

# СИНЕРГЕТИЧНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

---

*Проблеми вдосконалення пневмотранспорту сыпучих матеріалів розглядаються на основі синергетичної концепції та часткової детермінованості. Перебіг аеросмесей з внутріволновими і внутріпорційними турбулентними рухами розглядається як процес самоорганізації з колективними рухами, визначальними ефективні коефіцієнти переносу імпульсу, сили і маси рухомого матеріального потоку.*

*The problems of the developments of pneumatic transport of loose materials are considered on the general laws of the synergetic conception and the partial determination. The current of aeromixes with intrawave whirls is considered as process of self-organizing with the collective movements defining effective factors of carrying over of an impulse, force and weights of a moving material stream.*

---

## **Введение. Постановка задачи.**

Пневматический транспорт достаточно широко распространен, как для перемещения сыпучих материалов с разными физико-механическими свойствами, так и для его совмещения с выполнением определенных технологических операций. Переход к новым энергосберегающим технологиям поставил ряд задач перед данным видом транспорта: снижение энергоемкости процесса транспортирования, исключение деградации частиц перемещаемых материалов, уменьшение износа трубопроводов и комплектующего оборудования, снижение объемов выбрасываемой пыли в производственную атмосферу и улучшение экологии окружающей среды. Назрела необходимость разработки новых нетрадиционных способов пневматического транспортирования сыпучих материалов на значительные расстояния при одновременном снижении расхода энергии на их перемещение.

Современный подход к разработке нетрадиционных способов пневматического транспортирования [1] основывается на исследованиях фазовых состояний и переходов аэросмесей, условий их формирования и сохранения на разных участках трубопровода [2]. Движение аэросмесей сопровождается сложными процессами, являющимися следствием многообразия комбинаций фаз и их структур, межфазных и внутрифазных взаимодействий переходов.

Исследования режимов движения гомогенных и гетерогенных сред (газ-твердые частицы) [2...4] показали, что в трубопроводе наблюдается переход от ламинарного в устойчивое турбулентное движение через ряд промежуточных неустойчивых состояний. В пределах одного трубопровода могут существовать два или более режима движения с их взаимными последовательными переходами. В пневмотранспортных установках, работающих в волновом и порционном режимах движения аэросмесей, помимо общего поступательного перемещения сыпучего материала вдоль транспортного трубопровода имеет место внутриволновая и внутриволновая турбулентность, характеризующаяся большими процессами завихренности. При этом сохраняются характерные особенности турбулентного режима движения, т.е. его неравновесность, большое число макроскопических степеней свободы, существенная, а во многих случаях определяющая, роль гидродинамических флуктуаций, в силу возбуждения большого числа макроскопических степеней свободы в значительной мере его непредсказуемость. Анализ выполненных исследований показывает, что процессы, наблюдающиеся в пневмотранспортном трубопроводе, исследованы недостаточно. Их изучение имеет существенный научный и практический интерес.

Данная работа направлена на анализ процессов, протекающих в пневмотранспортном трубопроводе, с целью создания новых высокоэффективных пневмотранспортных установок, работающих при нетрадиционных режимах движения аэросмесей, предназначенных для перемещения сыпучих материалов.

## **Изложение основного материала.**

Перемещение сыпучих материалов в транспортном трубопроводе под воздействием несущего газового потока можно рассматривать как открытую систему, которой присуща неравномерность, связанная с поступлением энергии и сопротивлением движению, большое число взаимодействующих подсистем динамических переменных, вязкость среды (ее внутреннее свойство), макроскопическое взаимодействие частиц между собой и несущим потоком. Особенность этой системы – явление перемеживаемости, т.е. последовательной сменяемости регулярных на конечных временных состояниях движения (процессы формирования и разрушения волн и порций, переходы ламинарного течения в турбулентное и наоборот). При определенных условиях, в пневмотранспортном трубопроводе, имеет место возникновение упорядоченных структур и форм движения из первоначально неупорядоченных, нерегулярных форм движения без специальных упорядочивающих их внешних воздействий на систему.

