

УДК 621.867.82

ГУЩИН О.В., к.т.н., доцент,  
Донбасская государственная машиностроительная академия

## АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА УЧАСТКЕ ЗАГРУЗКИ В ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫЙ ТРУБОПРОВОД АГРЕГАТА ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ СМЕСЕЙ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

*В статье рассмотрены результаты аналитических исследований условий формирования структурированных аэросмесей на участке входа сыпучего материала в пневмотранспортный трубопровод. Показаны особенности течения аэросмесей при верхнем подводе дополнительной воздушной струи. На основе уравнения быстрых движений для элементарного объема рассматривается устойчивость равновесия границы воздухоматериального потока. В соответствии с законами турбулентности определены основные характеристики вихрей, возникающих при пульсационном движении. Результаты исследований свидетельствуют о перспективности использования действия воздушных струй на сыпучий материал при разработке новейших типов загрузочных устройств для пневмотранспортных установок, работающих при структурированных режимах течения аэросмеси.*

**Ключевые слова:** пневматический транспорт, загрузочное устройство, воздушная струя, сыпучий материал

### Постановка проблемы

Трансформация структуры течения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе при перемещении хорошо сыпучих материалов путем управляемой генерации воздушных потоков и вихрей позволяет интенсифицировать процессы массопереноса. Одним из методов интенсификации является использование дополнительных воздушных струй, действующих на движущийся в трубопроводе сыпучий материал [1]. Выполненные исследования [2] показали достаточно высокую работоспособность пневмотранспортной установки, оборудованной дополнительным верхним воздухоподводом.

В процессе строительства автомобильных дорог приходится перемещать огромное количество разнообразных сыпучих материалов. Для транспортирования кварцевых песков в технологических агрегатах может быть использован пневматический транспорт, как один из наиболее экономичных и экологически чистых способов перемещения хорошо сыпучих материалов. Однако вместо его традиционного исполнения с режимом движения отдельных частиц в полете во взвешенном состоянии предлагается применить режим перемещения сыпучего материала в структурированном виде.

### Анализ последних исследований и публикаций

Широкая гамма конструктивных разновидностей и схем загрузочных устройств, принципов действия и инженерных расчетов представлена в работе [3]. Особенности механики движения сыпучих материалов в вибрационно-пневматических машинах эжекторного типа, рассмотренных в работе [4], позволили выявить их оптимальные параметры применительно к материалам горной промышленности. Вопросы совершенствования камерных питателей при работе с пылеугольными аэросмесями рассмотрены в работах [5-7].

Для пневмотранспортных установок, работающих при структурированных режимах движения аэросмеси [8,9], использование традиционных загрузочных устройств является проблематичным. Новые типы загрузочных устройств разработаны на основе интенсификации процессов истечения сыпучих материалов из выпускных отверстий объемной камеры. Последнее достига-

ется приданием хорошо сыпучим материалам гомогенной или гетерогенной структуры свойств сверхтекучести посредством воздействия непрерывных или пульсирующих воздушных струй [10-12]. При этом в качестве подготовительной операции представляется целесообразным осуществить местную интенсификацию истечения сыпучего материала его аэрированием в зоне выпускного отверстия загрузочного агрегата.

Анализ выполненных работ по созданию новых типов загрузочных устройств, предназначенных для использования в пневмотранспортных установках, работающих при структурированных режимах движения аэросмесей, показал, что процессы движения сыпучего материала в области его входа в пневмотранспортный трубопровод и формирования структуры режима аэросмеси до настоящего времени не рассматривался. Дальнейшему изучению подлежат особенности взаимодействия воздушных струй с частицами сыпучих материалов, их смешивания и формирования газоматериального потока.

### Цель работы

Целью данной статьи является анализ процессов, протекающих на участке входа сыпучих материалов гомогенной и гетерогенной структуры в пневмотранспортный трубопровод струйным воздействием воздушных потоков, и выявление их основных характеристик, необходимых для определения технических параметров загрузочных устройств пневмотранспортных установок нового типа.

### Основной раздел

Течение сыпучих материалов в зоне их выхода из бункера и входа в приемную часть пневмотранспортного трубопровода представляет определенный интерес, так как протекающие здесь процессы детерминируют дальнейшую работу пневмотранспортной установки. В целом, из широкой гаммы загрузочных устройств рассматривается движение сыпучих материалов на переходных участках формирования воздухоматериальных потоков для поступательного структурированного движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе.

