

УДК 622.648.6:621.867.8

Пономаренко С.Н., канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
(ИГТМ НАН України)

**ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНОЙ
ПОРОДЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ЕЕ
ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВАНИЮ ТРУБОПРОВОДНЫМИ
СИСТЕМАМИ**

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

**ВПЛИВ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКОЇ
ПОРОДИ НА ОПІР ЇЇ ПНЕВМОТРАНСПОРТУВАННЮ
ТРУБОПРОВІДНИМИ СИСТЕМАМИ**

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

**INFLUENCE OF ROCK PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES ON
THE ROCK RESISTANCE TO PNEUMATIC TRANSPORTATION BY THE
PIPELINE SYSTEMS**

Аннотация. Статья направлена на исследование влияния физико-механических свойств горной породы на сопротивление ее движению в системах трубопроводного пневмотранспорта. Сопротивление движению горной породы в пневматических трубопроводных системах исследовано через интегральный коэффициент сопротивления, в котором обобщено сопротивление твердой и воздушной фазы аэросмеси при ее движении по транспортному трубопроводу. Получена зависимость интегрального коэффициента сопротивления движению от режима транспортирования, характеристик транспортного трубопровода и аэросмеси, которая перемещается по данному трубопроводу. Приведены результаты исследований влияния коэффициента скольжения фаз аэросмеси на сопротивление движению горной породы с различными физико-механическими свойствами по конкретному виду транспортного трубопровода. Анализ полученных результатов показал, что объемная плотность горной породы оказывает менее существенное влияние на сопротивление пневмотранспортированию этой породы по трубопроводу, чем форма частиц породы и ее разрыхление. Результаты исследований могут быть использованы при определении удельной энергоемкости трубопроводных систем пневмотранспорта для технологий горного производства.

Ключевые слова: интегральный коэффициент сопротивления, аэросмесь, горная порода, пневмотранспорт, трубопровод, коэффициент скольжения фаз.

Процесс пневмотранспортирования по трубопроводу аэросмеси, состоящей из частиц горной породы и воздуха, характеризуется тем, что механическая работа затрачивается на преодоление силы сопротивления движению воздуха и транспортируемого материала. Величина этой интегральной силы оценивается через интегральный (обобщенный) коэффициент сопротивления движению аэросмеси в транспортном трубопроводе, который в общем случае определяется как совокупность [1 - 5]:

- сопротивления трения воздушной среды и твердых частиц о стенки трубопровода;
- аэродинамического сопротивления воздушной среды;
- трения твердых частиц между собой.

При рассмотрении этого сложного механизма взаимодействия используют совокупность различных методов теоретических и экспериментальных исследований. В результате таких исследований И.А. Гастерштадтом, Я.Б. Урбаном, А.М. Дзядзио, Л.С. Клячко, А.Е. Смолдыревым и многими другими авторами были получены зависимости, которые носят частный эмпирический характер вследствие сложности взаимодействия компонентов смеси между собой и со стенками транспортного трубопровода.

Анализ последних достижений в изучении механизма трения показывает, что сопротивление трению оценивается также по основным аэродинамическим параметрам потока аэросмеси. На величину сопротивления трению оказывают влияние следующие параметры транспортируемой аэросмеси:

- объемная или массовая концентрация;
- скорость движения;
- диаметр трубопровода;
- физические свойства транспортируемой горной породы.

В процессе экспериментальных исследований пневмотранспортирования различных сыпучих материалов, в том числе горной породы, во многих известных работах по трубопроводным системам пневмотранспорта были получены зависимости коэффициента трения от параметра Рейнольдса Re . При этом было установлено:

- чем больше параметр Re , тем меньше его влияние на коэффициент сопротивления;
- чем крупнее размер частиц движущегося материала и чем больше его удельный вес, тем при большем значении Re наступает равномерное распределение материала в большей части сечения трубопровода;
- по мере уменьшения скорости транспортирования сыпучих материалов коэффициент сопротивления возрастает все больше и тем интенсивнее, чем больше концентрация аэросмеси.