Принятие основных постулатов синергетики [5, 6]: относительная степень упорядоченности состояний в открытых системах, позволяющая отличить «порядок» от «хаоса»; критерий степени хаотичности или упорядоченности  $K$  – энтропия (энтропия Крылова-Колмогорова-Синая), показатели Ляпунова, энтропия Больцмана-

Гиббса-Шеннона ( $H$  – теорема теплового равновесия Больцмана,  $S$  – теорема);  $(S_L - S_T)$  – разность энтропий является функцией Ляпунова и, ламинарное течение, принятое за состояние хаоса, – неустойчиво; принцип производства энтропии Гнеуст (Густ – система идет по пути уменьшения производства энтропии; турбулентное течение более упорядочено, чем ламинарное; по критерию  $S$  – теоремы переход от ламинарного течения к турбулентному есть процесс самоорганизации (self-organization); установление между отдельными областями новых макроскопических связей и существенное усложнение структуры позволяет предположить, что постоянно происходящие неравновесные фазовые переходы в пневмотранспортном трубопроводе осуществляется по схеме П X (порядок хаос), т.е. по схеме самоорганизации.

Состояние локального равновесия в ламинарном потоке характеризуется распределением [4]

$$f_L(r, v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{m(vU_L(r))^2}{2kT}\right],$$

здесь  $U_L(r)$  – средняя скорость ламинарного потока.

Приняв  $\rho = const$  и  $T = const$ , локальная энтропия

$$S_L(r) = km \int f_L(r, v) \ln f_L(r, v) dv, n = N/V.$$

При турбулентном потоке скорость потока  $\tilde{u}(r, t)$  является случайной функцией, случайным (пульсирующим) является и распределение

$$\tilde{f}_L(r, v, t) = \left(\frac{m}{2kT}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{m(v - \tilde{u}(r, t))^2}{2kT}\right].$$

Мерой неопределенности может служить осредненная энтропия

$$S_T = (\tilde{S}_T) = -kn \int \langle \tilde{f}_T(r, v, t) \ln \tilde{f}_T(r, v, t) \rangle dv.$$

Разность энтропий ламинарного и турбулентного течений в соответствии с  $S$ -теоремой

$$T(S_L - S_T) = \frac{3}{2} knT \ln \frac{kT}{kT(m/3) \langle (\delta u)^2 \rangle} \approx \frac{mn}{2} \langle (\delta u)^2 \rangle.$$

Производная по управляющему параметру (в качестве управляющего параметра принято число Рейнольдса)

$$\frac{d}{d Re} (S_L - S_T) > 0,$$

что позволяет переход от ламинарного течения к стационарному турбулентному течению рассматривать как процесс самоорганизации режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе.

Движения аэросмесей в трубопроводе сопровождаются диссипацией энергии на транспортирование и на движения в масштабных вихревых образованиях в пределах отдельно взятой волны или порции. При установлении асимптотически устойчивого состояния движения баланс внешних сил эквивалентен силам сопротивления движению

$$\sum F_{внеш} = \sum F_{соп}.$$

Зависимость энергии объема аэросмеси  $W$  при установившемся движении от соотношения внешних сил и сил сопротивления, выраженная через соотношения коэффициентов сопротивления движению аэросмеси ( $\epsilon_E$ ) и внешней энергетической силы ( $\epsilon_{EX}$ ) показывает, что при значениях близких к  $\epsilon_E \cong \epsilon_{EX}$  система находится в неустойчивом состоянии. Структуры легко разрушаются, переходя в одно из устойчивых состояний: транспортирование в режиме полета отдельных частиц во взвешенном состоянии или флюидизированным потоком. Отдельные частицы объема движущейся смеси обладают свойствами необходимыми для перехода в перемеживающийся режим. Наличие внутреннего трения в данной системе влечет за собой существование аттрактора, т.е. асимптотического предела ( $t \rightarrow \infty$ ) решений, предела, на который не оказывает прямого влияния начальное условие – исходная точка. Колебательные движения частиц существуют на ограниченных слабо перекрывающихся интервалах значений исследуемого параметра ( $\tilde{\Gamma}$ ). Стохастический режим должен установиться при таком значении параметра  $\tilde{\Gamma}$ , когда он выходит за пределы  $[\tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma}_2]$  в сторону больших или маленьких значений, например,

