

**Волошин А.И.**, чл. - корр. НАН Украины,  
**Пономаренко С.Н.**, канд. техн. наук (ИГТМ им. Н.С.Полякова НАН Украины)

### **УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ДЛЯ ЗОНЫ СМЕШИВАНИЯ АЭРОСМЕСИ В КОЛЬЦЕВОМ ЭЖЕКТОРЕ ТРУБОПРОВОДНОЙ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ**

*Отримано рівняння балансу енергії для зони змішування аеросуміші в кільцевому ежекторі трубопровідної пневмотранспортної установки. Рівняння враховує взаємозв'язок тиску, швидкостей і витратних характеристик потоку аеросуміші. Крім того, враховані характеристики виду сипкого матеріалу, що транспортується, які впливають на параметри пневмотранспортування. Отримана форма рівняння енергії дозволяє максимально точно описувати фізичну картину змішування потоків аеросуміші в кільцевому ежекторі трубопровідної пневмотранспортної установки.*

*Получено уравнение баланса энергии для зоны смешивания аэросмеси в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки. Уравнение учитывает взаимосвязь давления, скоростей и расходных характеристик потока аэросмеси. Кроме этого, учтены характеристики вида транспортируемого сыпучего материала, влияющие на параметры пневмотранспортирования. Полученная форма уравнения энергии позволяет максимально точно описывать физическую картину смешивания потоков аэросмеси в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки.*

*Received the equation of the energy balance for the mixing zone of the airmixture in the ring injector of the pipeline pneumotransport installation. The equation takes into account the interlink between pressure, speed and running characteristics of the airmixture stream. Except this, taken into account the characteristics of the transported loose material, influencing the parameters of the pneumotransportation. Received formula of the energy equation allows with maximum point to describe the physical picture of the stream airmixture combination in the ring injector of the pipeline pneumatransport installation.*

**КС:** *пневмотранспортная трубопроводная установка, эжектор, баланс энергии, уравнение, аэросмесь, смешивание, давление, скорость, расходные характеристики.*

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Основной проблемой, сдерживающей широкое промышленное применение трубопроводных пневмотранспортных систем эжекторного типа, являются значительные энергетические потери воздуха при его истечении из соплового аппарата. Эти потери обусловлены как гидравлическими потерями на трение, так и потерями на смешивание потоков аэросмеси в зоне смешивания эжектора. В связи с этим возникает актуальная необходимость более досконального исследования физической картины взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков аэросмеси в эжекторных установках, которые применяются для пневмотранспортирования различного вида сыпучих материалов трубопроводными системами.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Анализ последних достижений в области трубопроводного пневмотранспорта показывает, что кольцевые эжекторные устройства успешно применяются для пневмотранспортирования различного рода сыпучих материалов. Эти установки позволяют эффективно решать различные технологические задачи, в том числе в горнодобывающей промышленности при ведении горных работ с закладкой породой выработанного пространства шахт [1, 2].

Существующие методы расчета характеристик газовых (воздушных) эжекторов сориентированы, в основном, на применение газодинамических функций с учетом параметров торможения, характеризующих критический режим движения воздуха [3, 4]. Это значительно

упрощает расчеты для сверхзвуковых и близких к звуковым режимов работы эжектора. В то же время применение газодинамических функций для дозвуковых режимов работы эжектора (особенно при наличии пневмотранспортируемого твердого материала в зоне смешивания аэросмеси) весьма затруднительно. Кроме этого, существующие методы расчета газовых эжекторов, в основном, рассматривают физические процессы, происходящие в эжекторах с центральным сопловым устройством.

Как показали выполненные в ИГТМ им. Н.С.Полякова НАН Украины исследования, в физической картине взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков газа в эжекторах центрального (внешнее эжектирование) и кольцевого (внутреннее эжектирование) типов существуют достаточно существенные различия [1 – 4]. Эти различия нашли свое отражение в материалах научного открытия, которое подтверждено дипломом Российской Академии естественных наук, Международной академии авторов научных открытий и изобретений (№ 423 от 02.12.2011 г.).