Еще одной отличительной особенностью трубопроводных систем пневмотранспорта является то, что твердая фаза потока аэросмеси с уменьшением скорости пневмотранспортирования все в большей мере концентрируется в придонной части трубопровода. Вследствие большой плотности распределения движущегося материала увеличивается возможность соударения между частицами, и таким образом, повышается возможность появления дополнительных потерь энергии [5 – 7].

Возрастание загруженности потока аэросмеси твердой фазой, т.е. увеличение концентрации аэросмеси, приводит к еще большей плотности распределения материала в нижней части транспортного трубопровода и вызывает увеличение потерь энергии воздушной фазы на соударение [8 – 11].

В связи с этим, дополнительный расход пневматической энергии, обусловленный увеличением потерь энергии на соударение при увеличении концентрации аэросмеси вследствие уменьшения скорости потока, вызывает:

- уменьшение параметра Рейнольдса;
- увеличение коэффициента сопротивления;
- снижение эффективности всего процесса пневмотранспортирования.

Уменьшение коэффициента сопротивления за счет увеличения Re возможно лишь при увеличении скорости потока, что является труднодостижимым. Поэтому для повышения эффективности процесса пневмотранспортирования за счет снижения удельных затрат энергии сжатого воздуха путем уменьшения коэффициента сопротивления необходимы более доступные и эффективные методы дополнительного воздействия на транспортируемую горную породу.

Целью данной работы является получение зависимости интегрального коэффициента сопротивления движению материала в трубопроводных системах от: режима транспортирования, характеристик транспортного трубопровода и аэросмеси, которая перемещается по данному трубопроводу. Актуальность этого вопроса обусловлена необходимостью более точного определения удельной энергоемкости трубопроводных систем пневмотранспорта для технологий горного производства с целью их минимизации.

В рамках поставленной цели работы рассмотрим более подробно полученную в ИГТМ НАН Украины зависимость для нахождения численного значения интегрального коэффициента сопротивления движению аэросмеси $f_{об}$ в транспортном трубопроводе пневмотранспортных систем [12]:

$$f_{об} = \lambda + c_{\mu} \varphi^2 \mu, \quad (1)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления при движении по транспортному трубопроводу чистого воздуха без примеси твердых частиц; c_{μ} – среднее значение коэффициента аэродинамического сопротивления пневмотранспортируемого материала; φ – коэффициент относительной скорости движения (скольжения фаз) аэросмеси по транспортному трубопроводу; μ – массовая концентрация аэросмеси.

Как показывает равенство (1) интегральный коэффициент сопротивления $f_{об}$ движению в транспортном трубопроводе аэросмеси прямо пропорционален массовой концентрации μ , сопротивлению транспортируемого материала c_{μ} и транспортного трубопровода λ , а также квадрату коэффициента скольжения фаз φ .

Коэффициент гидравлического сопротивления λ в общем случае зависит от формы сечения трубы, режима движения, который характеризуется параметром Рейнольдса, и шероховатостью трубы. Зависимости для нахождения значения λ при движении по трубопроводам воздушного потока приведены в работах И.Е. Идельчика и А.Д. Альтшуля, написанных в прошлом столетии.

При $Re > 4 \cdot 10^3$ для определения коэффициента трения круглых труб с гидравлически гладкими стенками в практических расчетах часто применяется широко известная формула Филоненко-Альтшуля:

$$\lambda = 1/(1,8 \lg Re - 1,64)^2. \quad (2)$$

Белорусским ученым Л.С. Клячко по результатам многолетних исследований сопротивления трения в трубопроводах пневматического транспорта при вычислении величины λ для широкого диапазона значений Re ($2300 < Re \leq 10^7$) была рекомендована к применению формула:

$$\lambda = (2,82 \cdot 1,5^{-1150/Re} Re^{1/12})^{-2}.$$

Равенства (2) и (3) показывают связь коэффициента гидравлического сопротивления и параметра Рейнольдса, который определяется как