На схеме течений и формирования потоков участка ввода материалов пневмотранспортных установок, работающих при структурированных режимах движения аэросмесей (рис.1), показаны зоны:  $X_0$  – регулируемая длина;  $X_1$  – участок расширения воздушной струи;  $X_2$  – участок ввода аэрированного сыпучего материала в пневмотранспортный трубопровод;  $X_3$  – участок формирования поступательно движущейся структуры.

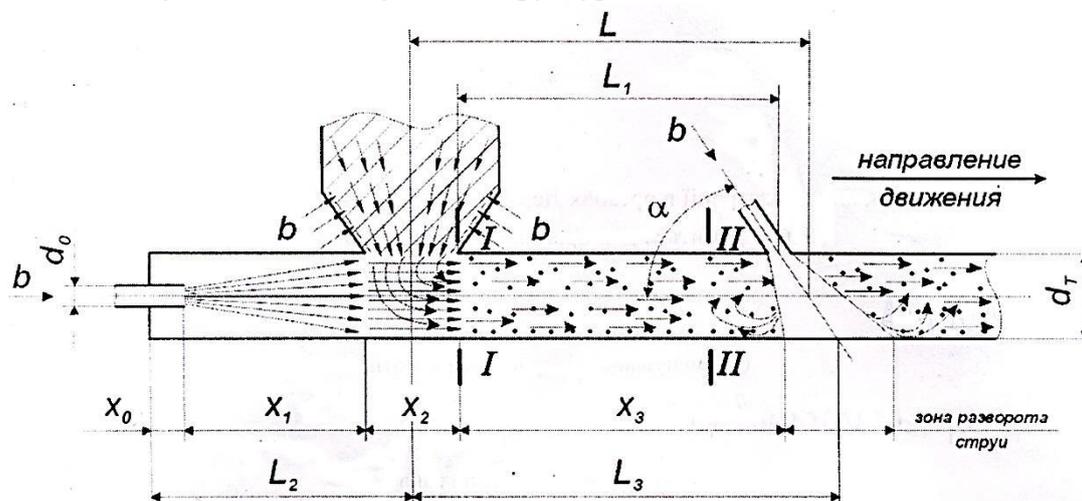


Рис. 1. Схема движения потоков на участке входа аэросмеси в пневмотранспортный трубопровод при поступательном движении (угол атаки –  $0 < \alpha < 90^\circ$ )

Общая картина течения представляется следующей. Подводимая воздушная струя на участке  $X_1$  расширяется, достигая своих номинальных параметров. На участке  $X_1$  наблюдается обычный процесс массообмена турбулентного ядра воздушного потока с пограничным слоем. При переходе из узкого канала в широкий пограничный слой разрастается в вихревую зону, которая стабилизируется при подходе к зоне входа сыпучего материала в трубопровод. Исследования показывают, что перестройка пограничного слоя и профиля скоростей происходит на пути  $X_1 = (8 \dots 12)d_T$ , (где  $d_T$  – диаметр трубопровода).