**Целью** данной работы является исследование физики процесса смешивания потоков аэросмеси в зоне их смешивания в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки. В соответствии с поставленной целью в работе рассмотрена задача получения уравнения энергетического баланса для смешивания потоков воздуха и транспортируемого сыпучего материала на основе применения основных положений прикладной газовой динамики.

**Изложение материала исследований.** Одной из отличительных особенностей взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки является то, что [2, 5]:

- истечение эжектирующего потока воздуха из кольцевого эжектора происходит в виде несвободной турбулентной струи, имеющей форму полого цилиндра;
- внутри этого цилиндра за счет аксиального охвата эжектируемого воздушного потока и эжектирующим потоком формируется турбулентный пограничный слой поверхности тангенциального разрыва в виде конической поверхности, направленной своей вершиной *C* (рис. 1) в сторону движения воздушных потоков, по которой происходит выравнивание скоростей воздушных потоков.

Рассмотрим в неподвижной системе координат плоскую задачу об энергетическом балансе установившегося движения аэросмеси в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки с цилиндрической камерой смешения. Выберем некоторый участок движения аэросмеси между двумя нормальными (рис. 1) к цилиндрической поверхности потока аэросмеси сечениями *A-A* (начало зоны смешивания, определяемой срезом кольцевой щели эжектора) и *B-B* (конец зоны смешивания потоков, которая проходит через точку *C*).

Для цилиндрической камеры смешения аэросмеси в кольцевом эжекторном устройстве справедливы следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} S_1 = S_c + S_3 = \pi(R^2 - r^2) + \pi r^2 = S_2 = \pi R^2 \\ R - r = h \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $S_1$ ,  $S_c$ ,  $S_3$  и  $S_2$  – соответственно площади поперечных сечений *A-A*, среза кольцевой щели эжектора, входа эжектируемого потока аэросмеси в эжектор и камеры смешения (сечение *B-B*) эжектора,  $m^2$ ;  $\pi=3,14$ ;  $R$  – радиус цилиндрической камеры смешения эжектора, м;  $r$  – радиус начального сечения зоны эжектирования, м;  $h$  – ширина кольцевой щели соплового устройства эжектора, м.

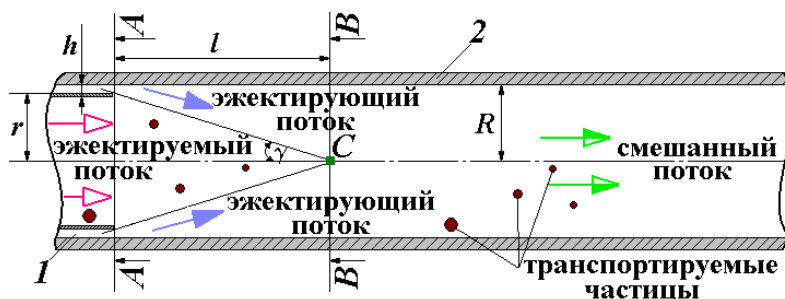


Рис. 1. Схема распределения потоков аэросмеси в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки: 1 – кольцевая щель эжекторного устройства; 2 – транспортный трубопровод

В общем случае уравнение сохранения энергии (энергетического баланса) для воздушного потока согласно первому началу термодинамики (закону сохранения энергии) в дифференциальной форме имеет вид [3]

$$dE_m + dE_\delta = dE_k + dE_n + dE_M + dE_{mp}, \quad (2)$$

где  $dE_m$  – изменение подводимой тепловой энергии, Дж;  $dE_\delta$  – изменение энергии сил давления, под действием которых происходит перемещение аэросмеси между сечениями  $A-A$  и  $B-B$ , Дж;  $dE_k$  и  $dE_n$  – соответственно изменения кинетической и потенциальной энергии воздушного потока, Дж;  $dE_M$  и  $dE_{mp}$  – соответственно изменения энергии, затраченной на выполнение механической работы и преодоление сил трения, Дж.