$$Re = u_{в,ср} D_{тр} / \nu, \quad (4)$$

где $u_{в,ср}$ – осредненное по поперечному сечению трубопровода значение скорости воздушной фазы аэросмеси, м/с; $D_{тр}$ – диаметр транспортного трубопровода, м; ν – кинематическая вязкость потока, равная для воздуха $1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Поскольку параметр Рейнольдса является функцией трех параметров, два из которых ($D_{тр}$ и ν) являются постоянными, а величина осредненной по площади скорости движения несущего потока ($u_{в,ср}$) – величина переменная и зависит от режима пневмотранспортирования, то коэффициент гидравлического сопротивления в общем случае меняется по длине транспортного трубопровода. В практических расчетах принято принимать гидравлическое сопротивление транспортного трубопровода постоянным и зависящим от диаметра трубопровода. Учитывая это обстоятельство и используя данные, приведенные в работе Р.Л. Зенкова, И.И. Иванова и Л.Н. Колобова по машинам непрерывного транспорта для технологий горного производства, для инженерных методов расчета пневмотранспортирования сыпучих материалов в ИГТМ НАН Украины была предложена следующая зависимость [13]:

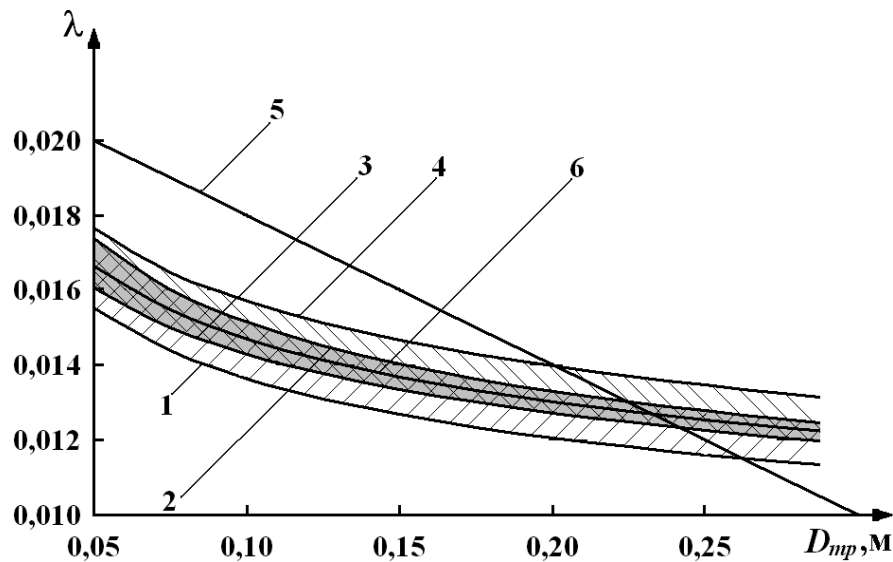
$$\lambda = -0,04D_{тр} + 0,022. \quad (5)$$

Равенство (5) достаточно точно характеризует гидравлическое сопротивление стальных труб в диапазоне диаметров от 0,15 м до 0,2 м. Однако, вне этого диапазона в определении значений гидравлических сопротивлений существуют значительные погрешности, связанные с логарифмическим характером зависимостей этих сопротивлений от параметра Рейнольдса.

Учитывая данное обстоятельство и опираясь на результаты многолетних исследований процессов пневмотранспортирования сыпучих материалов, для определения величины гидравлических сопротивлений стальных трубопроводов предлагается следующая зависимость:

$$\lambda = -0,0025 \ln D_{mp} + 0,0091. \quad (6)$$

На рис. 1 представлены расчетные зависимости гидравлического сопротивления стальных трубопроводов от их диаметра при движении по ним воздушного потока, определенные по формулам (1) – (6). Диапазон скоростей выбран от 40 м/с до 70 м/с.