$$\tilde{\Gamma}(t) = \frac{\tilde{\Gamma}_1 + \tilde{\Gamma}_2}{2} + (\tilde{\Gamma}_1 - \tilde{\Gamma}_2) \sin \epsilon t,$$

где  $\epsilon$  – малый параметр;

$t$  – интервал времени.

В данном случае стохастические режимы движения возникают при переходе через перемеживаемость, т.е. являются следствием столкновения асимптотически устойчивых и неустойчивых состояний движения ( $\tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}_2$ ). Другая причина перехода поясняется: всегда найдется сколь угодно малое возмущение

движения (сценарий Ландау), когда аттрактор с большим числом независимых частот превратится в так называемый «странный аттрактор», содержащий стохастические притягивающие траектории,

$$-\Gamma = \beta \bar{\Theta}^2 \quad \text{или} \quad \bar{\Theta}^2 = -\frac{\Gamma}{\beta},$$

где  $\beta$  – числовой коэффициент;

$\Theta$  – скорость движения частиц.

На рис. 1 представлен график зависимости энергии объема аэросмеси  $\bar{W}$  в установившемся состоянии движения от показателя  $\tilde{\Gamma}$ , где  $\tilde{\Gamma} = \frac{\Gamma}{\beta}$ . Пунктиром изображены  $\tilde{\Gamma}_1$  и  $\tilde{\Gamma}_2$  соответствующие неустойчивым состояниям движения. На графике можно выделить три области. При  $\tilde{\Gamma} < \tilde{\Gamma}_1$  (область I) имеет место колебательное движение частиц материала без отрыва от поверхности трубы;  $\tilde{\Gamma} > \tilde{\Gamma}_2$  (область III) – частицы находятся в полете (режим пневмотранспортирования во взвешенном состоянии);  $\tilde{\Gamma}_1 < \tilde{\Gamma} < \tilde{\Gamma}_2$  – частицы находятся в неустойчивом состоянии. В последнем случае частицы совершают условно-периодические поступательные и вращательные движения. Структура обладает малым запасом устойчивости и легко разрушается, переходя в состояние  $\tilde{\Gamma} < \tilde{\Gamma}_1$  или  $\tilde{\Gamma} > \tilde{\Gamma}_2$ .

Анализ области II показывает, что отдельные частицы объема перемещающейся смеси обладают свойствами для перехода в перемеживающийся режим при медленном изменении параметра  $\tilde{\Gamma}$ . Стохастический режим должен установиться при таком изменении  $\tilde{\Gamma}$ , когда этот параметр выходит за пределы интервала  $[\tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma}_2]$ , как в сторону больших, так и в сторону меньших значений. Данный подход делает возможным объяснение стохатизации движения достаточно сложных с большим количеством переменных таких неконсервативных динамических систем, как пневмотранспортные установки для перемещения сыпучих материалов.

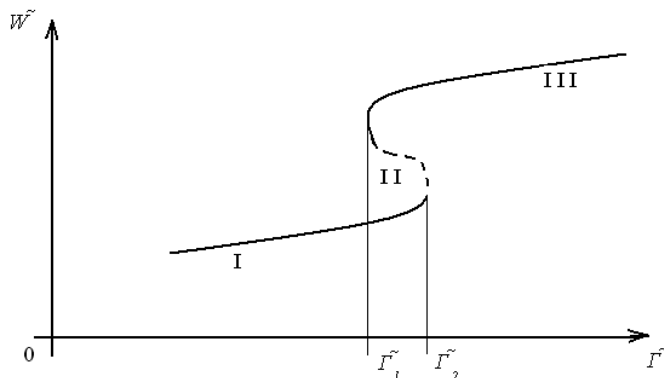


Рис. 1. Зависимость энергии аэросмеси от соотношения внешних сил и сил сопротивления

