к рассмотрению потерь энергии на различных участках загрузочной зоны вибропневмотранспортных систем с кольцевым эжектором. Показано влияние на энергетические потери воздушного потока различных режимов движения аэросмеси в загрузочной зоне вибропневмотранспортных систем эжекторного типа. Полученные результаты могут быть применены при расчете и проектировании загрузочных устройств пневматических трубопроводных систем, в том числе оборудования для пневматической закладки выработанного пространства шахт.

Ключевые слова: аэросмесь, сыпучий материал, кольцевой эжектор, пневмотранспорт, коэффициент рассеивания энергии.

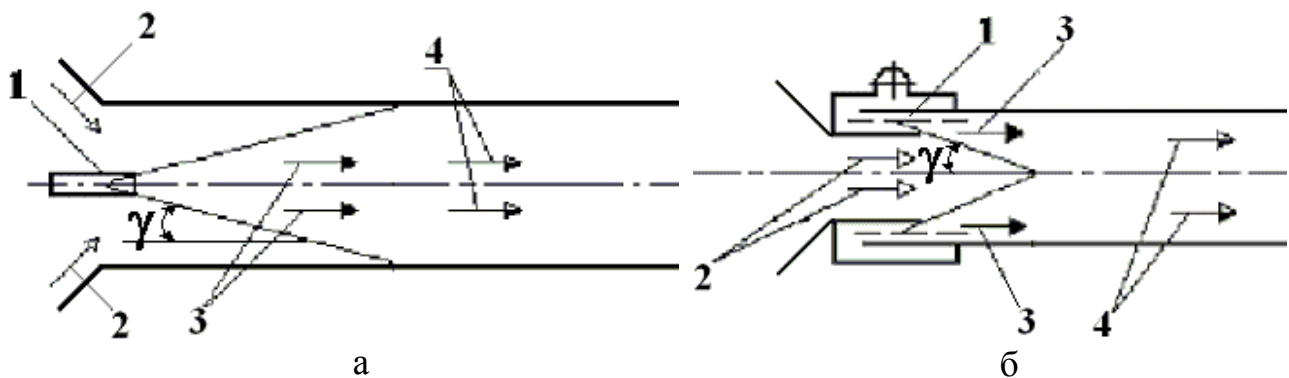
Среди трубопроводных систем пневмотранспорта, применяемых, в частности, для пневматической закладки выработанного пространства, особое место занимают установки эжекторного типа. Это обстоятельство объясняется простотой их конструкции, надежностью в эксплуатации и относительно низкими удельными энергозатратами на транспортирование различного рода сыпучих материалов, включая липкие и влажные горные породы.

Однако широкое промышленное применение оборудования данного типа сдерживается недостаточным уровнем развития научных исследований физики процессов, происходящих при загрузке сыпучего материала в транспортный трубопровод.

По характеру взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков все эжекторные устройства можно разделить на эжекторы с центральным соплом (эжектирующий поток внутри эжектируемого) и кольцевым сопловым устройством (эжектируемый поток внутри эжектирующего). Рабочие процессы эжекторных установок с центральным сопловым устройством достаточно подробно исследованы в работах С.А. Христиановича, М.Д. Миллионщикова, Г.Н. Абрамовича, Е.Я. Соколова, Н.М. Зингера, Л.Д. Бермана, Б.М. Кисилева и других авторов. В то же время проблемам трубопроводного пневмотранспорта сыпучих материалов достаточно много внимания уделено в работах И.А. Гастерштадта, Я.Б. Урбана, А.Е. Смолдырева, Л.С. Клячко, Y. Tsuji и многих других авторов. Однако рабочие процессы в трубопроводных системах пневмотранспорта эжекторного типа, объединяющие в себе самостоятельные вопросы эжектирования и пневмотранспорта, имеют свои характерные особенности, которые требуют более детального рассмотрения.

Целью данной работы является исследование характера движения аэросмеси в начале транспортного трубопровода, в котором расположена зона смешения кольцевого эжектора. В соответствии с поставленной целью в работе проанализирован характер движения трехфазного потока: эжектирующего потока воздуха из кольцевой щели эжектора, эжектируемого потока воздуха из атмосферы и загружаемого сыпучего материала (горной породы).

В общем случае эжекторное устройство (см. рис. 1) представляет собой аппарат, в котором высоконапорный (эжектирующий) газ, вытекающий из соплового устройства в смесительную камеру, создает в ней зону разрежения (Бернуллиевское разрежение).



1 – сопловое устройство эжектора; 2 – эжектируемый поток;
3 – эжектирующий поток; 4 – смешанный поток аэросмеси

Рисунок 1 – Принципиальная схема эжекторных установок трубопроводных систем пневмотранспорта: (а) - центральное и б) - кольцевое сопловое устройство

В зону разрежения эжектора под действием разности давлений устремляется низконапорный (эжектируемый) газ (принцип Бернулли). При истечении эжектирующего потока газа в виде свободной для эжектора с центральным соплом (см. рис. 1-А) или несвободной для эжектора с кольцевым соплом (см. рис. 1-Б) турбулентных струй за счет возникновения поверхности тангенциального разрыва формируется струйный турбулентный пограничный слой. Эжектирующий и эжектируемый потоки имеют различные значения скорости, температуры и давления, но в пределах пограничного слоя смешение этих потоков приводит к выравниванию параметров газа по всему сечению смесительной камеры эжектора.