Приток тепла в общем случае осуществляется двумя способами: извне (за счет теплообмена при наличии разности температур) и изнутри (за счет преобразования в тепло работы сил трения). Пренебрегая различиями температур эжектируемого и эжектирующего потоков воздуха с температурой окружающей среды (теплообмен отсутствует), можно считать, что  $dE_m = dE_{mp}$ . При этом работа сил трения выполняется:

- при движении потока аэросмеси вдоль стенок камеры смешения;
- при смешивании эжектирующего и эжектируемого потоков в зоне смешивания аэросмеси в эжекторе.

Изменение энергии, вносимой силами давления аэросмеси на рассматриваемом участке цилиндрической камеры смешения, состоит из суммы изменений энергии (рис. 1):

- эжектирующего потока воздуха (внутри объема полого цилиндра), при этом площадь поперечного сечения потока изменяется от  $S_c$ , до  $S_2$ ;
- эжектируемого потока воздуха (в объеме конуса, расположенного внутри полого цилиндра), при этом площадь поперечного сечения потока изменяется от  $S_3$ , до 0.

Как было показано в работе [3], на участке зоны смешения кольцевого эжектора для промежутка времени  $d\tau$ , в течение которого происходит смешивание эжектирующего и эжектируемого потоков аэросмеси, справедливо следующее соотношение:

$$dE_\delta = dE_\delta^c + dE_\delta^3 = (P_c S_c u_c + P_3 S_3 u_3 - P_{cm} S_2 u_{cm}) d\tau, \quad (3)$$

где  $E_\delta^c$  и  $E_\delta^3$  – энергии, вносимые соответственно давлением эжектирующего и эжектируемым потоками воздуха, Дж;  $P_c$ ,  $P_3$  и  $P_{cm}$  – статические давления соответственно эжектирующего, эжектируемого (рис. 1, сечение  $A-A$ ) и смешанного (рис. 1, сечение  $B-B$ ) потоков воздуха, Па;  $u_c$ ,  $u_3$  и  $u_{cm}$  – осредненные по сечению скорости соответственно эжектирующего, эжектируемого (рис. 1, сечение  $A-A$ ) и смешанного (рис. 1, сечение  $B-B$ ) потоков воздуха, м/с;  $\tau$  – время, с.

Кинетическая энергия воздушного потока в сечении  $A-A$  (рис. 1) равна сумме кинетических энергий эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха [3, 4]. Тогда изменение кинетической энергии воздушного потока будет равно

$$dE_k = m_c u_{6c} du_{6c} + m_3 u_{63} du_{63}, \quad (4)$$

где  $m_c$  и  $m_3$  – массы соответственно эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха, кг;  $u_{6c}$  и  $u_{63}$  – скорости соответственно эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха в зоне их смешения, м/с.

Изменение потенциальной энергии воздушного потока равно

$$dE_n = (m_c + m_3) dz,$$

где  $dz$  – изменение нивелирных уровней рассматриваемых сечений, м.

Для горизонтального расположения смесительной камеры смешения эжектора или выполненной с небольшим уклоном или подъемом с учетом незначительной длины камеры смешения эжектора  $dz \cong 0$  и  $dE_n \cong 0$ .

В кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки механическая работа воздушного потока затрачивается на перемещение транспортируемого сыпучего материала. В общем случае перемещение частиц сыпучего материала в трубопроводных пневмотранспортных системах происходит под действием следующих сил: аэродинамического сопротивления, веса, сил Магнуса – Жуковского, Сафмена и Архимеда [6].