Течение аэросмесей с внутриволновыми и внутриволновыми турбулентными движениями рассматривается как процесс самоорганизации с коллективными движениями, определяющими эффективные коэффициенты переноса импульса, силы и массы, движущегося материального потока. Процесс самоорганизации массопереноса в пневмотранспортном трубопроводе осуществляется дополнительной подпиткой движущегося материального потока. Энергетическая подпитка реализуется несущим газом, вибрацией или объединенным действием нескольких факторов. Созданию дополнительной завихренности потока также способствуют форма и шероховатость частиц и стенок трубопровода, турбулентность несущего потока, энтропия системы, осцилляционные процессы, наблюдающиеся при движении сыпучих материалов в транспортном трубопроводе.

По аналогии со схемой опыта Релея-Бенара рассматривается воздействие воздушных струй с воздушным слоем, расположенным в длинной горизонтальной трубе прямоугольной формы. В опыте Релея-Бенара возмущающим параметром является изменение температур по высоте слоя жидкости, в данном случае – воздействие воздушных струй. Возможны следующие схемы подвода воздушных струй: через нижнюю пластину снизу-вверх и, наоборот, через верхнюю пластину сверху-вниз перпендикулярно горизонтальной плоскости сосуда; для обеих схем – под углом, изменяющимся в диапазоне  $0 \dots 90^\circ$ . Рассматривается второй случай для сосуда достаточной протяженности с соотношением  $b/d > 5 \dots 6$  с тем, чтобы исключить влияние торцевого эффекта на процессы движения. В соответствии с теорией струй [7] схема взаимодействия струй, соударяющихся с поверхностью экрана (нижняя пластина), при верхнем подводе воздушных струй представлена на рис. 2. Сплошной тонкой линией показана картина формирования потоков в начальный момент соударения воздушных струй с экраном; пунктирной линией – формирование отдельных отраженных вихрей в виде «конвекционных потоков». Разместив на нижней поверхности экрана тонкий слой сухого кварцевого песка (слой песка равен диаметру формирующих его частиц) отслеживается картина формирования газоматериальной смеси в виде движущихся вихревых структур (рис. 2). Аналогичная картина наблюдается и при слое песка существенно превышающем диаметр частиц ( $h > d$ ).

Схема организации движения одиночных частиц в рассматриваемом случае по характеру практически совпадает со схемой организации движения жидкости в «конвекционных валах» [8], у которых расстояние между двумя соседними вертикальными токами сравнимо с расстоянием между пластинами, ограничивающими высоту сосуда. В пространстве образуется регулярная структура вихрей с параллельными горизонтальными осями.

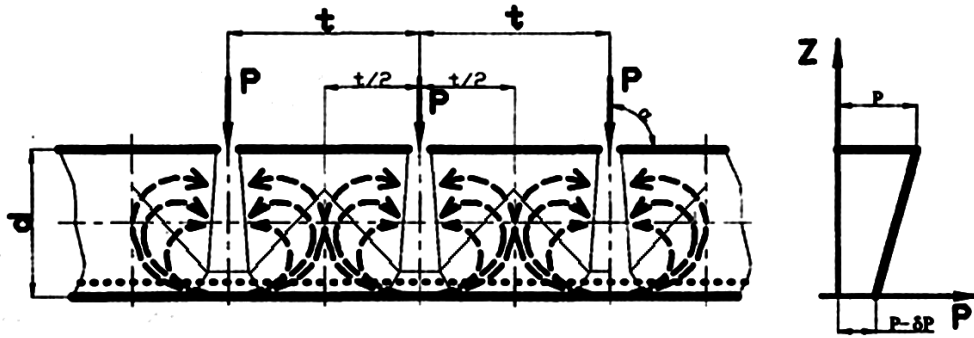


Рис. 2. Схема формирования вихревых структур аэросмесей (угол атаки струи  $\alpha = 90^0$ )

