



УДК 621.867.82

В.М. Гущин, канд. техн. наук

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОЦЕССАМ ДВИЖЕНИЯ АЭРОСМЕСЕЙ В ПНЕВМОТРАНСПОРТНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Движение сыпучих материалов в пневмотранспортном трубопроводе под воздействием несущего воздушного потока можно рассматривать как открытую систему с присущей ей неравномерностью. Последняя связана с поступлением энергии и сопротивлением движению аэросмесей в трубопроводе, большим числом подсистем динамических переменных, вязкостью несущей среды, макроскопическим взаимодействием несомых частиц с несущим потоком и между собой. Особенностью данной системы является явление перемеживаемости, т.е. последовательной сменяемости регулярных на конечных временных состояниях движения, выражающейся в постоянных процессах формирования волн и порций, переходов ламинарного течения в турбулентное и наоборот. В пневмотранспортном трубопроводе, при определенных условиях, постоянно наблюдается возникновение упорядоченных структур и форм движения из первоначально неупорядоченных и нерегулярных.

Исследование режимов движения гомогенных и гетерогенных потоков [1] показали, что в пневмотранспортном трубопроводе наблюдаются переходы от ламинарного в устойчивое турбулентное течение через ряд неустойчивых промежуточных состояний. В пределах одного трубопровода могут существовать два или более режимов движения с их взаимными последовательными переходами. При волновом и порционном режимах движения аэросмесей, помимо общего поступательного перемещения сыпучего материала вдоль трубопровода, имеет место внутриволновая и внутриволновая 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. Приняв за основу постулаты синергетики [2,3], можно предположить, что постоянно происходящие неравновесные фазовые переходы в пневмотранспортном трубопроводе осуществляются по схеме $P \leftrightarrow X$, т.е. по схеме самоорганизации.

По аналогии со схемой опыта Релея-Бенара рассматривается взаимодействие воздушных струй с воздушным слоем, расположенным в длинном горизонтальном сосуде 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 [4] схема взаимодействия струй, соударяющихся с поверхностью экрана (нижняя пластина), при верхнем подводе воздушных струй представлена на рис.1. 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).

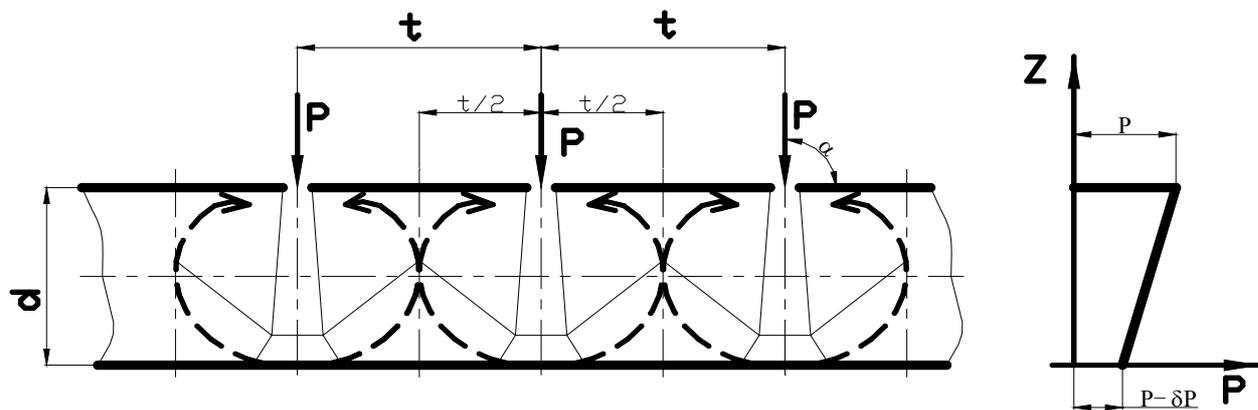


Рис. 1. Схема формирования отраженных воздушных вихревых струй (угол атаки струи $\alpha = 90^\circ$)