Существующие различия в физической картине взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха в установках с центральным и кольцевым сопловым устройством подробно рассмотрены в работе [1]. Отличительные особенности взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной системы заключаются в том, что:

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

– внутри этого цилиндра за счет аксиального охвата эжектирующим потоком эжектируемого воздушного потока формируется конический турбулентный пограничный слой поверхности тангенциального разрыва, который направлен своей вершиной (см. рис. 1-Б) в сторону движения воздушных потоков, а выравнивание скоростей воздушных потоков происходит по этой поверхности.

С достаточной для инженерных расчетов точностью при анализе взаимосвязи скоростей эжектируемого и эжектирующего потоков воздуха приемлемы соотношения, составленные с использованием равенств, приведенных в работе Г.З. Ярмоленко по пневматическим турбинам и струйным аппаратам горных машин:

$$u_{э,ср} = 0,5 u_{с,ср}(1 - \chi_в) \operatorname{tg} \gamma; \quad (1)$$

$$(u_{\Sigma,ср})_{нач} = u_{с,ср} / (1 + 3\chi_в); \quad (2)$$

$$(u_{\Sigma,ср})_{осн} = u_{с,ср} (1 - \chi_в); \quad (3)$$

$$u_{\Sigma,ср} = u_{с,ср} \left[1 - 0,5\chi_в (1 + \chi_в \operatorname{tg} \gamma) \right]; \quad (4)$$

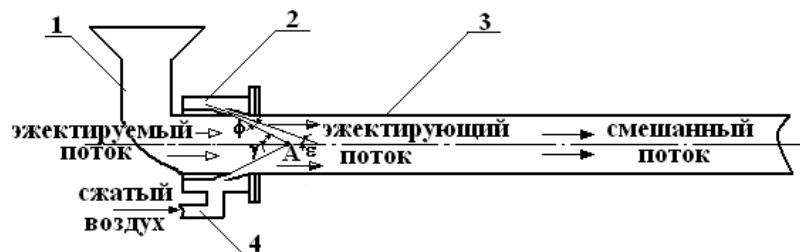
$$u_{тр,ср} = 0,5 u_{с,ср} \left[1 - 0,5\chi_в (1 + \chi_в \operatorname{tg} \gamma) \right] \sqrt{0,15 + 0,85 / (1 - \chi_в)}, \quad (5)$$

где $u_{э,ср}$ – осредненная по площади скорость эжектируемого потока воздуха, м/с;
 $u_{с,ср}$ – осредненная по площади скорость эжектирующего потока воздуха, м/с;
 $\chi_в$ – коэффициент рассеивания энергии воздушного потока; γ – угол локального

взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха, градус; $(u_{\Sigma, cp})_{нач}$ и $(u_{\Sigma, cp})_{осн}$ – соответственно осредненные по площади значения скорости смешанного потока воздуха на начальном и основном участке зоны смешивания эжекторного устройства, м/с; $u_{\Sigma, cp}$ – осредненная по площади скорость смешанного потока воздуха, м/с; $u_{mp, cp}$ – осредненная по площади скорость смешанного потока воздуха в начале транспортного трубопровода (в конце зоны смешивания), м/с.

В вышеназванной работе Г.З. Ярмоленко рекомендуется при выполнении предварительных расчетов закладочных установок с центральным сопловым устройством (см. рис. 1-А) принимать теоретическое значение $\chi_6 = 0,67$. Однако в физической картине взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков газа в эжекторах центрального (внешнее эжектирование) и кольцевого (внутреннее эжектирование) типов имеются достаточно существенные различия. Прежде всего, в установках с кольцевым эжектором (см. рис. 1-Б) отсутствуют потери скорости эжектирующего потока, связанные с гидравлическим ударом воздушного потока о стенки транспортного трубопровода [1 – 3]. Поэтому численное значение этого коэффициента для закладочных установок с кольцевым эжектором может находиться в диапазоне от 0,05 до 0,3 и зависит от конструктивных характеристик эжектора и характера его стыковки с транспортным трубопроводом [3].

Термин «угол взаимодействия между эжектируемым и эжектирующим потоками воздуха γ » подразумевает рассмотрение локального угла между векторами скорости $\vec{u}_{э, cp}$ и $\vec{u}_{с, cp}$ потоков воздуха на поверхности их тангенциального разрыва, отсчитываемый в плоскости по направлению движения до точки взаимодействия векторов скорости (см. рис. 1). В общем случае значение этого угла определяется в зависимости от угла ϕ расширения эжектирующего потока и угла ϵ наклона оси кольцевой щели эжектора к оси транспортного трубопровода (см. рис. 2). Численные значения угла γ и его влияние на потери кинетической энергии при смешивании эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха в кольцевом эжекторе проанализированы в работах [2, 3].