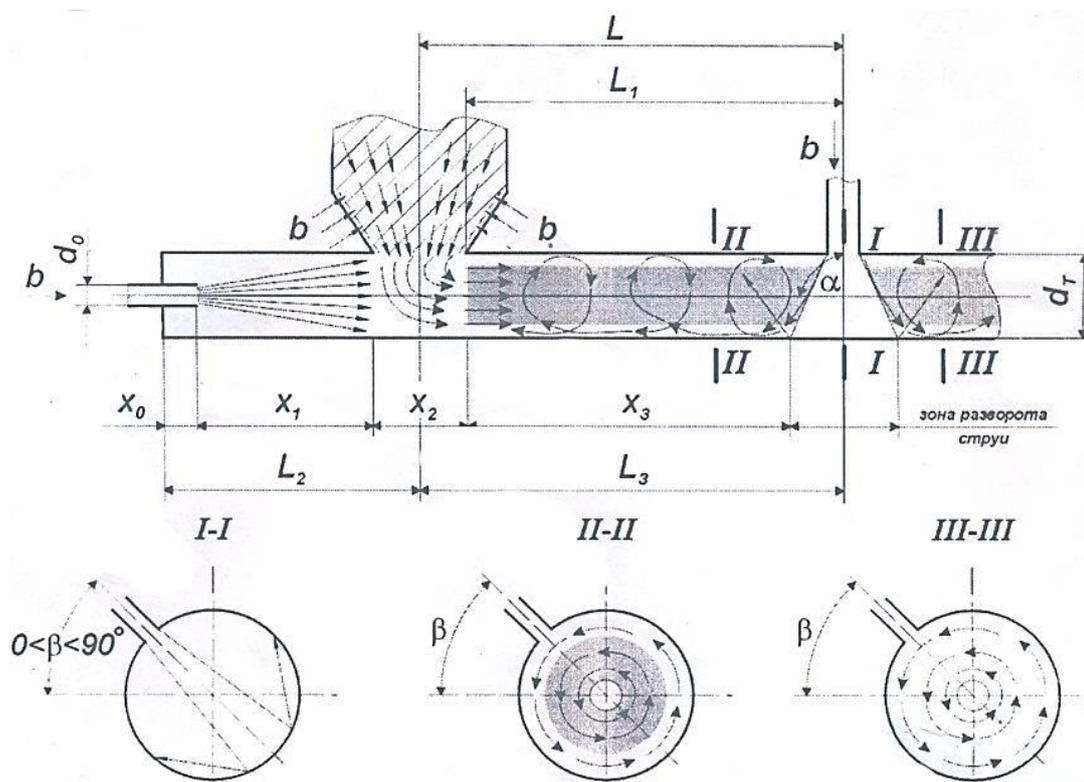
Изменение и регулирование величины  $X_1$  осуществляется изменением параметра  $X_0$ . Далее под действием сил тяжести и воздействием сформированной воздушной струи предварительно азрированный сыпучий материал из выпускного отверстия бункера поступает в зону  $X_2$ , откуда проталкивается на участок  $X_3$ , где и происходит формирование дальнейшей движущейся структуры. Размером  $X_3$  и углом атаки  $\alpha$  дополнительной воздушной струи задается форма и длина структурированных объемов, движущихся в материалопроводе. На поступательно движущуюся аэросмесь на участке  $L_3$  под углом атаки  $\alpha$  воздействует дополнительно подводимая воздушная струя. Энергия этой струи разбивается на две составляющие. За положительное направление принято направление движения потока. Часть потока воздушной струи, действующая в отрицательном направлении, возбуждает передний фронт потока аэросмеси участка  $X_3$ , приводя его в вихревое состояние. Действующие в направлении движения силы могут быть представлены в виде двух составляющих. Вертикальная составляющая поддерживает частицы материала во взвешенном состоянии, а осевая – продвигает их в заданном направлении. Таким образом, формируется поток газоматериальных структур. Общей турбулизации потока способствует неравномерность распределения давлений в затопленной струе, соударяющейся с поверхностью экранирующей нижней стенки трубопровода.

Формирование потока газоматериальной смеси для вращательного режима движения (рис.2) в зоне  $X_3$ , имеет свои отличительные особенности. Возможны два случая воздействия дополнительной воздушной струи:  $\alpha = 90^\circ$ ,  $0 < \beta < 90^\circ$  и  $\alpha < 90^\circ$ ,  $0 < \beta < 90^\circ$ . Рассматривается более простой первый случай, когда  $\alpha = 90^\circ$ . Как показали исследования, рабочие процессы осложняются влиянием «торцевого эффекта» и действием крупно- и мелкомасштабных когерентных вихревых структур.

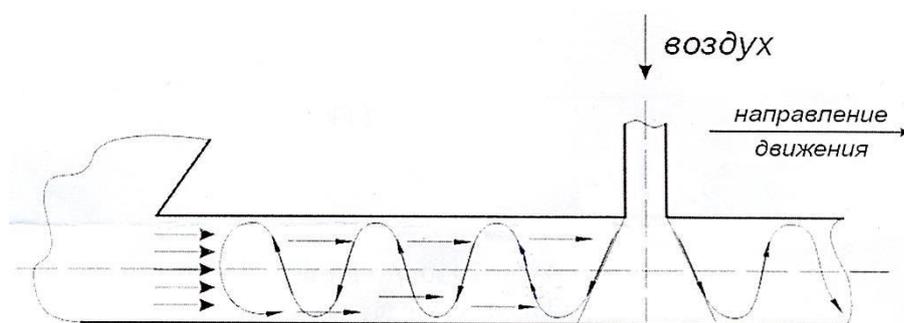
Входящая под углом  $\beta$  воздушная струя (рис.3) на выходе из воздухоподводящего патрубка расширяется вдоль криволинейной части трубопровода и разделяется на две части: проточную, направленную по ходу движения потока, и обратную, направленную к загрузочному патрубку.

