

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОЦЕССАМ ДВИЖЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ АЭРОСМЕСЕЙ МАТЕРИАЛОВ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В ПНЕВМОТРАНСПОРТНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Гущин О. В.

Показано, что создание новых типов высокоэффективных пневмотранспортных установок для перемещения сыпучих материалов, применяемых в порошковой металлургии, базируется на исследованиях фазовых переходов аэросмесей в материалопроводе. Анализ структурированных режимов (волновое и порционное) движения аэросмесей предлагается выполнять на основе синергетического подхода. Рассмотрен фазовый портрет автоволновых процессов с бегущим фронтом волны. Показан процесс формирования структурированного течения порошковых материалов под воздействием дополнительных воздушных струй с возникновением бифуркационных зон. Для анализа и оценки синергетичности процессов предлагается воспользоваться моделью Лоренца.

Показано, що створення нових типів високоефективних пневмотранспортних установок для переміщення сипучих матеріалів, що застосовуються в порошкній металургії, базується на дослідженнях фазових переходів аеросумішей в матеріалопроводі. Аналіз структурованих режимів (хвильовий і порційний) руху аеросумішей пропонується виконувати на основі синергетичного підходу. Розглянуто фазовий портрет автоволнових процесів з біжучим фронтом хвилі. Показано процес формування структурованої течії порошкових матеріалів під впливом додаткових повітряних струменів з виникненням біфуркаційних зон. Для аналізу та оцінки синергетичності процесів пропонується скористатися моделлю Лоренца.

It is shown that the creation of new types of highly efficient pneumatic conveying systems for transportation of bulk materials used in powder metallurgy, based on studies of phase transitions in aeromixturemagistraleprovoде . Structured analysis modes (wave and an à la carte) movement aeromixture invited to perform on the basis of a synergistic approach. The phase portrait of self-oscillatory processes with a traveling wave front. The process of forming a structured flow of powder materials under the influence of additional air jets with the occurrence of bifurcation zones. To analyze and evaluate the synergies process has a Lorenz model.

Гущин О. В.

канд. техн. наук, ст. преп. ДГМА
app@dgma.donetsk.ua

УДК 621.867.82

Гущин О. В.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОЦЕССАМ ДВИЖЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ АЭРОСМЕСЕЙ МАТЕРИАЛОВ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В ПНЕВМОТРАНСПОРТНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Материалы, используемые в порошковой металлургии, имеют высокую стоимость, то для их перемещения целесообразно использовать высокоэффективные пневмотранспортные установки, работающие при высокой концентрации аэросмесей. Создание новых типов пневмотранспортных установок для сыпучих материалов базируется на исследованиях фазовых состояний аэросмесей и их переходов [1], подчиняющихся законам синергетики.

Впервые гипотеза о синергетичности процессов, протекающих в пневмотранспортном трубопроводе при движении аэросмесей, рассмотрена в работах [2–6]. Исследование режимов движения гомогенных и гетерогенных потоков показали, что в пневмотранспортном трубопроводе наблюдаются постоянные переходы от ламинарного в устойчивое турбулентное течение через ряд неустойчивых промежуточных состояний [1]. В пределах одного трубопровода могут существовать два и более режима движения с их последовательными переходами. При структурированных режимах (волновом и порционном) движения аэросмесей, помимо общего поступательного перемещения сыпучего материала вдоль трубопровода, имеет место внутрискрутная турбулентность, характеризующаяся большими процессами завихренности. Сохраняются и характерные особенности турбулентного течения: неравномерность, большое число макроскопических степеней свободы, существенная, а во многих случаях и определяющая роль гидродинамических флуктуаций, в значительной мере его непредсказуемость. Принятие за основу постулаты синергетики [7–10] позволяет предположить, что постоянно происходящие неравновесные фазовые переходы в пневмотранспортном трубопроводе осуществляются по схеме $P \leftrightarrow X$, т. е. по схеме самоорганизации.