1 – загрузочная воронка; 2 – кольцевое эжекторное устройство;

3 – транспортный трубопровод; 4 – воздухоподводящий трубопровод

Рисунок 2 – Принципиальная схема взаимодействия воздушных потоков в трубопроводных системах пневмотранспорта с кольцевым эжекторным устройством

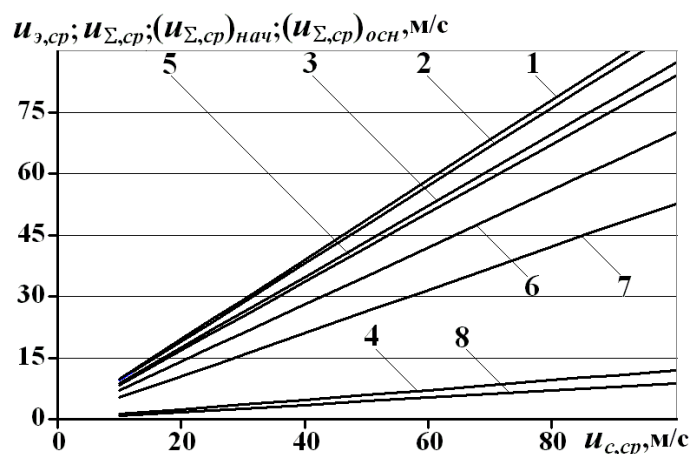
Согласно положениям, принятым в теории турбулентных струй, угол ϕ расширения эжектирующего потока – это угол между поверхностью тангенциаль-

ного разрыва и осью аппарата, из которого происходит истечение потока газа. Величина этого угла (см. рис. 2) есть величина постоянная и, согласно результатам многочисленных исследований различных авторов, равная $\phi \cong 14^\circ$.

Под углом ε наклона оси кольцевой щели эжектора к направлению транспортирования подразумевается угол между осью кольцевой щели эжектора и осью транспортного трубопровода, отсчитываемый по часовой стрелке от оси транспортного трубопровода в направлении движения (см. рис. 2).

Система равенств (1) – (5) достаточно точно описывает распределение скоростей воздушных потоков при режиме работы эжекторных устройств без наличия твердых частиц. При этом, равенство (5) применяется при наличии диффузорной обечайки, соединяющей смесительную камеру эжектора с транспортным трубопроводом. Для пневмотранспортных систем с кольцевым эжектором, где зона смешения располагается непосредственно в начале транспортного трубопровода (см. рис. 1-Б), скорость $u_{mp,cp}$ принимается равной $u_{\Sigma,cp}$, которая определяется соотношением (4).

На рис. 3 приведены расчетные зависимости скоростей воздушных потоков в трубопроводных системах пневмотранспорта с кольцевым эжектором, построенные по формулам (1) – (4) для $\chi_\varepsilon = 0,05$ и $\chi_\varepsilon = 0,3$ при $\varepsilon = 0$ и $\gamma = \phi = 14^\circ$.



- 1, 5 – зависимости скорости $u_{\Sigma,cp}$ смешанного потока воздуха при $\chi_\varepsilon = 0,05$ (1) и $\chi_\varepsilon = 0,3$ (5);
 2, 6 – зависимости скорости $(u_{\Sigma,cp})_{нач}$ воздушного потока на начальном участке при $\chi_\varepsilon = 0,05$ (2) и $\chi_\varepsilon = 0,3$ (6); 3, 7 – зависимости скорости $(u_{\Sigma,cp})_{осн}$ воздушного потока на основном участке при $\chi_\varepsilon = 0,05$ (3) и $\chi_\varepsilon = 0,3$ (7);
 4, 8 – зависимости скорости $u_{э,cp}$ эжектируемого потока воздуха при $\chi_\varepsilon = 0,05$ (4) и $\chi_\varepsilon = 0,3$ (8)

Рисунок 3 – Расчетные зависимости средних скоростей воздуха от скорости истечения сжатого воздуха из кольцевого эжектора

Как следует из анализа распределения скоростей воздушных потоков в трубопроводных системах с кольцевым эжектором (см. рис. 3):

– численное значение осредненных скоростей воздушной фазы аэроэмульсии в установках с кольцевым эжектором увеличивается с уменьшением потерь кинетической энергии воздушного потока (зависимости 1– 4 и 5 – 8);

– различия между скоростями смешанного потока по длине зоны смешивания при уменьшении потерь кинетической энергии воздушного потока становятся менее существенными (зависимости 1– 3 и 5 – 7).

При пневмотранспортировании по трубопроводным системам с кольцевым эжектором дисперсных сыпучих материалов (горной породы) необходимо рассмотреть движение двухфазного потока аэросмеси, режимы которого могут быть синхронным или асинхронным.