- 1 – по формуле (2) для $u_{в,ср} = 70$ м/с; 2 – по формуле (2) для $u_{в,ср} = 40$ м/с;
 3 – по формуле (5); 4 – по формуле (3) для $u_{в,ср} = 70$ м/с;
 5 – по формуле (3) для $u_{в,ср} = 40$ м/с; 6 – по формуле (6)

Рисунок 1 – Зависимость гидравлического сопротивления движению воздушного потока по стальным трубопроводам от их диаметра

Как видно из рис. 1, между расчетными данными, полученными по формулам Филоненко-Альтшуля (2) и белорусских ученых (3) существует некая общая область, соответствующая диапазону скоростей движения воздуха по трубопроводу в диапазоне примерно от 50 м/с до 60 м/с. Расчетные данные, полученные по формуле (6), находятся именно в этой области. Это подтверждает достаточно большую достоверность данной зависимости. Относительная погрешность расчетных значений, полученных по формуле (6), и данных, полученных по равенствам (2) и (3), не превышает 10 %.

По данным Г.З. Ярмоленко, приведенным в работе по пневматическим турбинам и струйным аппаратам горных машин, значение коэффициента аэродинамического сопротивления c_{μ} горных пород, входящего в равенство (1) находится в очень широком диапазоне: от 0,5 для частиц шарообразной формы до 1,4 для частиц неправильной формы. Численное значение этого коэффициента может быть определено по зависимости, приведенной в работе И.М. Разумова по псевдооживлению и пневматическому транспорту сыпучих материалов:

$$c_{\mu} = 5,31 - 4,88\psi, \quad (7)$$

где ψ – коэффициент сферичности, принимаемый для пневмотранспортирования горной породы $0,8 \leq \psi \leq 1$ ($\psi = 1$ соответствует частицам породы шарообразной формы).

В достаточно широко известных работах А.Е. Смолдырева по трубопроводному пневмотранспорту было показано, что скорости твердой и воздушной фаз транспортируемой по трубопроводу аэросмеси связаны между собой упомянутым выше коэффициентом скольжения фаз:

$$v_{m,cp} = u_{в,ср} (1 - \varphi), \quad (8)$$

где $u_{m,cp}$ – осредненное по поперечному сечению трубопровода значение скорости твердой фазы аэросмеси, м/с.

В свою очередь массовая концентрация аэросмеси при пневмотранспортировании горной породы трубопроводными системами определяется как

$$\mu = \frac{\rho_m v_{m,cp}}{\rho_в u_{в,ср}} \frac{\alpha_{mp}}{1 - \alpha_{mp}}, \quad (9)$$

где ρ_m – насыпная плотность твердой фазы аэросмеси, кг/м³; $\rho_в$ – плотность воздушной фазы аэросмеси, кг/м³; α_{mp} – коэффициент заполнения поперечного сечения транспортного трубопровода твердой фазой аэросмеси.

Коэффициент α_{mp} в равенстве (9) характеризует проницаемость воздушным потоком перемещаемого твердого материала, численное значение которой находится в диапазоне от нуля до единицы и может быть определено как [14, 15]

$$\alpha_{mp} = 1 - \frac{\gamma_n}{\gamma_k} = 1 - \frac{1}{k_{раз}} = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_m^o}, \quad (10)$$

где γ_n – насыпной удельный вес транспортируемого материала, кг/(м·с)²; γ_k – кажущийся удельный вес транспортируемого материала, кг/(м·с)²; $k_{раз}$ – коэффициент разрыхления; ρ_m^o – кажущаяся (объемная) плотность транспортируемого материала, кг/м³.