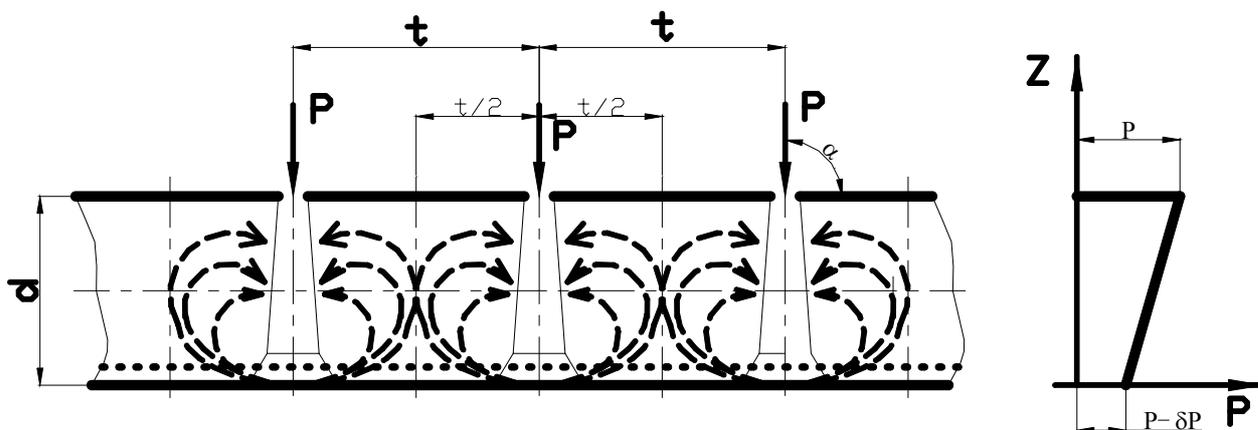


Рис. 2. Схема формирования вихревых структур аэросмесей (угол атаки струи $\alpha = 90^\circ$)

Схема организации движения одиночных частиц в рассматриваемом случае по характеру практически совпадает со схемой организации движения жидкости в «конвекционных валах» [5], 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. 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 $h \leq 12$ ($h = d/r_o$, r_o - радиус сопла) описывается зависимостью [6]:

$$\frac{G}{G_o} = 0,55 + 0,45 \frac{r}{r_o},$$

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 высоте 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 ($r = \text{const} > r_*$) 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 разряжения $\langle \Delta P \rangle$ на нижней поверхности при $3 \leq h \leq 12$ определяется $\langle \Delta P \rangle = - \frac{0,19}{h^2} \left(1 - \frac{r}{r_0} \right)^2$.

Потеря подъемной силы струи (или соответствующее разряжение 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 ρ_0 и ρ – 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 [7]. Дополнительная воздушная струя воздействует на сыпучий материал под углом атаки $\alpha > 0$ (рис.3).