Синхронный или близкий к нему режим пневмотранспортирования горной породы пневмотранспортными системами с кольцевым эжектором характеризуется равенством скоростей движущихся фаз аэросмеси и может достигаться в следующих случаях:

- пылеобразные частицы транспортируются со скоростью равной скорости воздушного потока и двухфазный поток аэросмеси условно можно считать однородным;

- частицы мелкой фракции аэросмеси транспортируются воздушным потоком, скорость которого превышает значение, необходимое для перемещения транспортируемого материала во взвешенном состоянии;

- транспортирование сыпучего материала, в том числе крупнокусковых и плохообтекаемых частиц, осуществляется без взаимодействия частиц между собой и со стенками транспортного трубопровода;

- потери энергии обусловлены только аэродинамическими силами.

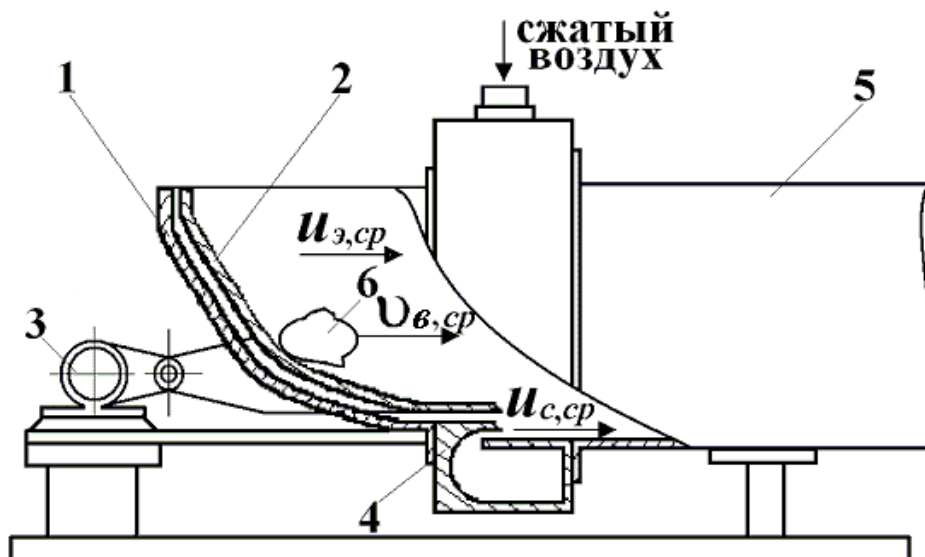
Асинхронный режим пневмотранспортирования сыпучих материалов пневмотранспортными установками с кольцевым эжектором характеризуется различиями в скоростях воздушной и твердой фаз аэросмеси. Степень асинхронности двухфазного потока характеризуется коэффициентом скольжения или коэффициентом относительной скорости движения аэросмеси φ , определяемым как

$$\varphi = (u_{в,ср} - v_{т,ср}) / u_{в,ср} \quad (6)$$

где $u_{в,ср}$ и $v_{т,ср}$ – осредненные по площади значения скоростей воздушного потока и транспортируемого материала на соответствующих участках транспортного трубопровода, м/с.

Анализ режимов движения аэросмеси в трубопроводных системах пневмотранспорта эжекторного типа выполним на примере работы вибропневмотранспортной машины (ВПМ) с кольцевым эжектором. Данный вид оборудования, в котором применен виброаэродинамический способ загрузки сыпучего материала в транспортный трубопровод, разрабатывается ИГТМ НАН Украины на протяжении длительного периода времени для транспортирования горной породы в различных технологиях горного производства [1, 2]. Принципиальная схема ВПМ с кольцевым эжектором представлена на рис. 4.

Загружаемая в ВПМ горная порода совместно с эжектируемым из атмосферы воздухом под действием сил гравитации первоначально попадает на виброток, совершающий гармонические колебания, затем благодаря вибрационному воздействию приводится в вибровзвешенное состояние.



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

Получив на вибрлотке ВПМ определенную начальную скорость $v_{в,ср}$ в направлении транспортирования перемещаемый материал увлекается эжектируемым потоком воздуха в транспортный трубопровод, в котором осуществляется его перемещение скоростным напором сжатого воздуха.

Рассмотрим поэтапное движение горной породы по отдельным участкам ВПМ с кольцевым эжектором (см. рис. 2 и рис.4).

Этап 1. В загрузочной зоне ВПМ при движении горной породы по вибрлотку установки $u_{в,ср} = u_{э,ср}$ и $v_{т,ср} = v_{в,ср}$, при этом для пылеобразных частиц $u_{э,ср} = v_{т,ср}$ и для остальных фракций твердой фазы аэросмеси $u_{э,ср} \geq v_{т,ср}$. Следовательно, в этой зоне параллельно реализуются синхронный ($\varphi = 0$) и асинхронный ($\varphi > 0$) режимы движения аэросмеси. Такая картина движения аэросмеси характерна для транспортирования ВПМ горной породы в установившемся режиме, однако, при прекращении процесса эжектирования и образовании закупорок транспортного трубопровода с возникновением обратного потока аэросмеси в загрузочной зоне возможен асинхронный режим движения аэросмеси с $\varphi < 0$;

Этап 2. В зоне разрежения кольцевого эжектора происходит ускорение эжектируемого потока воздуха и выравнивание газодинамических параметров воздушных потоков, скорости которых $u_{в,ср} \geq v_{т,ср}$. В этой зоне ВПМ возможны как синхронный (для пылевидных частиц и мелких фракций транспортируемой породы), так и асинхронный режимы движения аэросмеси. При этом, коэффициент скольжения может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Это обстоятельство обусловлено тем, что именно в этой зоне может начинаться образование обратного потока аэросмеси.