В срединной плоскости наблюдается последовательность чередующихся восходящих и нисходящих потоков. Потоки расположены эквидистантно, расстояние между потоками составляет величину порядка  $d$ . Два соседних потока (вихря) вращаются в противоположные стороны. Если протяженность и ширина сосуда достаточны, то «конвективные валы» могут образовать многочисленные «конвективные структуры» в горизонтальной плоскости. При дальнейшем увеличении давления дополнительной воздушной струи структура усложняется, но сохраняет определенную регулярность. С последующим увеличением давления структура становится намного разнообразнее и как бы разрушается. Такое сложное непредсказуемое поведение системы обусловлено множеством пространственных систем, каждая из которых эволюционирует по своему, порождая турбулентный режим.

Изменение расходов воздуха в радиальной пристеночной струе при  $h \leq 12$  ( $h = d/r_0$ ,  $r_0$  – радиус сопла) описывается зависимостью [9]

$$\frac{\Delta G}{G_0} = 0,55 + 0,45 \frac{r}{r_0},$$

где  $r$  – радиус струи на расстоянии  $h$  от сопла.

Откуда масса воздуха, присоединенная к струе из окружающей среды  $\Delta G = G - G_0$ , составляет

$$\frac{\Delta G}{G_0} = 0,45 \left( \frac{r}{r_0} - 1 \right),$$

где  $G, G_0$  – соответственно расход воздуха в радиальной пристеночной струе и расход воздуха на выходе из сопла.

При изменении расстояния между выходным сечением сопла и нижней стенкой в диапазоне  $0 < d < 12$  относительный расход воздуха в фиксированном сечении радиальной струи ( $r = const$ )  $r_0$ ) практически не зависит от  $h$ . Интенсивность присоединения из окружающего воздуха к струе (эжекционная способность струи) для радиальной струи в несколько раз больше, чем для основного участка свободной осесимметричной струи и ее начального участка.

Зависимость относительного разрежения  $\langle \Delta P \rangle$  на нижней поверхности при  $3 < h < 12$  определяется

$$\langle \Delta P \rangle = -\frac{0,19}{h^2} \left( 1 - \frac{r}{r_0} \right)^2.$$

Потеря подъемной силы струи (или соответствующее разрежение на внутренней поверхности плоскости) из-за взаимодействия эжектируемого потока определяется

$$\Delta F_0 = 0,095 \frac{\rho_0}{\rho} \frac{(1 + r_0/r)(1 - r_0/r)}{h^2},$$

где  $\rho_0$  и  $\rho$  – плотность эжектируемого воздуха и потока струи.

Более сложная картина наблюдается при движении аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе. Воздействие воздушного потока на сыпучий материал, размещенный на нижней поверхности материалопровода, рассматривается для случая, когда струя соударяется с плоской поверхностью сыпучей среды, расположенной на жестком экране с поперечным сечением круговой формы. Дополнительная воздушная струя воздействует на сыпучий материал под углом атаки  $\alpha > 0$  (рис. 3).

В этом случае давление на поверхность экрана при натекании на него воздушной струи имеет зоны положительных и отрицательных давлений. Неравномерность распределения давлений затопленной струи способствует общей турбулизации потока. Рассматривая формирование вихрей стелющейся струи по направлению общего движения, можно заметить, что направление вихрей при переходе от нижней плоскости к верхней проходит через область с неустойчивым направлением вихрей. В определенном месте два вихря разворачиваются в противоположные стороны. Аналогичная картина наблюдается и в стелющейся струе, имеющей обратное направление. Анализируя всю систему вихрей, нетрудно заметить, что направление каждого вихря, в данной области можно изменить на прямо противоположное, не внося при этом существенных изменений в геометрические размеры

сосуда и динамические свойства потока. Поэтому направления движения вихрей в рассматриваемой области можно считать равновероятными. Это свойство, применительно к данному случаю, формируется и в другой форме – в любой точке вихря данной скорости она может быть направлена как в одну, так и в другую противоположную сторону.