В пристеночной области струи за патрубком вдоль поверхности трубопровода начинают формироваться вихри. По мере удаления от входного воздухопроводного патрубка контуры вихревой зоны приобретают спиралевидную форму. Неограниченная сторона струи взаимодействует с внутренними кольцевыми структурами, вращающимися в одном направлении с входной струей. Впускная струя, обладая определенным энергетическим потенциалом и заданной степенью закрутки, детерминирует развитие процессов в обоих направлениях относительно оси входа струи в трубопровод.

В зоне  $X_3$  (см. рис. 2) направленная в сторону разгрузочного патрубка составляющая воздушной струи сталкивается с движущейся в направлении проточной части газоматериальной смесью. «Зона-плоскость» столкновения линейно движущейся и этой составляющей как бы формирует «торцевую» зону (плоскость). Возникает явление «торцевого эффекта», и, как следствие, в срединной части (по оси трубопровода) наблюдается эффект торцевого подтягивания движущегося газоматериального потока. В общем случае процесс интенсифицируется. Аэродинамика и параметры формирующихся структур зависят от геометрических параметров  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $l$ ,  $d_0$ ,  $d_T$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , энергетики дополнительно подводимой воздушной струи и физико-механических свойств объекта транспортирования.



**Рис.2. Схема движения потоков на участке входа аэросмеси в трубопровод при переходе поступательного движения аэросмеси во вращательное (угол атаки:  $\alpha = 90^0$ ,  $0 < \beta < 90^0$ )**



**Рис. 3. Схема формирования «торцевого эффекта» на участке  $X_3$**

Вращательное движение газоматериальной смеси формируется воздействием дополнительных воздушных струй, истекающих из сопел-побудителей. Анализ показывает, что в потоках газоматериальной смеси с высокой скоростью закрутки градиент скорости по поперечному сечению трубопровода имеет определенную особенность: максимум скорости по оси трубопровода, область с градиентом, близким к нулю, и область с отрицательным градиентом скорости. Соответственно в спирально-вихревом режиме движения газоматериальной смеси сыпучий материал по поперечному сечению трубопровода распределяется неравномерно. Немаловажен тот факт, что спиралевидный поток в проточной части трубопровода и на участке  $X_3$  в какой-то степени уменьшает контакт твердой компоненты с внутренней поверхностью трубопровода, что снижает процессы изнашивания последнего.

Исследование течений аэросмесей на участке их входа в пневмотранспортный трубопровод показали, что сформированная на начальном участке ( $X_3$ ) структура задает дальнейший режим движения аэросмеси. Загрузочные устройства с порционным или волновым режимами движе-

ния аэросмесей необходимо выполнять по первой схеме, со спирально-вращательным движением – по второй.

Квазипотенциальный поток вихревого элемента в сечении трубопровода обладает скоростью  $U$ , плотностью  $\rho$  и давлением  $P$  (рис.4). Компоненты скорости по осям цилиндрических координат –  $U_z$ ,  $U_r$ ,  $U_n$ . Основные характеристики вихревого элемента могут быть определены из уравнения быстрых движений для элементарного объема, прилегающего к внутренней грани потока, и записаны в виде [13]:

$$\frac{dU_z}{dt} = \frac{2U_n \varepsilon}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент интенсивности пульсаций.

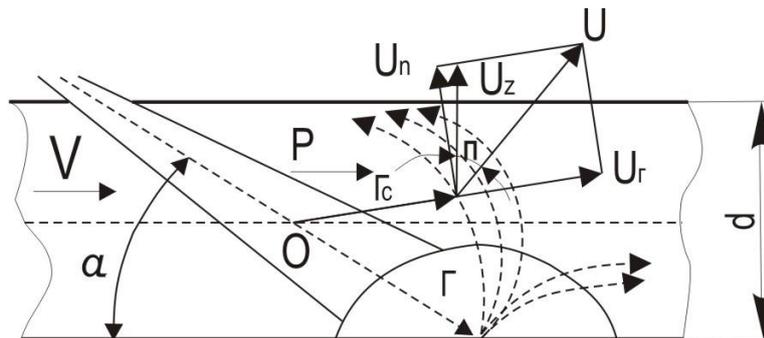


Рис. 4. Схема вихрей в зоне дополнительного подвода воздушного потока

Радиальный градиент давления

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial r} = C^2 \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (2)$$

где  $C$  – скорость звука.