Этап 3. В начале транспортного трубопровода ВПМ после выравнивания газодинамических параметров эжектируемого и эжектирующего потоков воздуха $u_{в,ср} = u_{с,ср} \geq v_{т,ср}$ в зависимости от фракционного состава транспортируемой

породы. На этом участке ВПМ возможны также как синхронный, так и асинхронный с $\varphi > 0$ режимы движения аэросмеси.

Движение аэросмеси в ВПМ с кольцевым эжектором в асинхронном режиме характеризуется:

– при $\varphi > 0$ торможением набегающего воздушного потока о поверхность частиц транспортируемой породы. Параметры воздушной фазы аэросмеси со стороны "лобовой" части обтекаемых поверхностей отличаются от параметров непосредственно в потоке. По принятым в газодинамике положениям состояние воздушной фазы аэросмеси характеризуется параметрами торможения и характеризуется в общем случае повышением давления и температуры. Передача энергии происходит от воздушной фазы аэросмеси к твердой, а за счет аэродинамической силы, действующей на твердую фазу аэросмеси по потоку в осевом направлении, происходит ускорение частиц транспортируемой породы. В результате этого асинхронный режим движения аэросмеси стремится к синхронному.

– при $\varphi < 0$ обтеканием частиц транспортируемой породы воздушной фазой аэросмеси, параметры которой определяются параметрами торможения. В этом случае передача энергии происходит от твердой фазы аэросмеси к воздушной, а за счет аэродинамической силы, которая действует на твердую фазу аэросмеси по потоку в осевом направлении и является силой сопротивления, происходит торможение частиц транспортируемой породы. В результате этого асинхронный режим движения аэросмеси также приближается к синхронному.

При движении аэросмеси на загрузочном участке ВПМ с кольцевым эжектором ее начальная и конечная (в начале транспортного трубопровода) кинетическая энергия соответственно равны:

$$E_{\text{вх}} = G_m \frac{v_{\text{в,ср}}^2}{2} + G_э \frac{u_{\text{э,ср}}^2}{2}; \quad E_{\text{вых}} = G_m \frac{v_{\text{м,ср}}^2}{2} + G_в \frac{u_{\text{в,ср}}^2}{2},$$

где $E_{\text{вх}}$ и $E_{\text{вых}}$ – соответственно значения кинетической энергии аэросмеси на загрузочном участке ВПМ и в начале транспортного трубопровода ВПМ, Дж; G_m , $G_э$ и $G_в$ – массовые секундные расходы соответственно транспортируемой породы, эжектируемого из атмосферы воздуха и воздушного потока в транспортном трубопроводе, кг/с.

Тогда коэффициент рассеивания кинетической энергии аэросмеси на загрузочном участке ВПМ с кольцевым эжектором будет равен

$$\chi_a = \left[G_m (v_{\text{м,ср}}^2 - v_{\text{в,ср}}^2) + G_в u_{\text{в,ср}}^2 - G_э u_{\text{э,ср}}^2 \right] / (G_c u_{\text{с,ср}}^2), \quad (7)$$

где χ_a – коэффициент рассеивания кинетической энергии аэросмеси по сравнению с кинетической энергией подаваемого сжатого воздуха.

На основании закона сохранения массы $G_в = G_э + G_c$. Тогда равенство (7) можно переписать в виде

$$\chi_a = \left[\mu (v_{m,cp}^2 - v_{\sigma,cp}^2) + u_{\Sigma,cp}^2 - \eta u_{\varepsilon,cp}^2 \right] / \left[(1 - \eta) u_{c,cp}^2 \right], \quad (8)$$

где $\mu = G_m/G_\sigma$ и $\eta = G_\varepsilon/G_\sigma$ – массовые концентрации соответственно твердой фазы и эжектируемого из атмосферы воздуха.

С учетом равенств (1) и (3) уравнение (8) будет иметь вид

$$\chi_a = \frac{1}{1 - \eta} \left\{ \mu \frac{v_{m,cp}^2 - v_{\sigma,cp}^2}{u_{c,cp}^2} + \left[1 - 0,5\chi_\sigma (1 + \chi_\sigma tg\gamma) \right]^2 - 0,25\eta(1 - \chi_\sigma)^2 tg^2\gamma \right\}. \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет оценить энергетические потери сжатого воздуха на загрузочном участке ВПМ с кольцевым эжектором с учетом технологических параметров (η , μ , $v_{m,cp}$) и режимов ($v_{\sigma,cp}$, $u_{c,cp}$, χ_σ , γ) работы данного вида оборудования.