Коэффициент разрыхления и насыпная плотность, прежде всего, зависят от гранулометрического состава разрыхленной массы и взаимного расположения кусков твердого материала [15]. Эти вопросы были рассмотрены в работе В.Н. Григорьева, В.А. Дьякова и Ю.С. Пухова по транспортным машинам и комплексам подземных разработок, которая была опубликована в конце 70-х годов прошлого столетия. В ней было указано, что в зависимости от способа разрушения горного массива, физико-механических и некоторых других свойств разрушаемого массива, коэффициент разрыхления может меняться:

- от 1,1 до 1,4 для мягких горных пород и углей;
- от 1,6 до 1,8 для весьма крепких скальных пород.

Следовательно, равенство (9) с учетом зависимостей (8) и (10) примет вид:

$$\mu = \frac{\rho_m}{\rho_g} (1 - \varphi) (k_{раз} - 1). \quad (11)$$

Как видно из равенства (11) массовая концентрация аэросмеси при пневмотранспортировании ее трубопроводными системами прямо пропорциональна отношению плотностей твердой и воздушной фаз аэросмеси, а также коэффициентам скольжения фаз и разрыхления породы.

С учетом равенств (6) – (8) и (11) зависимость (1) примет вид:

$$f_{об} = 0,0091 - 0,0025 \ln D_{mp} + (5,31 - 4,88\psi) \frac{\rho_m}{\rho_g} \varphi^2 (1 - \varphi) (k_{раз} - 1). \quad (12)$$

Зависимость (12) представляет собой новую форму уравнения для определения обобщенного сопротивления $f_{об}$ движению по трубопроводу аэросмеси. Эта зависимость наряду с равенством (1) показывает, что интегральный коэффициент сопротивления движению аэросмеси находится в логарифмической зависимости от диаметра транспортного трубопровода D_{mp} , степенной функции коэффициента скольжения фаз аэросмеси φ и прямо пропорционален:

- форме транспортируемых частиц ψ ;
- отношению плотностей твердой ρ_m и воздушной ρ_g фаз аэросмеси;
- коэффициенту разрыхления горной породы $k_{раз}$.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости интегрального коэффициента сопротивления движению $f_{об}$ от коэффициента скольжения фаз углевмещающей породы (илистого сланца, песчанистого сланца, алевролита, песчаника, известняка со средним значением объемной плотности [15]) по транспортному трубопроводу. Расчет выполнен по формуле (12) для следующих условий:

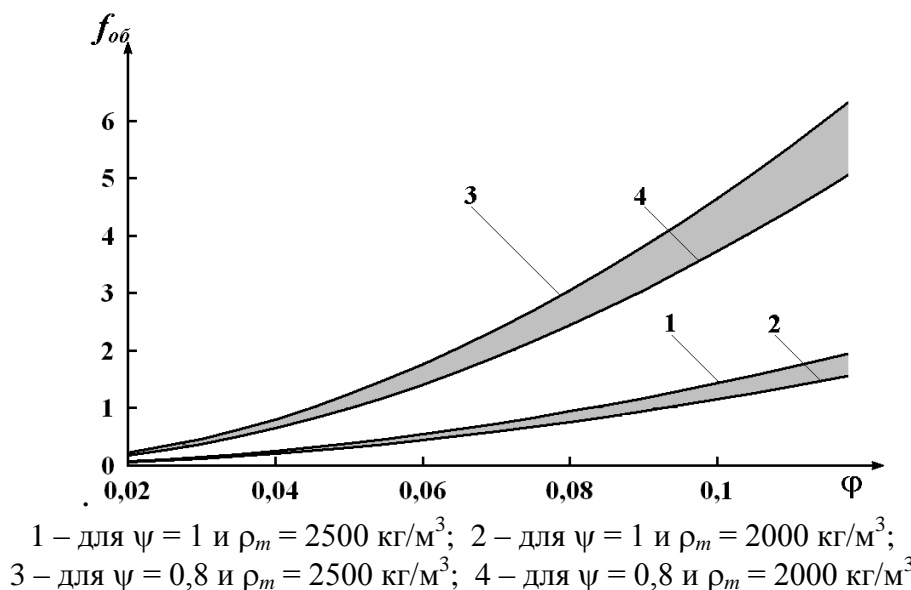


Рисунок 2 – Зависимости интегрального коэффициента сопротивления движению от коэффициента скольжения фаз

- коэффициент разрыхления $1,2$;
- диаметр транспортно трубопровода $0,2$ м;
- плотность воздушной фазы аэросмеси $\rho_g = 1,2$ кг/м³;
- диапазон изменения плотности твердой фазы аэросмеси ρ_m рассматривается от 2000 кг/м³ до 2500 кг/м³;
- форма транспортируемых частиц ψ от $0,8$ до 1 .