Данное свойство может быть пояснено бифуркационной диаграммой (рис. 4) в виде графика зависимости скорости  $V$  в некоторой точке как функции константы  $K$ . При  $K < K_C$  единственное возможное состояние есть состояние покоя ( $v = 0$ ). На пороге неустойчивости  $K_C$  происходит бифуркация; выше порога при любом заданном значении  $K$  два состояния вихрей с равными, но противоположно направленными скоростями. С точки зрения теории динамических систем переход при  $K = K_C$  является бифуркацией между двумя стационарными состояниями: состоянием покоя и «конвективным» состоянием.

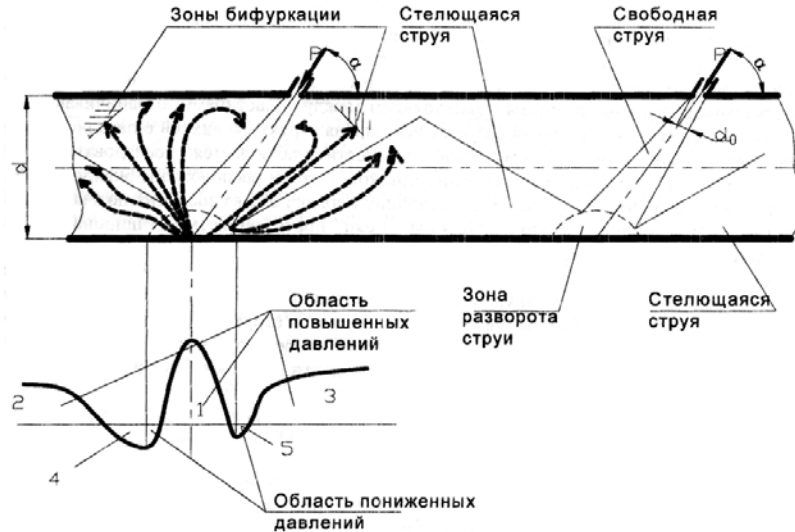


Рис. 3. Схема формирования вихревых структур с возникновением бифуркационных зон (угол атаки  $\alpha = 45^0$ )

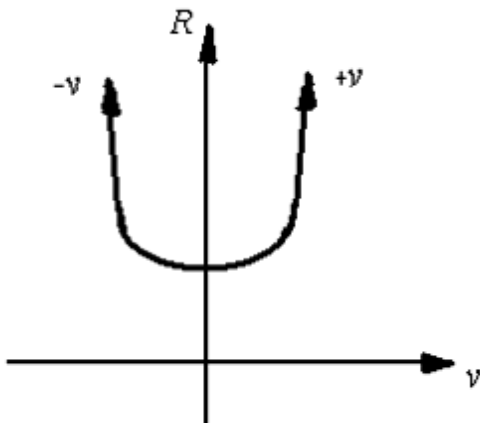


Рис. 4. Бифуркационная диаграмма вихревых структур в пневмотранспортном трубопроводе

Достаточная сходимость полученных результатов с моделью Релея-Бенара позволяет при дальнейших анализах синергетичности процессов, протекающих в пневмотранспортных установках, воспользоваться моделью Лоренца. Модель Лоренца описывается с помощью уравнения [8]

$$X = P_r(Y - X); Y = -XZ + \mu X - Y; Z = XY - bZ$$

где  $P_r$  – число Прандтля;  $\mu$  – управляющий параметр;

$$b = \frac{4\pi}{\pi^2 + q^2}; \mu = \frac{q^2}{(\pi^2 + q^2)^3} \text{Re};$$

$$X = \frac{\pi q}{\sqrt{2}(\pi^2 + q^2)} \Psi_1; Y = \frac{\pi q^2}{\sqrt{2}(\pi^2 + q^2)} Q_1;$$

$$Z = \frac{\pi q^2}{(\pi^2 + q^2)^3} Q_2$$

В модели Лоренца полагается, что количественные свойства уравнений остаются неизменными, в частности, законы сохранения таких экстенсивных переменных как масса, импульс, давление. Параметр  $\mu$  в данной модели является бифуркационным или управляющим параметром. Стационарные решения по определению таковы, что

$$\dot{X} = \dot{Y} = \dot{Z} = 0; Y = X; Z = \frac{1}{2} X^2; X = \pm [b(\mu - 1)]^{0,5}.$$