Рассмотрим прямолинейное (без вращения) перемещение потока твердых частиц в горизонтальном направлении. Для данного режима движения силы Архимеда (учитывая разность плотностей воздуха и перемещаемого твердого материала), Сафмена (которая проявляется лишь для очень мелких частиц) и Магнуса – Жуковского (зависящей от угловой скорости вращения частиц) можно не учитывать [6].

Следовательно,

$$E_M = (F_\mu - f_{об}F_g)l = F_g(F_\mu/F_g - f_{об})l,$$

где  $F_\mu$  – сила аэродинамического сопротивления, Н;  $f_{об}$  и  $F_g$  – соответственно безразмерный коэффициент обобщенного сопротивления и вес перемещаемого сыпучего материала, Н;  $l$  – расстояние между рассматриваемыми сечениями, м, которое (рис. 1) равно:

$$l = \frac{r}{\operatorname{tg}\gamma} = \frac{R-h}{\operatorname{tg}\gamma}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – угол взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков аэросмеси, рассматриваемый локально по сечению, градус.

Термин «угол взаимодействия между эжектируемым и эжектирующим потоками воздуха  $\gamma$ », который необходимо рассматривать в локальном смысле, в общем случае определяется в зависимости от угла расширения эжектирующего потока и угла наклона оси кольцевой щели эжектора к оси транспортного трубопровода. Численное значение этого угла и его влияние на потери кинетической энергии при смешивании эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха в кольцевом эжекторе проанализированы авторами в работе [5].

В общем случае при определении коэффициента обобщенного сопротивления среды  $f_{об}$  необходимо учитывать фракционный состав перемещаемого сыпучего материала, его вес, липкость и проницаемость, силу трения с поверхностью пневмотранспортного устройства и действующие при транспортировании силы. Поэтому, учитывая сложность механизма действующих в эжекторе сил и неоднородность фракционного состава транспортируемого материала, получить точное численное значение коэффициента  $f_{об}$  расчетным путем не представляется возможным, и его, как правило, необходимо определять экспериментально для каждого конкретного случая.

В работе [1] было показано, что

$$F_\mu/F_g = (v_{om}/v_2)^{3/2} - f_{об},$$

где  $v_{om}$  – относительная скорость движения воздуха и транспортируемого материала, м/с;  $v_2$  – гидравлическая крупность частиц транспортируемого по трубопроводу сыпучего материала, м/с.

Гидравлическая крупность, которая имеет размерность скорости, по физическому смыслу представляет собой скорость падения частиц твердого материала в стоячей среде при определённой температуре. Она является одним из базисных понятий в теориях и рабочих гипотезах различных гравитационных процессов. Однако в связи с большим разбросом параметров частиц перемещаемого материала практикуются, в основном, экспериментальные методы определения величины  $v_2$  с применением эмпирических зависимостей (например, формулы Гончарова – Караушева).

Одним из вариантов определения значения  $v_2$  может быть вариант с применением формулы, приведенной в работе [7], т.е.

$$v_2 = \sqrt{\frac{\rho_M - \rho_S}{\rho_S \Psi} dfg},$$

где  $\rho_M$  и  $\rho_S$  – объемные плотности соответственно перемещаемого твердого материала и несущей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\Psi$  – безразмерный коэффициент сопротивления, зависящий от формы частицы и шероховатости ее поверхности;  $d$  – диаметр равновеликого (эквивалентного по объему) шара, м;  $f$  – безразмерный коэффициент формы (для шара  $f = 2/3$ );  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

В результате экспериментальных исследований по определению гидравлической крупности горных пород различной плотности, крупности и формы были установлены следующие значения коэффициента сопротивления [7]:

а)  $\psi = 0,5 \div 0,7$  – для дробленых горных пород различной плотности, близких по форме к кубу или параллелепипеду;

б)  $\psi = 0,4 \div 0,65$  – для хорошо окатанных частиц гравия и горных пород шарообразной или продолговатой формы;

в)  $\psi = 0,85 \div 1,0$  – для частиц гравия, близких по форме к пластинчатым и удлиненным.