Диапазон изменения коэффициента скольжения фаз аэросмеси, согласно результатам многочисленных экспериментальных исследований, приведенных в работах А.Е. Смолдырева по трубопроводному пневмотранспорту, варьировался в пределах $0,02 \leq \varphi \leq 0,12$.

Как видно из представленных на рис. 2 зависимостей, интегральный коэффициент сопротивления пневмотранспортированию углевмещающей породы увеличивается по степенной зависимости с ростом значений коэффициента скольжения фаз.

При этом влияние насыпной плотности породы на рост интегрального коэффициента сопротивления менее существенно, чем влияние формы частиц этой породы. Необходимо отметить, что отклонение формы транспортируемой горной породы от шарообразной ($\psi = 1$) до неправильной формы ($\psi = 0,8$) вызывает увеличение общего сопротивления пневмотранспортированию этой породы до 200 %.

Анализ полученной в результате выполненных исследований зависимости (12) методом варьирования исходных параметров показал, что для углевмещающих пород в диапазоне диаметров транспортного трубопровода от $0,1$ м до $0,3$ м и плотности пород от 2000 кг/м³ до 2500 кг/м³ для частиц любой формы:

- для одного и того же коэффициента разрыхления породы существенных различий в значении интегрального коэффициента сопротивления движению аэросмеси не наблюдается;

- с уменьшением коэффициента разрыхления значение интегрального коэффициента сопротивления движению аэросмеси уменьшается, при этом:

- а) для мягких пород (при уменьшении $k_{раз}$ от $1,4$ до $1,1$) до 75 %;

- б) для твердых пород (при уменьшении $k_{раз}$ от $1,8$ до $1,6$) до 7 %.

Физическая картина установленной закономерности влияния коэффициента разрыхления породы на сопротивление движению аэросмеси заключается в том, что чем меньше значение коэффициента разрыхления, тем меньше:

- массовая концентрация аэросмеси, что следует из равенства (11);

- заполнение породой поперечного сечения транспортного трубопровода и больше проницаемость воздушным потоком перемещаемого твердого материала, что следует из равенства (10).

Таким образом, выполненные исследования позволили получить зависимость для оценки влияния физико-механических свойств горной породы на сопротивление ее движению в системах трубопроводного пневмотранспорта. Установленные закономерности снижения интегрального коэффициента сопротивления движению аэросмеси за счет формы частиц породы и ее разрыхления позволяют выработать направления снижения удельной энергоемкости трубо-