Учитывая закон сохранения массы (уравнение неразрывности) элементарного объема  $\rho \Delta V = const$ ,

$$\frac{\partial p}{\partial r} = - \frac{\rho}{\Delta V} \frac{\partial \Delta V}{\partial r} k, \quad (3)$$

где  $\Delta V$  – элемент объема,  
 $k$  – коэффициент деформации:

$$\Delta V = \frac{1}{2} (r^2 - r_c^2) dz dn. \quad (4)$$

После подстановки уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{dU}{dt} = 2 \left( \frac{U_n^2 \varepsilon}{r} - \frac{a^2 r k}{r_c^2 - r^2} \right). \quad (5)$$

Равновесие внутренних границ потока является устойчивым, что подтверждается возможностью реализации движения газоматериального потока в заданном структурированном режи-

ме. Попадая под воздействие воздушного потока, частицы сыпучего материала совершают пульсационное движение относительно несущего их вихря, рассматриваемое в пределах одного случайно взятого периода пульсаций, в течение которых вектор пульсационной скорости несущего вихря беспорядочно меняет свое направление, частоту и амплитуду в соответствии со статистическими законами турбулентности [14].

Рассматривается пульсационное движение, совершаемое частицей в течение одного периода пульсации воздуха. Изменение пульсационной скорости воздуха во времени представлено моногармонической функцией. В этом случае продольная ( $u_g$ ), поперечная ( $v_g$ ) и касательная ( $w_g$ ) составляющие скорости газа описываются выражениями:

$$u_g = \bar{u}_g + U \sin \omega t, \quad v_g = V \sin \omega t, \quad w_g = W \sin \omega t, \quad (6)$$

где  $\omega$  – лагранжева частота пульсаций.

Два последних выражения представляют частный случай первого, так как  $v=w=0$ , поэтому достаточно рассмотреть движение частицы, совершаемое под влиянием скорости движения среды, определяемой лишь первым выражением.

Рассматривая движение отдельно взятой частицы в воздушном вихре, можно ограничиться теми же силами, что и в вязкой ламинарной среде. В этом случае уравнение движения частицы размером  $\delta$  имеет вид:

$$\frac{du}{dt} + \beta u = \beta (\bar{u}_g + U \sin \omega t), \quad (7)$$

где  $\beta = 18\mu / \rho\delta^2 = 1/\tau$  – фактор инерционности частицы, называемый иногда «постоянной времени»;

$\mu$  – динамическая вязкость воздуха;

$\tau$  – время релаксации частиц, определяемое для тонкодисперсных частиц выражением  $\rho\delta^2/18\mu$ ;

$U$  – продольная скорость обтекания вихря.

Общим решением уравнения при  $u_0 = 0$  является:

$$u = \frac{U \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} + \frac{\omega \tau U}{1 + \omega^2 \tau^2} e^{-t/\tau} + \bar{u}_g (1 - e^{-t/\tau}) \quad (8)$$

Численное значение  $u$  позволяет определить время взаимодействия вихря и частицы. Если время взаимодействия больше времени релаксации частицы, то частица будет захвачена вихрем. Время взаимодействия зависит как от скорости частицы, так и от размеров вихря.