Новый концептуальный подход в изучении протекающих процессов в пневмотранспортном трубопроводе, рассматриваемом в качестве открытой системы, подчиняющейся общим законам синергетики, позволяет обосновать явления саморегулирования и самоорганизации массопереноса в материалопроводе. Движение гомогенных и гетерогенных структурированных потоков представляется как процесс самоорганизации с коллективными связями, определяющими эффективные коэффициенты переноса импульса, силы и массы [2–4]. Регулирование массопереноса в этом случае осуществляется через набор управляющих параметров, в качестве которых приняты числа Рейнольдса, Фруда, Релея и Тейлора [7–10].

Исследование протекающих процессов при пневматическом транспортировании сыпучих материалов представляется целесообразным осуществлять на основе общих подходов к проблеме предсказуемости, основанных на представлении о частично детерминированных процессах, допускающих динамический прогноз на ограниченных интервалах времени [10].

Концепция частичной детерминированности (случайность и детерминированность не противопоставляются друг другу, а рассматриваются как полюса единого свойства – частичной детерминированности) применима при описании турбулентных потоков движущихся аэросмесей, поскольку у них имеется пространственно-временная область совместимости.

Целью данной работы является обоснование синергетичности процессов, протекающих в пневмотранспортном трубопроводе при движении структурированных аэросмесей, и на этой основе разработка научных основ создания высокоэффективных установок.

По аналогии со схемой опыта Релея-Бенара [9] рассматривается взаимодействие воздушных струй с идеально сыпучим материалом, расположенном в транспортном трубопроводе круговой формы. В опыте Релея-Бенара возмущающим параметром является изменение температур по высоте слоя жидкости, в данном случае – воздействие воздушных струй. Схемы подвода воздушных струй осуществляется снизу-вверх и наоборот, под углом атаки струи

$\alpha = 0-90^\circ$. Разместив на нижней поверхности трубы тонкий слой кварцевого песка (порошкового материала, кальцинированной соды, частиц полиэтилена и др.), отслеживается картина формирования воздухоматериальной смеси в виде движущихся вихревых структур (рис. 1).

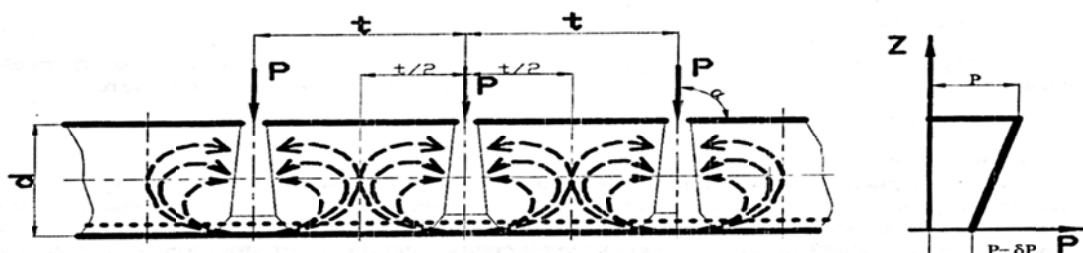


Рис. 1. Схема формирования вихревых структур аэросмеси в горизонтальном трубопроводе (угол атаки воздушной струи $\alpha = 90^\circ$)

Процесс наблюдается в сосуде, в котором в верхней и нижней части поддерживаются разные давления, причем в нижней части давление несколько выше. При малых градиентах давления осуществляется передача энергии от слоя нижних частиц к верхним. Макроскопическое движение пока не наблюдается.

Если градиент давлений превышает некоторое критическое давление, начинается процесс конвекции, при котором имеет место макроскопическое движение. Это движение осуществляется упорядочено. Таким образом, в системе при определенных отклонениях от равновесия возникает структура и симметрия системы, которая становится ниже в сравнении с однородной системой. Это снижение симметрии не связано с симметрией внешнего влияния (внешнее возмущение – поддув воздуха – в данном случае однородно) и определяется свойствами системы и величиной внешнего возмущения. Осуществляется процесс самоорганизации системы, которая связана с формированием более сложной структуры в сравнении с исходной.