Введем понятие взвешивания частиц транспортируемого материала в зоне смешивания эжекторного устройства, которое определяется безразмерным коэффициентом

$$k_{\text{эз}} = (v_{\text{ом}}/v_2)^{3/2} - f_{\text{об}}$$

и характеризует, как было показано выше, отношение силы аэродинамического сопротивления к силе веса транспортируемого материала.

С учетом вышеизложенного имеем

$$dE_M = F_g l dk_{\text{эз}}. \quad (6)$$

Принимая во внимание равенства (1) и (3) – (6), соотношение (2) можно представить в виде

$$\pi \left[ P_c u_c (R^2 - r^2) + P_3 u_3 r^2 + P_{\text{см}} u_{\text{см}} R^2 \right] d\tau = m_c u_{\text{эс}} du_{\text{эс}} + m_3 u_{\text{эз}} du_{\text{эз}} + m_M \frac{rg}{tg\gamma} dk_{\text{эз}},$$

где  $m_M$  – масса транспортируемого материала, кг,  
или

$$\pi \left[ (P_c u_c + P_{\text{см}} u_{\text{см}}) R^2 - (P_c u_c - P_3 u_3) r^2 \right] d\tau = m_c u_{\text{эс}} du_{\text{эс}} + m_3 u_{\text{эз}} du_{\text{эз}} + m_M \frac{rg}{tg\gamma} dk_{\text{эз}}.$$

Проинтегрировав это равенство в пределах зоны смешивания аэросмеси в эжекторе с учетом того, что в сечении *B-B* (в конце зоны смешивания, рис. 1) справедливы равенства скоростей  $u_c = u_3 = u_{\text{см}}$ , получим

$$\begin{aligned} & \pi \left[ (P_c u_c + P_{\text{см}} u_{\text{см}}) R^2 - (P_c u_c - P_3 u_3) r^2 \right] \tau = \\ & = (m_c + m_3) \frac{u_{\text{см}}^2}{2} - \frac{1}{2} (m_c u_c^2 + m_3 u_3^2) + m_M \frac{rg}{tg\gamma} (k_{\text{эз}}^{\text{к}} - k_{\text{эз}}^0), \end{aligned}$$

где  $k_{\text{эз}}^{\text{к}}$  и  $k_{\text{эз}}^0$  – безразмерные коэффициенты взвешивания частиц транспортируемого сыпучего материала соответственно в конце (сечение *B-B*) и в начале (сечение *A-A*) зоны смешивания аэросмеси в эжекторе.

Разделив обе части последнего равенства на  $\pi\tau$ , будем иметь

$$\begin{aligned} & (P_c u_c + P_{\text{см}} u_{\text{см}}) R^2 - (P_c u_c - P_3 u_3) r^2 = \\ & = \frac{1}{2\pi} (G_{\text{см}} u_{\text{см}}^2 - G_c u_c^2 - G_3 u_3^2) + G_M \frac{rg}{\pi tg\gamma} (k_{\text{эз}}^{\text{к}} - k_{\text{эз}}^0), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $G_{\text{см}} = (m_c + m_3)/\tau$ ,  $G_c = m_c/\tau$ ,  $G_3 = m_3/\tau$  и  $G_M = m_M/\tau$  – массовые секундные расходы соответственно смешанного, эжектирующего, эжектируемого воздушных потоков и транспортируемого по трубопроводу сыпучего материала, кг/с.

Введем обозначение

$$n = G_3/G_c = (G_{\text{см}} - G_c)/G_c = G_{\text{см}}/G_c - 1 = G_6^{y\partial} - 1; \quad G_M^{y\partial} = G_M/G_c,$$

где  $n$  – безразмерный коэффициент эжекции;  $G_6^{y\partial}$  и  $G_M^{y\partial}$  – удельные расходы соответственно воздуха и транспортируемого сыпучего материала на единицу массы подводимого сжатого воздуха, кг/с.