Анализ равенства (9) показывает, что наиболее существенное влияние на рассеивание кинетической энергии аэросмеси в вибропневмотранспортных установках с кольцевым эжектором оказывают массовая концентрация аэросмеси, скорости истечения сжатого воздуха и пневмотранспортирования перемещаемого сыпучего материала. При этом рассеивание энергии снижается с уменьшением численного значения параметров, характеризующих движение твердой фазы аэросмеси, и с ростом значений параметров истечения подаваемого сжатого воздуха.

Остальные параметры, входящие в формулу (9), в силу их незначительных величин оказывают менее существенное влияние на рассеивание кинетической энергии аэросмеси в загрузочной зоне ВПМ.

Величину массовой концентрации в аэросмеси эжектируемого атмосферного воздуха, которая входит в уравнение (9), можно оценить по отношению объемных расходов. Тогда, воспользовавшись равенствами (1) и (4), а также, пренебрегая различиями в плотностях воздушных потоков и соответствующих проходных сечений, приближенно будем иметь:

$$\eta \approx 0,5 \frac{(1 - \chi_\sigma) tg\gamma}{1 - 0,5\chi_\sigma (1 + \chi_\sigma tg\gamma)}. \quad (10)$$

Как было показано выше, для ВПМ с кольцевым эжектором коэффициент рассеивания энергии воздушного потока χ_σ находится в диапазоне от 0,05 до 0,3. Тогда для этих установок с $\gamma = 14^\circ$ коэффициент массовой концентрации эжектируемого атмосферного воздуха в соответствии с равенством (10) будет составлять соответственно 0,12-0,1.

Учитывая диапазоны изменения параметров, входящих в уравнение (9), для качественного анализа рассеивания кинетической энергии сжатого воздуха это равенство приближенно можно представить в виде

$$\chi_a \approx 1,11 \left(\mu \frac{v_{m,cp}^2 - v_{в,ср}^2}{u_{с,ср}^2} + 1 \right). \quad (11)$$

Поскольку $v_{m,cp} \geq v_{в,ср}$ для всех рассмотренных выше режимов транспортирования аэросмеси, то χ_a всегда будет больше 1. Это обстоятельство объясняет ограниченные возможности трубопроводных систем пневмотранспорта эжекторного типа по сравнению с другими видами пневмотранспортного оборудования, например, камерного или барабанного.

Согласно анализу равенства (11) повышение эффективности работы эжекторных вибропневмотранспортных систем за счет уменьшения рассеивания энергии подводимого сжатого воздуха в загрузочной зоне возможно:

– с уменьшением массовой концентрации аэросмеси, но удельный расход сжатого воздуха при этом будет явно завышенным и пропускная способность транспортного трубопровода не будет полностью реализована;

– интенсификацией процесса загрузки транспортируемого материала, что возможно в ВПМ с кольцевым эжектором как за счет более высокой скорости вибротранспортирования, так и за счет увеличения эжекторных характеристик данного вида оборудования.

Для анализа влияния межфазного взаимодействия на рассеивание кинетической энергии воздушного (несущего) потока в ВПМ с кольцевым эжектором уравнение (11) при помощи равенства (6) запишем в виде

$$\chi_a \approx 1,11 \left[\mu \frac{u_{в,ср}^2}{u_{с,ср}^2} (1 - \varphi)^2 - \mu \frac{v_{в,ср}^2}{u_{с,ср}^2} + 1 \right]. \quad (12)$$

Рассмотрим полученную зависимость (12) для соответствующих этапов движения аэросмеси в ВПМ с кольцевым эжектором.

Этап 1. В загрузочной зоне ВПМ при равенстве скоростей $u_{в,ср} = u_{э,ср}$, которая определяется по уравнению (1), зависимость (12) будет иметь вид:

$$\chi_a \approx 1,11 \left[0,25\mu(1 - \chi_э)^2 (1 - \varphi)^2 \operatorname{tg}^2 \gamma - \mu \frac{v_{в,ср}^2}{u_{с,ср}^2} + 1 \right]; \quad (13)$$

Этап 2. В зоне разрежения эжектора при равенстве скоростей $u_{в,ср} = (u_{\Sigma,ср})_{осн}$, которая определяется по уравнению (3), зависимость (12) будет иметь вид:

$$\chi_a \approx 1,11 \left[\mu(1 - \chi_э)^2 (1 - \varphi)^2 - \mu \frac{v_{в,ср}^2}{u_{с,ср}^2} + 1 \right]; \quad (14)$$