Количественное исследование эффекта выполняется с характеристикой среды полей скоростей $\vec{v}(\vec{r}, t)$ и температурой $\vec{T}(\vec{r}, t)$. В этом случае среда описывается следующими уравнениями [11]. Уравнение Навье-Стокса:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho F_i - \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

где тензор давлений определяется:

$$P_{ij} = p \delta_{ij} + p_{ij}, \quad (2)$$

$$p_{ij} = -\eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \eta \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij}, \quad (3)$$

где p – давление; η – вязкость; \vec{F} – сила тяжести.

Направив ось z перпендикулярно поверхности среды в противоположном направлении действию силы тяжести, получим: $\vec{F}_x = \vec{F}_y = 0$, $\vec{F}_z = -\vec{g}$.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = 0. \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \chi \Delta T, \quad (5)$$

где χ – коэффициент теплопроводности.

Граничные условия имеют вид:

$$T = T_1 \quad \text{при } z = 0; \quad (6)$$

$$T = T_2 \quad \text{при } z = h; \quad (7)$$

$$v_z = 0 \quad \text{при } z = 0, h, \quad (8)$$

где h – толщина слоя.

Помимо этих условий решения должны удовлетворять граничным условиям для v_x, v_y при $z = 0, h$. Эти условия зависят от поверхностей, ограничивающих систему.

Уравнения (1) и (4) преобразуются:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \left(1 + \frac{\delta\rho}{\rho_0}\right) F_i - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \nu \Delta v_i, \quad (9)$$

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} \equiv \operatorname{div} v = 0, \quad (10)$$

где $\delta\rho = \rho - \rho_0$ – среднее значение плотности;

$$v = \frac{\eta}{\rho_0}.$$

Пневмотранспортный трубопровод с перемещаемым в нем сыпучим материалом является незамкнутой системой, которая не находится в состоянии равновесия. В материалопроводе возникают автоволновые процессы, поддерживаемые за счет притока энергии воздушного потока извне, т. е. подводимого через воздухоподводящие патрубки. К основным типам автоволновых процессов, возникающих в пневмотранспортном трубопроводе, следует отнести бегущие фронты, бегущие импульсы, бегущие центры, спиральные волны и вихревые кольца.

Рассматривается автоволновой процесс в виде бегущего фронта в системе, которая описывается одной динамической переменной. Волновые процессы распространяются вдоль оси oz . Уравнение для динамической переменной записывается в виде:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} + f(X), \quad (11)$$

где $f(X)$ – нелинейная функция аргумента.

Для однородного стационарного случая ($X = \text{const}$) уравнение (11) имеет особые точки при $X = X^{(s)}$, при этом $f(X^{(s)}) = 0$. В бесконечности система однородна и находится в одной из особенных точек $X = X^{(s)}$ при $z \rightarrow \pm\infty$. Для бегущих волн, в которых находится система при $z \rightarrow -\infty$ и $z \rightarrow +\infty$, особые точки разные.

Вводится автоволновая переменная:

$$\xi = z - vt, \quad (12)$$

которая описывает волновые процессы и, считая, что $X(z, t)$, зависящая от ξ , т. е. $X(z, t) = X(\xi)$.

Решения с такой зависимостью динамической переменной от аргументов являются отдельными решениями уравнения (11), которые описывают волновые процессы.