С учетом принятых обозначений равенство (7) можно представить в виде

$$\begin{aligned}
& (P_c u_c + P_{cm} u_{cm}) R^2 - (P_c u_c - P_3 u_3) r^2 = \\
& = G_c \left[ \frac{1}{2\pi} (G_6^{y\delta} u_{cm}^2 - u_c^2 - nu_3^2) + G_M^{y\delta} \frac{rg}{\pi tg \gamma} (k_{63}^k - k_{63}^0) \right] = \\
& = \frac{G_c}{2\pi} \left[ G_6^{y\delta} (u_{cm}^2 - u_3^2) - u_c^2 + u_3^2 + G_M^{y\delta} \frac{2rg}{tg \gamma} (k_{63}^k - k_{63}^0) \right].
\end{aligned} \tag{8}$$

Входящий в равенства (7) и (8) коэффициент взвешивания частиц транспортируемого по трубопроводу сыпучего материала по своему физическому смыслу аналогичен показателю взвешенности [6, 7]. Однако в их трактовке существует ряд качественных и количественных отличий.

Прежде всего, показатель взвешенности в работах [6, 7] рассматривается для движения частиц твердого материала по трубопроводу пневмотранспортной системы, где поле скоростей воздушного потока носит равномерный характер. Коэффициент взвешивания рассматривается для зоны смешивания двух воздушных потоков аэросмеси, где происходит выравнивание скоростей воздушных потоков и их давления [1 – 5].

Кроме этого, показатель взвешенности в общем случае определяется как отношение суммы сил Магнуса – Жуковского и Сафмена к весу частицы. При этом, как было показано в работе [6]:

- природа возникновения подъемной силы Магнуса – Жуковского обусловлена угловой скоростью полета частицы, однако наличие эффекта вращения не является обязательным в зоне смешивания аэросмеси в кольцевом эжекторе пневмотранспортной установки, имеющем смесительную камеру незначительной протяженности;
- эффект силы Сафмена проявляется лишь для очень мелких частиц (радиус эквивалентной сферической частицы которых  $\sim 10^{-5}$  м). Это обстоятельство позволяет пренебрегать учетом силы Сафмена в расчетах для пневмотранспортирования очень многих видов сыпучих материалов;
- сила трения, являющаяся основным источником раскрутки частицы транспортируемого сыпучего материала, в явном виде не входит в зависимость для определения показателя взвешенности.

В то же время коэффициент взвешивания, как было показано выше, определяет долю веса транспортируемого материала, которую составляет сила аэродинамического сопротивления, существующая при всех случаях обтекания частицы потоком воздуха. Кроме этого, коэффициент взвешивания учитывает как характерные скорости ( $v_{от}$  и  $v_2$ ) перемещения частиц транспортируемого по трубопроводу материала, так и характер сопротивления его движению ( $f_{об}$ ).

Численные значения показателя взвешенности и коэффициента взвешивания различаются по причине различий в учете действующих на перемещаемый материал сил. При этом в зоне смешивания эжектора взвешивание частиц твердого материала происходит практически мгновенно, так как эти частицы сразу же попадают в плотный скоростной поток эжектирующего воздуха.

Начальные значения  $k_{63}^0$  могут быть или равны 0 (состояние покоя), или больше 0, что возможно при дополнительной интенсификации процесса загрузки сыпучего материала (например, применение виброподачи).

Конечные значения  $k_{63}^k$  зависят от конструктивных и технологических параметров работы эжектора и вида транспортируемого сыпучего материала. Как правило, при выполнении расчетов параметров транспортирования эжекторными пневмотранспортными установками необходимо задавать  $k_{63}^k \cong 1$  для конкретного вида перемещаемого материала, в том числе горной породы при пневматической закладке выработанного пространства шахт.