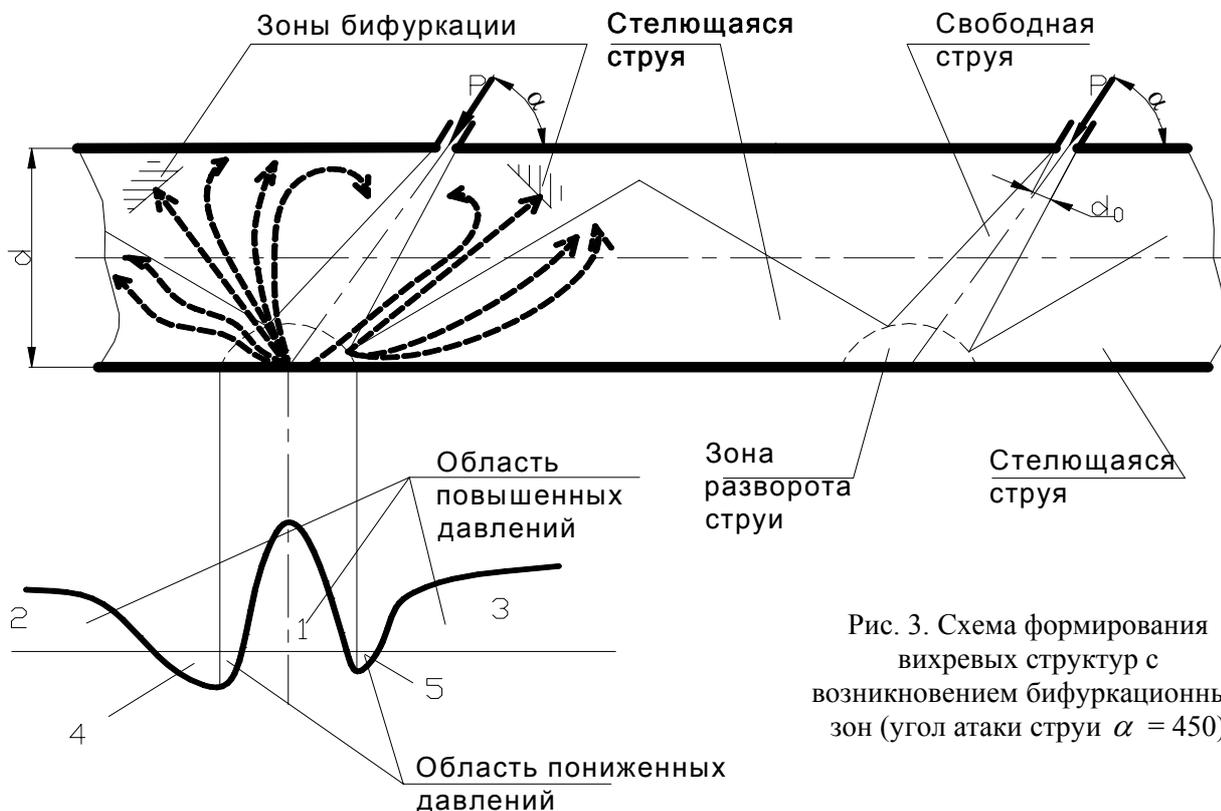


Рис. 3. Схема формирования вихревых структур с возникновением бифуркационных зон (угол атаки струи $\alpha = 45^\circ$)

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, формулируется и в другой форме – в любой точке вихря данной скорости 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 от параметра K . Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. 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.

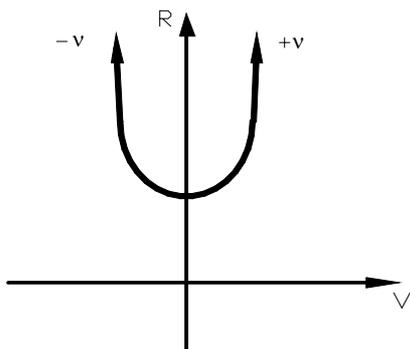


Рис. 4. Бифуркационная диаграмма вихревых структур в пневмотранспортном трубопроводе

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 [5]

$$\dot{X} = Pr(Y-X), \dot{Y} = -XZ + \mu X - Y, \dot{Z} = XY - bZ,$$

где Pr – число Прандтля; μ – управляющий параметр; $b = \frac{4\pi}{\pi^2 + q^2}$; $\mu = \frac{q^2}{(\pi^2 + q^2)^3} Re$;

$$X = \frac{\pi q}{\sqrt{2}(\pi^2 + q^2)} \Psi_1; Y = \frac{\pi q^2}{\sqrt{2}(\pi^2 + q^2)} \theta_1; Z = \frac{\pi q^2}{(\pi^2 + q^2)^3} \theta_2.$$

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 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 μ 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. Применительно к рассматриваемому случаю показатель Ляпунова определяется [2]:

$$\lambda_{[Ф]} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{2t} \ln [\text{Tr}(L^+(t) L(t))].$$

Движение смесей при волновом и порционном режимах сопровождается постоянными процессами перемеживаемости. Когда значение управляющего параметра μ меньше некоторого критического $\mu_{кр}$, рассматриваемая система имеет предельный цикл. Система совершает регулярные колебания и устойчива относительно малых возмущений. При незначительных больших значениях $\mu > \mu_{кр}$ система переходит в перемеживающийся динамический режим. Колебания периодически прерываются «аномальными» флуктуациями, амплитуда и направления остаются примерно одними и теми же от флуктуации к флуктуации и слабо зависят от μ . Надо полагать, что в основе наблюдающегося процесса перемеживаемости лежит пространственная структура явлений, большие флуктуации локализованы в пространстве и во времени.

Объяснение явлений, имеющих место в пневмотранспортном трубопроводе при перемещении аэросмесей в нестационарных режимах массопереноса при нетрадиционном исполнении материалопроводов позволяет наметить и осуществить ряд новых технических решений [8].

Список литературы

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