Введя обозначения $X_1 = X$, $X_2 = \frac{\partial X}{\partial \xi}$ и сделав замену ξ на t , из уравнения (11) получено уравнение для фазовых траекторий:

$$X_2 \frac{\partial X_2}{\partial X_1} + \nu X_2 + f(X_1) = 0 \quad (13)$$

Допускается, что функция $f(X_1)$ имеет вид, приведенный на рис. 2 (кривая 1). В этом случае особыми точками являются точки $X_1^{(1)}$ и $X_1^{(3)}$. В точке $X_1 = X_1^{(1)}$ $f'(X_1^{(1)}) > 0$ и поэтому при $\nu \neq 0$ особая точка есть узел или фокус, а в точке $X_1 = X_1^{(3)}$ $f'(X_1^{(3)}) < 0$ особая точка

есть излом. Возможные фазовые траектории решений уравнения (13) для функции $f(X_1)$, которая задана кривой 1 (рис. 2), изображены на рис. 3. Стрелками показаны направления движения точки на траектории при увеличении ξ .

Рассматриваются автоволны, описываемые уравнением (11), которое задается на рис. 2 кривой 2. Исследования показывают, что в данном случае существуют три стационарные точки, в которых $X_2^{(s)} = 0, X_1^{(s)} = X_1^{(1)}, X_1^{(2)}, X_1^{(3)}$. При этом $X_1^{(1)}$ и $X_1^{(3)}$ стойкие относительно малых флуктуаций, а $X_1^{(2)}$ является нестойкой относительно флуктуаций. Фазовые траектории, которые описывают автоволны в рассматриваемом случае для значений $\nu = 0$ и $\nu \neq 0$, представлены на рис. 4.