При  $0 \leq \mu \leq 1$  существует только одно решение. Когда параметр  $\mu$  становится больше единицы, это решение теряет устойчивость. Возникают два стационарных решения

$$X = Y = \pm [b(\mu - 1)]^{0,5}; Z = \mu - 1.$$

В данном случае наблюдается бифуркация типа вилки, при которой устойчивая неподвижная точка формирует две другие неустойчивые точки. Эти результаты следуют из инвариантности потока относительно симметрии  $(X, Y, Z) (-X, -Y, -Z)$ . Для оценки скорости разбегания траекторий используется мера расходимости траекторий, называемая показателем Ляпунова.

#### Выводы.

Анализ процессов, протекающих в пневмотранспортном трубопроводе при транспортировании сыпучих материалов, показал, что:

- перемещение сыпучих материалов в транспортном трубопроводе под воздействием несущего воздушного потока, можно рассматривать как открытую систему, с присущими ей особенностями;
- принятие постулатов синергетики позволило предположить, что постоянно происходящие неравновесные фазовые переходы в пневмотранспортном трубопроводе осуществляются по схеме П Х (порядок хаос), т.е. по схеме самоорганизации;
- стохастические режимы движения возникают при переходе через перемеживаемость, т.е. являются следствием столкновения асимптотически устойчивых и неустойчивых движений аэросмесей;
- течение аэросмесей с внутриволновыми и внутрипорционными турбулентными движениями рассматривается как процесс самоорганизации с коллективными движениями, определяющими эффективные коэффициенты переноса импульса, силы и массы движущегося материального потока.

Объяснение явлений, имеющих место в пневмотранспортном трубопроводе при перемещении аэросмесей в нестационарных режимах массопереноса при нетрадиционном исполнении материалопровода, позволяет наметить и осуществить ряд новых технических решений, направленных на создание высокоэффективных пневмотранспортных установок для перемещения сыпучих материалов.

#### Список литературы.

1. Гуцин В.М. Новые пневмотранспортные установки для перемещения сыпучих материалов / В.М. Гуцин // Зб. наук. праць «Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини». – К.: Вип. 55, 2000. – С. 70-73.
2. Гуцин В.М. Анализ режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / В.М. Гуцин, О.В. Гуцин // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: темат. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – №1 (18). – С. 78-83.
3. Гуцин В.М. Восстановление структуры движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / В.М. Гуцин // Вестн. нац. техн. ун-та Украины «КПІ». – К.: Вып. 38. – т. 2. 2000. – С. 158-162.
4. Гуцин В.М. Движение аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / В.М. Гуцин // Вестн. нац. техн. ун-та Украины «КПІ». Машиностроение. – Вып. 36. – т. 1, К.: 1999. – С. 79-86.
5. Хакен Г. Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам / Г. Хакен // Пер. с англ. – М.: 1991. – 204 с.
6. Климонтович Ю.Л. Турбулентное течение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытых систем / Ю.Л. Климонтович // М.: Наука, 1990. – 320 с.
7. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гришович и др. // М.: Наука, 1984. – 716 с.
8. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности: Пер. с франц. / П. Берже, И. Помо, К. Видаль // М.: Мир, 1991. – 368 с.
9. Яковлевский О.В. Исследование взаимодействия струй с близко расположенными экранами / О.В. Яковлевский, А.Н. Секундов // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1964. – №1. – С. 104-114.