проводных систем пневмотранспорта для технологий горного производства.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Волошин, А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – Киев: Наукова думка, 2001. – 521 с.
2. Mills, D. (2003), *Pneumatic conveying design guide*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
3. Mills, D., Jones, M.G. and Agarwal V.K. (2004), *Handbook of Pneumatic Conveying Engineering*, Dekker Mechanical Engineering, CRC Press, New York, USA.
4. Глебов, И.Т. Подъемно-транспортные машины отрасли. Лекции и методы решения задач по аспирации и пневмотранспорту деревообрабатывающих предприятий: Учебное пособие / И.Т. Глебов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. – 139 с.
5. Гушин, В.М. Анализ режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / Гушин В.М., Гушин О.В. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії / ДДМА. – Краматорськ, 2010. – №1(18). – С. 78 – 83.
6. Чальцев, М.Н. Аналитические и экспериментальные исследования критических режимов пневматического транспортирования сыпучих материалов / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / ДВНЗ «ДонНТУ» АДІ. – Горлівка, 2010. – № 1(10) – С. 5 – 11.
7. Чальцев, М.Н. Об уточнении гидравлических расчетов аэродисперсных потоков пылевидных материалов / М.Н. Чальцев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник/ АДІ «ДонНТУ». – Горлівка, 2005. – № 1. – С. 11 – 16.
8. Levy, A. (2000), "Two-fluid approach for plug flow simulations in horizontal pneumatic conveying", *Powder technology*, vol. 112, Issue 3, pp. 263 – 272.
9. Jones, M. G. and Willms, K. C. (2003), "Solids friction factors for fluidized dense-phase conveying", *Particulate Science and Technology: An International Journal*, vol. 21, Issue 1, pp. 45 – 56.
10. Datta, B. K. and Ratnayaka, C. (2003), "A simple technique for scaling up pneumatic conveying systems", *Particulate Science and Technology: An International Journal*, vol. 21, Issue 3, pp. 227 – 236.
11. Ratnayake, C., Datta, B.K. and Melaaen M.C. (2007), "A unified scaling-up technique for pneumatic conveying systems", *Particulate Science and Technology: An International Journal*, vol. 25, Issue 3, pp. 289-302.
12. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В.Н. Потураев, А.Ф. Булат, А.И. Волошин [и др.]. – Киев: Наукова думка, 2001. – 176 с.
13. Пономаренко, С.Н. Влияние характеристик аэросмеси на технологические параметры пневмотранспортирования закладочными установками эжекторного типа / С.Н. Пономаренко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр./ ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2013.– Вып.109.– С. 63 – 73.
14. Пономаренко, С.Н. Влияние размера частиц горной породы на параметры пневмотранспортирования / С.Н. Пономаренко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр./ ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012.– Вып.97.– С. 264 – 271.
15. Шашенко, А.Н. Геомеханические процессы в породных массивах / А.Н. Шашенко, Т.Н. Майхерчик, Е.А. Сдвижкова. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2005. – 319 с.

REFERENCES

1. Voloshin, A.I. and Ponomaryev, B.V. (2001), *Mekhanikai pnevmotransportirowaniya syuchikh materialov* [Mechanics the pneumatic transport of bulk materials], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Mills, D. (2003), *Pneumatic conveying design guide*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
3. Mills, D., Jones, M.G. and Agarwal V.K. (2004), *Handbook of Pneumatic Conveying Engineering*, Dekker Mechanical Engineering, CRC Press, New York, USA.
4. Glebov, I.T (2009), *Podyomno-transportnye mashiny otrasli. Leksii i metody resheniya zadach po aspiratsii i pnevmotransportu derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiy: uchebnoe posobie* [Acting elevating-transportation machinery industry. Lectures and methods for solving problems of suction and pneumatic transport woodworking enterprises: Textbook], Ural State Forestry University, Yekaterinburg, Russia.
5. Gushchin, V.M. and Gushchin, O.V. (2010), "Analysis of driving modes in pneumatic conveying pipeline aeromixture", *Visnyk Donbaskoyi derzhavnoy mashinobudivnoi akademiyi*, no.1(18), pp. 78–83.
6. Chaltsev, M. and Bugaev, B. (2010), "Analytical and Experimental Studies of the Critical Regimes of

the Bulk Solids Pneumatic Conveying", *Visti Avtomobilno-dorozhnoho institutu: naukovo-vyrobnychiy zbirnyk*, no.1(10), pp. 5–11.

7. Chaltsev, M. (2005), "Hydraulic Calculation Closer Definition of the Aerodisperse Flows of Dusting Materials", *Visti Avtomobilno-dorozhnoho institutu: naukovo-vyrobnychiy zbirnyk*, no.1, pp. 11–16.

8. Levy, A. (2000), "Two-fluid approach for plug flow simulations in horizontal pneumatic conveying", *Powder technology*, vol. 112, no 3, pp. 263 – 272.