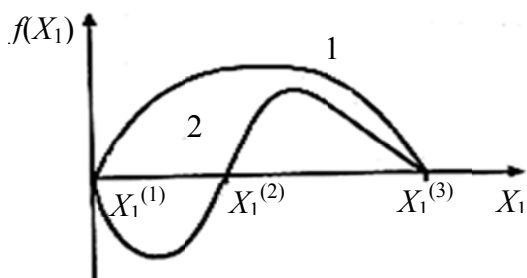


Рис. 2. Типы исследуемых нелинейных функций

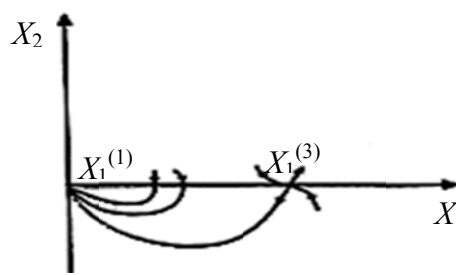


Рис. 3. Фазовые траектории для системы с нелинейной функцией

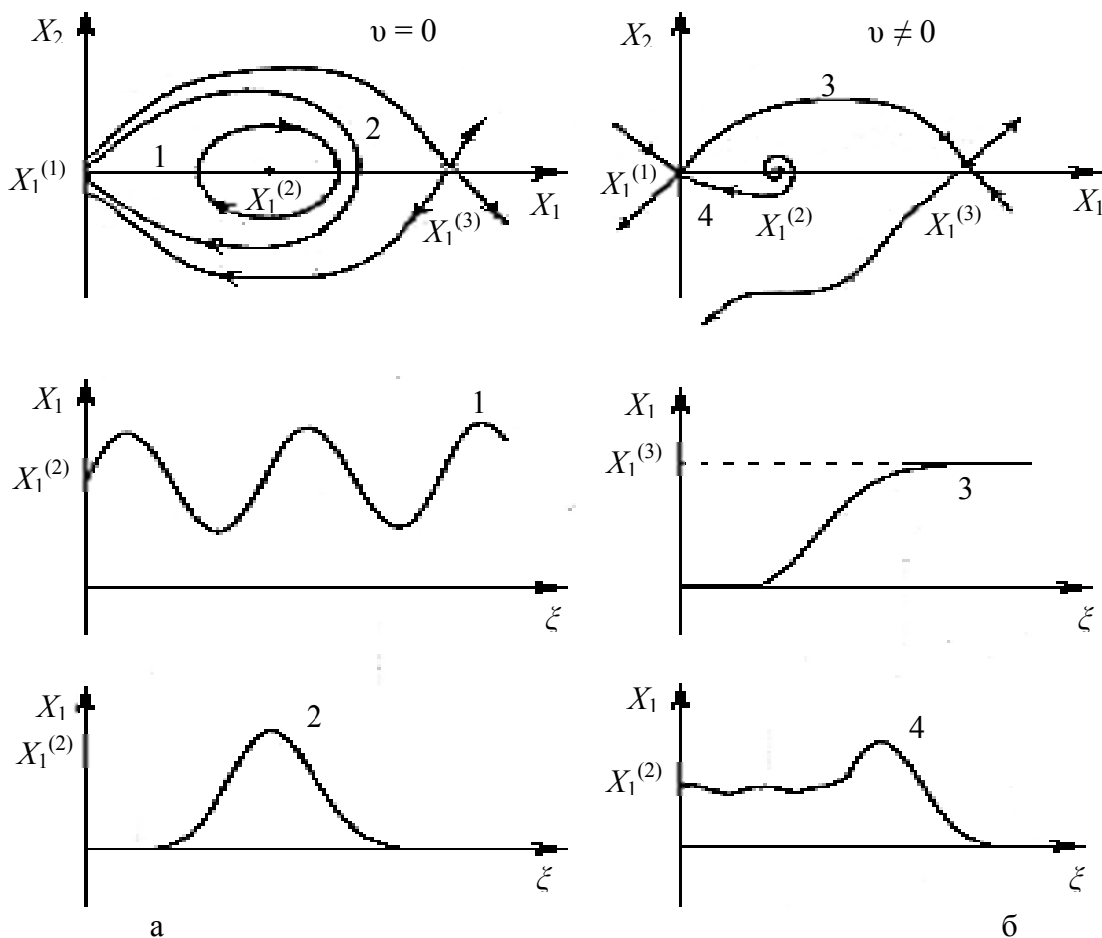


Рис. 4. Фазовые траектории и координатная зависимость динамических переменных с нелинейной функцией 2

При воздействии воздушного потока на движущуюся смесь в нижней части пневмотранспортного трубопровода задача может быть рассмотрена как плоская нестационарная задача об истечении воздушной струи из канала в сносящий поток (рис. 5, а). Предполагается, что скорость бокового течения u_∞ , а также скорость движения воздуха на большом удалении от выходного сечения BC являются постоянными. Плотность потока, вытекающего из канала, равна плотности потока в окружающем пространстве. В начальный момент времени $t = 0$ течение потока потенциальное и безотрывное. При $t = 0$ с острых кромок границы B и C в поток сходят вихревые пелены. Источниками завихренности вследствие отрыва пограничных слоев на стенках AB и CD пренебрегается. Пренебрегается также генерацией и диссипацией завихренности в трубе. Непрерывный процесс образования вихревых пелен заменяется дискретным.