Зависимость поперечного смещения  $L_{v0}$  оси вихря (амплитуд его поперечных колебаний, вызываемых знакопеременностью пульсации скорости и силы Жуковского) от относительной величины квадрата поперечной скорости равна:

$$\frac{L_{v0}}{\Delta_c} = \frac{V^2}{2A_0 U^2}. \quad (9)$$

Относительное поперечное перемещение вихря вызывает силу, направленную по потоку (или против потока) и приводящую к продольным перемещениям вихря:

$$P_x = \rho_g V / \Gamma / , \tag{10}$$

где  $/\Gamma/ = \pi r_0^2 U A_0 / \Delta_c$  – циркуляция вихря,

$$P_x \Delta t_u = mU, \quad \Delta t_u = 2 L_{u0} / U .$$

Из уравнения (10) следует:

$$U = 2 L_{u0} V A_0 / \Delta_c .$$

Откуда

$$\frac{L_{u0}}{\Delta_c} = \frac{U}{2 A_0 V} .$$

Время перемещения вихря в поперечном и продольном направлениях одно и то же ( $\Delta t_v = \Delta t_u$ ). Равенство отношения путей пробега вихря кубу отношения соответствующих компонент относительной скорости, которое можно считать равным отношению амплитуд пульсационной скорости:

$$\frac{L_{v0}}{L_{u0}} = \frac{V^3}{U^3} . \tag{11}$$

Подставляя отношение компонент скорости, получаем для перемещений (путей пробега) вихря следующие значения:

$$\frac{L_{v0}}{\Delta_c} = \frac{0,325}{A_0}, \quad \frac{L_{u0}}{\Delta_c} = \frac{0,625}{A_0} . \tag{12}$$

При  $A_0 = 2$  (для слоя смешения)  $L_{v0} = 0,16\delta$ ,  $L_{u0} = 0,31\delta$  [14].

Так как толщина зоны смешения в начальном участке струи, согласно опытным данным [14], равна:

$$\Delta_c = 0,27x$$

$$\frac{L_{v0}}{x} = \frac{0,09}{A_0}, \quad \frac{L_{u0}}{x} = \frac{0,17}{A_0} . \tag{13}$$

Зная размах поперечных перемещений вихря и толщину зоны смешения, можно оценить величину радиуса вихря. Поперечное сечение потока заполнено тремя его составными частями: толщиной вихря  $2r_0$ , двойным путем поперечного перемещения вихря  $2L_{v0}$  и толщиной потока, обтекающего вихрь,  $\Delta u$ .

$$\Delta_c = 2r_0 + 2L_{v0} .$$

Поэтому возможная относительная величина радиуса вихря составляет при  $A_0 = 2$ :

$$k = r_0 / \Delta_c = 0,17 .$$

Величина радиуса вихря при турбулентной пульсации равна:  $r_0 = 0,22\Delta_c$ .

## Выводы

Результаты исследования показали:

1. Улучшение технических параметров загрузочных устройств, предназначенных для работы в пневмотранспортных установках со структурированными режимами движения аэросмесей, может быть осуществлено воздействием дополнительных воздушных струй на аэросмесь в зоне формирования воздухоматериального потока.

2. Под воздействием дополнительных воздушных струй в материалопроводе формируется воздухоматериальный поток когерентных структур, характеризуемый параметрами турбулентности.

3. Оценка характеристики вихревых структур позволяет определить основные технические параметры дополнительных воздухоподводящих патрубков, обеспечивающих формирование и стабильность движения структурированных режимов движения аэросмесей.

## Список литературы

1. Гуцин В.М. Новые пневмотранспортные установки для перемещения сыпучих материалов / В.М. Гуцин // Зб. наук. пр. «Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини» - К.: Вип. 55. – С. 70-73.

2. Гуцин В.М. Управление и интенсификация процессов пневматического транспортирования сыпучих материалов струйным воздействием воздушного потока / В.М. Гуцин, О.В. Гуцин // Теорія і практика будівництва. – 2009. – № 5. – С.6-15.

3. Гуцин В.М. Разработка новых типов загрузочных устройств для пневмотранспорта сыпучих материалов / Гуцин В.М. // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Зб. наук. пр. – Краматорськ, 1999. – С. 325-330.

4. Потураев В.Н. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа: (монография) / В.Н. Потураев, В.И. Волошин, С.Н. Пономаренко, А.А. Волошин. – К.: Наук. думка, 2001. – 176с.

5. Орлов В.С. Влияние объемной концентрации газа в парах порошкообразных материалов на производительность пневмотранспортирования сложным потоком / В.С. Орлов // Вісник Східноукраїнського університету ім. В. Даля. – Луганськ: СНУ, 2008. – № 3 (121). – С. 260-264.

6. Чальцев М.Н. Разгрузочные характеристики малогабаритного камерного питателя / М.Н. Чальцев // Вестник НТУ ХПИ: «Динамика и прочность машин». – 2004. – № 20. – С. 133-144.