Вблизи сечения  $B-B$  ( $r \rightarrow R$ , рис. 1) различиями параметров эжектирующего и эжектируемого потоков можно пренебречь:

$$u_c \cong u_3 = u; \rho_c = \rho_3 = \rho = \rho_{cm},$$

где  $u$  – скорость воздуха вблизи сечения  $B-B$ , м/с;  $\rho_c$ ,  $\rho_3$ ,  $\rho$  и  $\rho_{cm}$  – объемные плотности воздуха в соответствующих сечениях, кг/м<sup>3</sup>.

При отсутствии в зоне смешения аэросмеси перемещаемого сыпучего материала ( $G_M^{y0} = 0$ ) воспользовавшись, согласно закону сохранения массы, уравнением неразрывности  $u_{cm} \rho_{cm} \pi R^2 \tau = u_{cm} \rho_{cm} \pi R^2 \tau$ , равенство (8) можно записать в виде

$$\frac{P_{cm} - P}{\rho_{cm}} = \frac{u_{cm}^2 - u^2}{2},$$

где  $P$  – давление воздуха при  $r \rightarrow R$ , Па.

Последнее равенство (плотность равна удельному весу, деленному на ускорение силы тяжести) представляет собой известное уравнение Бернулли, которое широко применяется в гидравлике идеальной несжимаемой жидкости [1, 2].

Это сравнение доказывает адекватность полученного выше уравнения баланса энергии для смешивания потоков аэросмеси в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки.

**Выводы.** Выполненные в данной работе исследования позволили получить новую механическую форму уравнения энергии для зоны смешивания аэросмеси в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки. В данной форме энергетического баланса смешивания аэросмеси учтены:

- взаимосвязь давления, скорости и расходных характеристик смешивающихся в эжекторе потоков аэросмеси;
- физико-механические свойства пневмотранспортируемого по трубопроводу сыпучего материала;
- особенности взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха (с учетом угла взаимодействия этих потоков).

Полученное уравнение энергетического баланса позволяет максимально точно описать физическую картину взаимодействия потоков аэросмеси (эжектирующего потока воздуха и эжектируемого потоков воздуха с частицами сыпучего материала) в кольцевом эжекторе трубопроводной пневмотранспортной установки.

**Перспективы использования результатов исследований.** Применение полученного уравнения при расчете и проектировании трубопроводных пневмотранспортных установок с кольцевым эжектором, включая учет влияния различных форм механического (в частности, вибрационного) воздействия на загружаемый в установку сыпучий материал, позволяет оценить:

- работу аэродинамической силы эжектирующего потока на взвешивание и перемещение в горизонтальном направлении частиц транспортируемого сыпучего материала (включая горные породы для пневматической закладки выработанного пространства);
- распределение потенциальной и кинетической энергий воздушных потоков при их смешивании в кольцевом эжекторном устройстве;
- выбрать рациональные параметры пневмотранспортирования по трубопроводу сыпучих материалов и повысить эффективность практического применения данного вида оборудования.

#### Литература

1. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В.Н. Потураев, А.Ф. Булат, А.И. Волошин [и др.]. – К.: 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. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Абрамович Г.Н. – М.: Наука, 1969. – 324 с.
4. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
5. Пономаренко С.Н. Исследование угла взаимодействия газовых потоков при их смешивании в кольцевом эжекторе / Пономаренко С.Н. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: сб. научн. тр. – Краматорск, 2005. – С. 174–179.
6. Волошин А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К.: Наукова думка, 2001. – 521 с.
7. Марков Ю. А. Гидравлическая крупность частиц горных пород при свободном и стесненном падении / Ю. А. Марков, А. Е.. Смолдырев // Горный журнал. – 1960. – № 3. – С. 71 – 72.
8. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт / А.Е. Смолдырев. – М.: Недра, 1980. – 293 с.

*Статья рекомендована к публикации  
докт. техн. наук Семенко Е.В.*