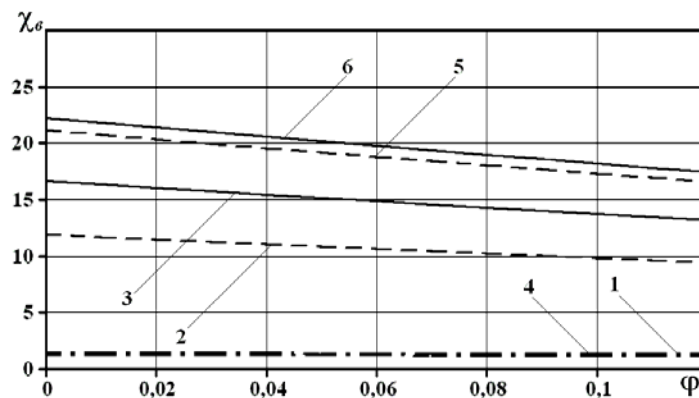
Этап 3. В начале транспортного трубопровода при равенстве скоростей $u_{в,ср} = u_{\Sigma,ср}$, которая определяется по уравнению (4), зависимость (12) будет иметь вид:

$$\chi_a \approx 1,11 \left\{ \mu \left[1 - 0,5\chi_g (1 + \chi_g \operatorname{tg}\gamma) \right]^2 (1 - \varphi)^2 - \mu \frac{v_{g,cp}^2}{u_{c,cp}^2} + 1 \right\}. \quad (15)$$

В теории пневмотранспортирования сыпучих материалов трубопроводными системами общепринято принимать $\mu \leq 20$. Кроме этого, в результате многочисленных экспериментальных исследований режимов движения аэросмеси по трубопроводу А.Е. Смолдыревым было установлено, что коэффициент скольжения фаз аэросмеси находится в диапазоне $0,02 \leq \varphi \leq 0,12$. С учетом этого на рис. 5 представлены расчетные зависимости коэффициента рассеивания кинетической энергии подаваемого сжатого воздуха от коэффициента скольжения фаз аэросмеси.

Зависимости, приведенные на рис. 5, построены по уравнениям (13) – (15) для следующих значений параметров: $\mu \leq 20$; $v_{g,cp} = 0,5$ м/с; $u_{c,cp} = 60$ м/с; $\gamma = 14^\circ$; $\chi_g = 0,3$ и $0,05$. Анализ построенных зависимостей показывает, что существенных различий в рассеивании энергии аэросмеси в начале загрузочной зоны ВПМ для рассматриваемых режимов работы ВПМ не наблюдается, а в зоне разрежения кольцевого эжектора и в начале транспортного трубопровода рассеивание энергии более существенно. При этом как для синхронного ($\varphi = 0$), так и для асинхронного ($\varphi > 0$) движения аэросмеси:

- рассеивание энергии аэросмеси увеличивается с увеличением рассеивания энергии воздушной фазы аэросмеси;
- рассеивание энергии аэросмеси уменьшается с ростом коэффициента скольжения несущей (воздушной) и несомой (твердой) фазы аэросмеси, что справедливо на всех этапах движения аэросмеси.



1, 2, 3 – для $\chi_g = 0,3$; 4, 5, 6 – для $\chi_g = 0,05$;

сплошные линии – для движения аэросмеси в начале транспортного трубопровода;

пунктирные линии – для движения аэросмеси в зоне разрежения эжектора;

штрихпунктирные линии – для движения аэросмеси в зоне загрузки ВПМ

Рисунок 5 – Расчетные зависимости коэффициента рассеивания энергии воздушного потока от коэффициента скольжения фаз аэросмеси

Таким образом, результаты изложенных выше исследований сводятся к следующему:

– в физической картине взаимодействия потоков воздуха в эжекторных установках с кольцевым и центральным сопловым устройством присутствуют существенные отличия;

– эффективность работы трубопроводных систем пневмотранспорта эжекторного типа зависит от величины потерь энергии воздушного потока в загрузочной зоне;

– для снижения энергетических потерь в загрузочной зоне пневмотранспортных систем с кольцевым эжектором скольжение воздушной и твердой фазы аэросмеси должно быть минимально возможным, а процесс загрузки транспортируемого материала должен быть максимально интенсифицирован;

– уменьшение потерь энергии воздушного потока и повышение эффективности трубопроводных вибропневмотранспортных систем с кольцевым эжектором достигается за счет рациональных параметров комплексного виброаэродинамического воздействия на загружаемый материал.

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. Использование эжекторных закладочных машин в технологиях горного производства / А.И. Волошин, А.И. Коваль, С.Н. Пономаренко // Уголь Украины. – 2011.- № 4. – С.40 – 44.
3. Пономаренко, С.Н. Определение потерь энергии на смешивание потоков воздуха в транспортном трубопроводе вибропневмотранспортных машин / С.Н. Пономаренко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр./ ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012.– Вып.101.– С.193–198.

REFERENCES

1. Poturayev, V.N., Bulat, A.F., Voloshyn, A.I., Ponomarenko, S.N. and Voloshyn, A.A. (2001), *Mekhanika vibratsionno-pnevmaticheskikh mashin ezhektornogo tipa* [Mechanics vibration-pneumatic machine the ejector type], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Voloshyn, 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.
3. Ponomarenko, S.N. (2012), " Determination of losses of energy on mixing of blasts in a transport pipeline of vibro-pneumonic-transport machines", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no.101, pp. 193–198.

Об авторах

Волошин Алексей Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Украины, заместитель директора института по научной работе, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, worldlab.eg@gmail.com.

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

Игнатович Юрий Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела вибропневмотранспортных систем и комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина.