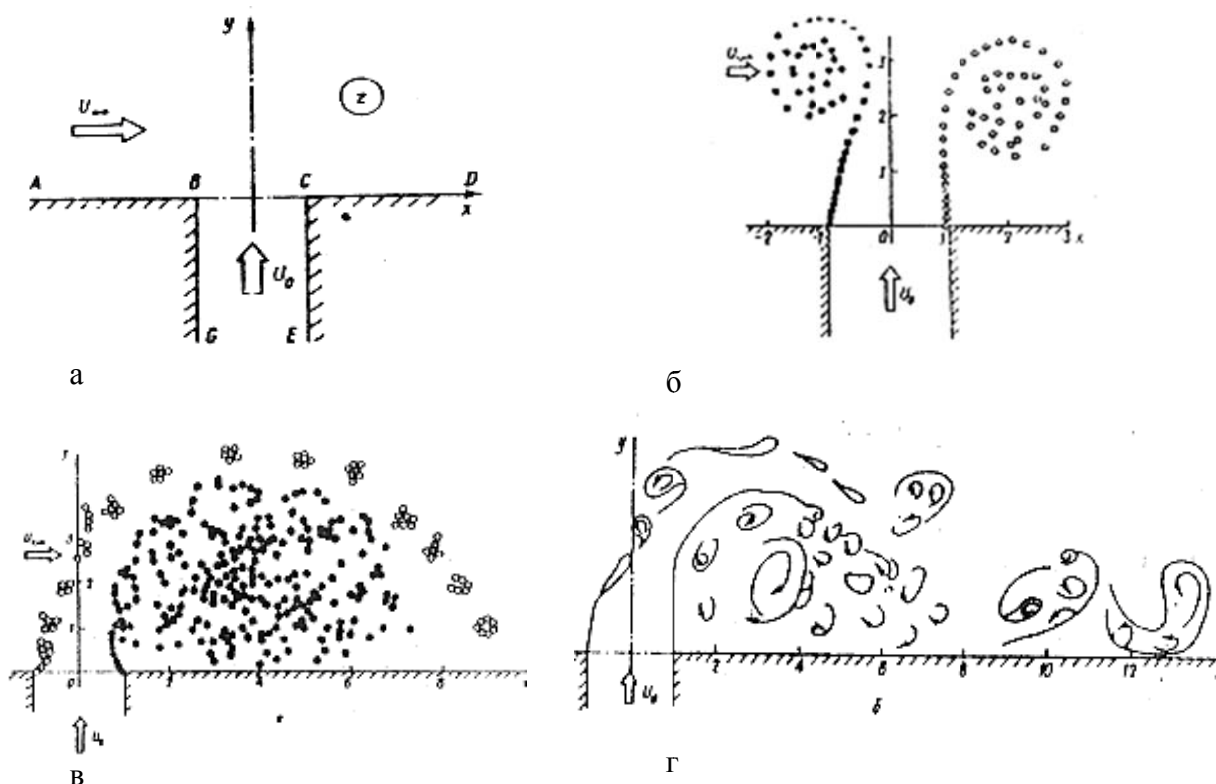


Рис. 5. Формирование вихревой структуры при воздействии воздушного потока:

а – истечение струи в сносящий поток; б – образование начальных вихрей; в, г – развитие картины течения

В начальный момент времени вихревые пелены, сходящие с острых кромок, сворачиваются в два «стартовых» вихря (рис. 5, б). Далее вихревые пелены распадаются на отдельные структуры, интенсивность и частота образования которых существенно зависят от относительной скорости движения воздушного потока u_∞ . Отношение скорости потока u_∞ к скорости истечения u_0 определяется параметром $m = u_\infty / u_0$. При малых $m < 0,2$ количество вихревых структур по обе стороны струи примерно одинаково, что позволяет говорить об их парном взаимодействии. Характерной особенностью является переход некоторых вихревых сгустков с «внутренней» границы на «внешнюю» (рис. 5, в). С увеличением скорости сносящего потока $m > 0,3$ частота образования структур на «внутренней» (тыльной по отношению к набегающему потоку) границе струи возрастает и значительно превосходит соответствующую для внешней границы. При $u_\infty > 0,5$ период образования вихревых сгустков на «внутренней» границе струи сравним с временем дискретизации. Завихренность, сходящая в поток с кромки, накапливается в вихревой области за струей (рис. 5, в) и приводит к искривлению

струи. Регулярная структура вихревых сгустков более выражена для внешней струи (рис. 5, г) с увеличением скорости потока интенсивность и масштаб вихревых структур на «внешней» границе уменьшается.

Воздействие воздушного потока на сыпучий материал, размещенный на нижней поверхности материалопровода, рассматривается для случая, когда воздушная струя соударяется с плоской поверхностью сыпучего материала, расположенного на жестком экране с поперечным сечением круговой формы, т. е. на внутренней поверхности материалопровода.

Дополнительная воздушная среда воздействует на сыпучий материал под углом атаки $\alpha > 0^\circ$ (рис. 6). В данном случае угол атаки воздушной струи $\alpha = 45^\circ$.