7. Чальцев М.Н. Математическая модель вихревого инжектора / М.Н. Чальцев, С.В. Войцеховский // Научные труды Донецкого государственного технического университета. – Донецк, ДонНТУ, 2001. Вып. 36. – С. 204-209.

8. Гуцин О.В. Экспериментальные исследования массопереноса пневмотранспортной установкой с порционным движением сыпучих материалов / О.В. Гуцин // Наук. вісн. будівництва. – Харків: ХДТУБА-ХОТВАБУ, 2000. – С. 254-260.

9. Гуцин В.М. Нова концепція та її реалізація в розробках вискоєфективних засобів пневматичного транспортування сипучих матеріалів / В.М. Гуцин // Машинознавство. – 2000. – № 2 (23). – С. 39-43.

10. Патент України № 27571. МПК 65G/00. Живильний пристрій для пневмотранспорту сипких матеріалів / В.М. Гуцин, В.Й. Сівко, О.В. Гуцин, А.М. Українець. Власник: ДДМА. Заяв. 31.05.2007. Опубл. 12.11.2007. Бюл. № 11.

11. Патент України № 54287. МПК B65G/00. Живильний пристрій для пневмотранспорту сипких матеріалів / В.М. Гуцин, Р.І. Рибалко, О.В. Гуцин, Е.С. Виноградов, М.М. Ковальчук. Власники: В.М. Гуцин, Р.І. Рибалко, О.В. Гуцин, Е.С. Виноградов, М.М. Ковальчук. Заяв. 09.03.2010. Опубл. 10.11.2010. Бюл. № 11.

12. Патент України № 85975. МПК B65G/04, B65G53/52. Живильний пристрій для пневмотранспорту сипких матеріалів / В.М. Гуцин, О.В. Гуцин, Р.І. Рибалко, О.О. Передерєєв. Власники:

В.М. Гушин, О.В. Гушин, Р.І. Рибалко, О.О. Передереев. Заяв. 31.05.2013. Опубл. 10.12.2013. Бюл. № 23.

13. Карышев Ю.Д. Дифференциальные уравнения отдельных движений закрученного потока газа / Ю.Д. Карышев // В кн. Динамика систем, механизмов и машин. – Омск: ОмГТУ, 1995. – Кн № 1. – С. 86-92.

14. Брэдшоу П. Турбулентность / под. ред. П. Брэдшоу. – М.: Машиностроение, 1980. – 344 с.

**Гушин О.В. Аналіз течії сипких матеріалів на ділянці завантаження в пневмотранспортний трубопровід агрегату з виготовлення сумішей для автомобільних доріг**

*Анотація.* У статті розглянуто результати аналітичних досліджень умов формування структурованих аеросумішей на ділянці завантаження сипкого матеріалу у пневмотранспортний трубопровід. Показано особливості течії аеросумішей при верхньому підводі допоміжного повітряного струменю. На основі рівняння швидких рухів для елементарного об'єму розглядається стійкість рівноваги межі повітря матеріального потоку. Відповідно до законів турбулентності визначено основні характеристики вихорів, що виникають при пульсаційному русі. Результати досліджень свідчать про перспективність використання дії повітряних струменів на сипкий матеріал при розробці новітніх типів завантажувальних пристроїв для пневмотранспортних установок, що працюють при структурованих режимах течії аеросуміші.

**Ключові слова:** пневматичний транспорт, завантажувальний пристрій, повітряний струмінь, сипкий матеріал

**Guschin O.V. The analysis of bulk materials flow on the site of download in the pneumatic pipeline for the production of mixtures for roads**

*Annotation.* The article describes the results of analytical studies of conditions of formation of structured aeromixture in the area of bulk material loading in the pneumatic pipeline. The features of the current aeromixture at the top supply more air flow. On the basis of the fast movements of the elementary volume is considered stable equilibrium border air-material flow. The main characteristics of vortices arising at pulsating motion in accordance with the laws of turbulence. The research results show the availability of the action of the air jets on the bulk material in the development of new types of loading devices for pneumatic conveying systems operating under framed mode aeromixture flow.

**Keywords:** pneumatic transport, a charging device, an air stream, the bulk material.

Стаття надійшла до редакції 05.05.2015 р.