9. Jones, M. G. and Willms, K. C. (2003), "Solids friction factors for fluidized dense-phase conveying", *Particulate Science and Technology: An International Journal*, vol. 21, no 1, pp. 45 – 56.

10. Datta, B. K. and Ratnayaka, C. (2003), "A simple technique for scaling up pneumatic conveying systems", *Particulate Science and Technology: An International Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 227 – 236.

11. Ratnayake, C., Datta, B.K. and Melaen M.C. (2007), "A unified scaling-up technique for pneumatic conveying systems", *Particulate Science and Technology: An International Journal*, vol. 25, no. 3, pp. 289 – 302.

12. Poturayev, V.N., Bulat, A.F., Voloshin, A.I., Ponomarenko, S.N. and Voloshin, A.A. (2001), *Mekhanika vibratsionno-pnevmaticheskikh mashin ezhektornogo tipa* [Mechanics vibration-pneumatic machine the ejector type], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

13. Ponomarenko, S.N. (2013), "Influence of aero mixture characteristics on technological parameters of pneumatic transportation stowing settings the ejector type", *Geo-Technical Mechanics*, no.109, pp. 63–73.

14. Ponomarenko, S.N. (2012), "Influence of size of particles of mountain breed on parameters of pneumatic portage", *Geo-Tecnical Mechanics*, no.97, pp. 264–271.

15. Shashenko, A.N., Maykherchik, T. and Sdvizhkova, E.A. (2005), *Geomekhanicheskie protsessy v porodnykh massivakh* [Geomechanical processes in rock masses], National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine.

Об авторе

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

About the author

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

Анотація. Стаття спрямована на дослідження впливу фізико-механічних властивостей гірської породи на опір її руху в системах трубопровідного пневмотранспорту.

Опір руху гірської породи в пневматичних трубопровідних системах досліджено через інтегральний коефіцієнт опору, в якому узагальнено опір твердої та повітряної фази аеросуміші при її русі по транспортному трубопроводу. Одержано залежність інтегрального коефіцієнта опору руху від режиму транспортування, характеристик транспортного трубопроводу та аеросуміші, яка переміщається по даному трубопроводу. Наведено результати досліджень впливу коефіцієнта ковзання фаз аеросуміші на опір руху гірської породи з різними фізико-механічними властивостями по конкретному виду транспортного трубопроводу. Аналіз отриманих результатів показав, що об'ємна щільність гірської породи надає менш істотний вплив на опір пневмотранспортуванню цієї породи по трубопроводу, ніж форма часток породи та її розпушення. Результати досліджень можуть бути використані при визначенні питомої енергоємності трубопровідних систем пневмотранспорту для технологій гірничого виробництва.

Ключові слова: інтегральний коефіцієнт опору, аеросуміш, гірська порода, пневмотранспорт, трубопровід, коефіцієнт ковзання фаз.

Abstract. The paper studies influence of the rock physical and mechanical properties on the rock resistance to motion in the pneumatic pipeline systems.

The rock resistance to the motion in the pneumatic pipeline systems was studied by an integral coefficient of resistance in which resistance of the solid phase and air phase of the air mixture is summarized as the mixture was moving in the transporting pipeline. The dependences are formulated between integral coefficient of the resistance to motion and mode of transportation, parameters of transporting pipeline and air mixture which moves in this pipeline. Findings on dependence between a slip coefficient of different phases of the air mixture and resistance to motion of the rocks with different physical and mechanical properties are presented for each particular type of the transporting pipelines. Analysis of the obtained results has shown that rock bulk density has less significant influence on the rock resistance to be transported by the pneumatic pipeline than shape of the rock particles and rate of the rock aeration. The findings can be used for determining specific energy capacity of the pneumatic transporting pipeline systems for mining technologies.

Keywords: integral coefficient of resistance, air mixture, rock, pneumatic transport, pipeline, slip ratio of the phases.

Статья поступила в редакцию 08.09. 2014

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