В этом случае давление на поверхность экрана при натекании на него воздушной струи имеет области положительных и отрицательных давлений. Неравномерность распределения давлений затопленной струи способствует общей турбулизации потока. Рассматривая формирование вихрей стелющейся струи в направлении 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 направление движения вихрей в рассматриваемой области можно считать равновероятным. Это свойство, применительно к данному случаю, формулируется и в другой форме – в любой точке вихря данная скорость может быть направлена как в одну, так и в другую противоположную сторону.

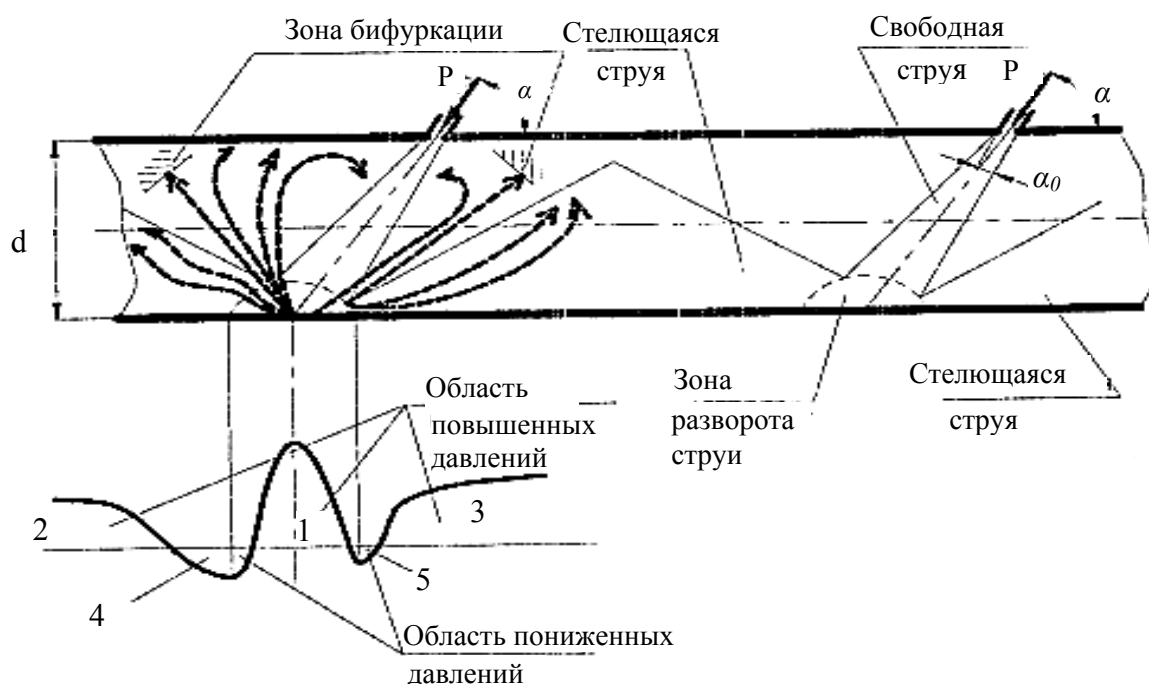


Рис. 6. Схема формирования вихревых структур с возникновением бифуркационных зон (угол атаки струи $\alpha = 45^\circ$)

Данное свойство может быть пояснено бифуркационной диаграммой (рис. 7) в виде графика зависимости скорости v в некоторой точке как функции константы K . При $K < K_c$ единственное возможное состояние есть состояние покоя ($v=0$). При 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 [8] переход при $K = K_c$ является бифуркацией между двумя стационарными состояниями: состоянием покоя и «конвективным» состоянием.