About the authors

Voloshyn Alexei Ivanovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Deputy Director of the institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, worldlab.eg@gmail.com.

Ponomarenko Sergei Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of department of vibropneumotransportation systems and complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, ponomarenko@ua.fm.

Ignatovich Yuriy Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Senior Researcher of department of vibropneumotransportation systems and complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine,

Анотація. Стаття спрямована на дослідження параметрів і режимів руху аеросуміші на завантажувальній ділянці трубопровідних систем пневмотранспорту з кільцевим ежектором.

Наведено характерні особливості взаємодії потоків повітря на змішувальній ділянці кільцевого ежектора. Виконано аналіз синхронних і асинхронних режимів руху аеросуміші на завантажувальній ділянці вібропневмотранспортних систем з кільцевим ежектором. Одержано залежність для визначення коефіцієнту розсіювання кінетичної енергії аеросуміші з урахуванням технологічних та режимних параметрів роботи обладнання даного типу.

У статті запропоновано новий підхід до розгляду втрат енергії на різних ділянках завантажувальної зони вібропневмотранспортних систем з кільцевим ежектором. Показано вплив на енергетичні втрати повітряного потоку різних режимів руху аеросуміші в завантажувальній зоні вібропневмотранспортних систем ежекторного типу. Отримані результати можуть бути застосовані при розрахунку та проектуванні завантажувальних пристроїв пневматичних трубопровідних систем, у тому числі обладнання для пневматичної закладки виробленого простору шахт.

Ключові слова: аеросуміш, сипкий матеріал, кільцевий ежектор, пневмотранспорт, коефіцієнт розсіювання енергії.

Abstract. This article studies parameters and modes of air mixture flowing in the feed sector of pipeline systems in the pneumatic transport with annular ejector.

Defining characteristics of interaction between air flows in the mixing sector of the annular ejector are shown. Synchronous and asynchronous modes of air mixture motion in the feed sector of the vibro-pneumatic transport systems with an annular ejector is analyzed. Dependence was established for determining coefficient of kinetic energy dispersion of the air mixture with taking into account technological and operational parameters of this type equipment.

This article proposes a new approach for determining energy losses in different parts of the feed sector of the vibro-pneumatic transport systems with an annular ejector. Impact of the different modes of air mixture flowing in the feed sector of the vibro-pneumatic ejector-type transport systems on the energy loss of the air streams is shown.

The findings can be used for calculating and designing feeding equipment for the pneumatic pipeline systems including equipment for pneumatic stowing of the mine goaf.

Keywords: air mixture, loose material, annular ejector, pneumatic transport, energy dissipation coefficient.

Стаття постуила в редакцію 12.11. 2013

Рекомендовано к публікації д-ром техн. наук В.П. Надутым

УДК 622. 62: 625.151.3: 625.14

В.В. Говоруха, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ И НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ И СЪЕЗДОВ
ГОРНОГО ТРАНСПОРТА**

В.В. Говоруха, канд. техн. наук, ст. науч. співроб.
(ИГТМ НАН Украины)

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ І НАПРУЖЕНОГО СТАНУ
СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ ТА З'ЇЗДІВ
ГІРНИЧОГО ТРАНСПОРТУ**

V.V. Govorukha, Ph.D (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

**RESEARCH OF LOAD CAPACITY AND STRESS STATE OF POINT
SWITCHES AND RAMPS OF MINE TRANSPORT**

Аннотация. Проведены экспериментально-теоретические исследования нагруженности и напряженного состояния составных частей стрелочных переводов и съездов горного транспорта. Цель исследований – определение влияния нагрузок от подвижного состава на напряжения в элементах конструкции стрелочных переводов и съездов. Представлен экспериментально-расчетный метод исследования нагруженности и напряженного состояния стрелочных переводов и съездов от воздействия подвижного состава. Расчетные формулы основаны на базе экспериментальных исследований в шахтных условиях, где установлены фактические нагрузки от воздействия подвижного состава, а также нагрузки и напряжения в отдельных элементах конструкции. Скорость движения поездов, нагрузки и напряжения определялись с использованием тензометрической аппаратуры, включая силомерные подрельсовые подкладки и тензодатчики напряжений. Результаты экспериментальных исследований обработаны методами математической статистики с учетом многомерного распределения Пуассона и стандартизованной величины нормальных отклонений. Экспериментально-теоретические исследования позволили определить значения коэффициентов динамичности воздействия опытного подвижного состава на стрелочные переводы и съезды, напряжения в элементах конструкции, а также определить их зависимости от величины скоростей движения отдельных подвижных единиц поезда. Результаты проведенных исследований использованы для разработки исходных технических требований на создание стрелочной продукции горных предприятий.

Ключевые слова: стрелочные переводы и съезды, горный транспорт, нагруженность, напряжения.

Введение. Прочность и несущая способность стрелочных переводов и съездов определяет реализацию возможностей подвижного состава и технических характеристик локомотивов и вагонов.

Повышению технического уровня и совершенствованию конструкции стрелочной продукции предшествует разработка методов расчета нагруженности от