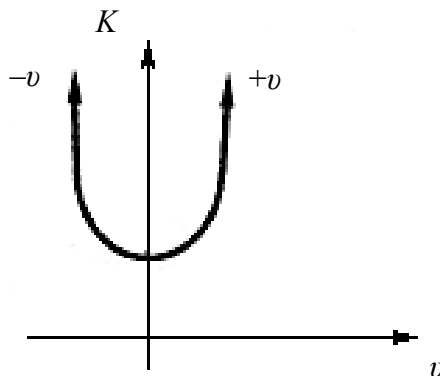


Рис. 7. Бифуркационная диаграмма структур в пневмо-транспортном трубопроводе

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 [7]:

$$X = Pr(Y - X), Y = -XZ + \mu X - Y, Z = -XY - bZ, \quad (14)$$

где Pr – число Прандтля;

μ – управляющий параметр;

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

$$X = \frac{\pi q}{\sqrt{2}(\pi^2 + q^2)} \psi_1; Y = \frac{\pi q^2}{\sqrt{2}(\pi^2 + q^2)} \theta_1; Z = \frac{\pi q^2}{(\pi^2 + q^2)^3} \theta_2. \quad (15)$$

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

$$X = Y = Z = 0; Y = X; Z = \frac{1}{2} X^2; X = \pm [b(\mu - 1)]^{0.5}. \quad (16)$$

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

$$X = \pm [b(\mu - 1)]^{0.5}, Z = \mu - 1. \quad (17)$$

В данном случае имеет место бифуркация типа вилки, при которой устойчивая неподвижная точка формирует две другие неустойчивые точки.

ВЫВОДЫ

Современный подход к совершенствованию пневмотранспортных установок для сыпучих материалов основывается на использовании структурированных режимов движения аэросмесей. При их описании представляется правомерным синергетический подход, позволяющий глубоко проанализировать течение аэросмесей в материалопроводе, оптимизировать режимы их движения и на этой основе разработать научные подходы создания новых высокоэффективных энергосберегающих способов пневматического транспортирования сыпучих материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуцин В. М. Анализ режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / В. М. Гуцин, О. В. Гуцин – Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 1 (18). – С. 78–83.
2. Гуцин В. М. Физические основы создания высокоэффективных пневмотранспортных установок для сыпучих материалов / В. М. Гуцин – Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 2 (23). – С. 38–42.
3. Гуцин В. М. Синергетический подход к процессам движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / В. М. Гуцин – Техніка будівництва : наук. техн. журнал. – 2001. – № 10. – С. 90–94.
4. Гуцин В. М. Совершенствование пневмотранспорта в горном деле / В. М. Гуцин – Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2004. – № 6. – С. 45–48.
5. Гуцин В. М. Нова концепція та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипких матеріалів / В. М. Гуцин – Машинознавство. – 2000. – № 2 (23). – С. 39–43.
6. Гуцин В. М. Синергетическая концепция в создании новых пневмотранспортных установок для литейного производства / В. М. Гуцин – III International Conference Modern Foundry Technologies – Instrumental Protection. – Krakow, 2000. – P. 69–74.
7. Хакен Г. Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам : пер. с англ. / Г. Хакен. – М. : Мир, 1991. – 204 с.
8. Климонтович Ю. Л. Турбулентное течение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – М. : Наука, 1990. – 320 с.
9. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль; пер. с франц. – М. : Мир, 1991. – 368 с.
10. Кравцов Ю. А. Случайность, детерминированность, предсказуемость / Ю. А. Кравцов – Успехи физических наук. – 1989. – В. 1. – Т. 158. – С. 93–122.
11. Сугаков В. Й. Основы синергетики : монографія / В. Й. Сугаков. – К. : Обереги, 2001. – 287 с.
12. Кабалдин Ю. Г. Исследование кристаллизации металлов на основе подходов теории синергетики / Ю. Г. Кабалдин, С. Н. Муравьев – Литейное производство. – М., 2008. – № 5. – С. 2–6.
13. Макаренко К. В. Синергетический подход в разработке процесса измельчения графитных включений в высокопрочном чугуна / К. В. Макаренко – Литейное производство. – М., 2008. – № 6. – С. 7–8.