

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ С ВРАЩАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ АЭРОСМЕСЕЙ

Гущин В.М. доц., канд.техн.наук,

Донбасская государственная машиностроительная академия

В статье рассматривается течение газо-материальных потоков в пневмотранспортном трубопроводе с вихревым режимом движения аэросмесей.

The main results of pneumatic conveying with vortex regimes of movements of the aeromixtures are shown.

Пневмотранспортные установки с вращательным движением аэросмесей, предназначенные для перемещения хорошо-сыпучих материалов, являются совершенно неизученными. Различают установки с вихревым и вращательным порционным движением аэросмесей[1]. Вращательный режим движения газоматериальной смеси формируется воздействием дополнительного воздушного потока. Дополнительная воздушная подпитка осуществляется через сопла-побудители, установленные с определенным шагом по всей длине транспортного трубопровода. Побудители размещены вдоль трубопровода по винтовой линии (рис.1а). Воздух в материалопровод вводится по касательной к поперечному сечению трубы. Вторая конструктивная разновидность предусматривает размещение сопел-побудителей в одном поперечном сечении трубопровода, но под углом 120° по отношению друг к другу (рис.1б). В обоих случаях угол атаки сопел-побудителей находится в пределах $30^{\circ} \dots 45^{\circ}$.

Определенный прикладной интерес представляет изучение процессов формирования и развития движущихся структур аэросмесей в трубопроводе. Как показали экспериментальные исследования макроструктуры существенно видоизменяются при их перемещении вдоль трубопровода.

Рассматривается движение аэросмеси на прямолинейном участке пневмотранспортного трубопровода в спиральном турбулентном потоке. Угол наклона трубопровода к горизонта составляет $0 \leq \beta \leq 90^{\circ}$. Массовая концентрация аэросмеси принимается такой, чтобы в первом приближении соударениями в ней отдельных частиц можно было

пренебречь. Размеры частиц намного меньше диаметра транспортно-го трубопровода.

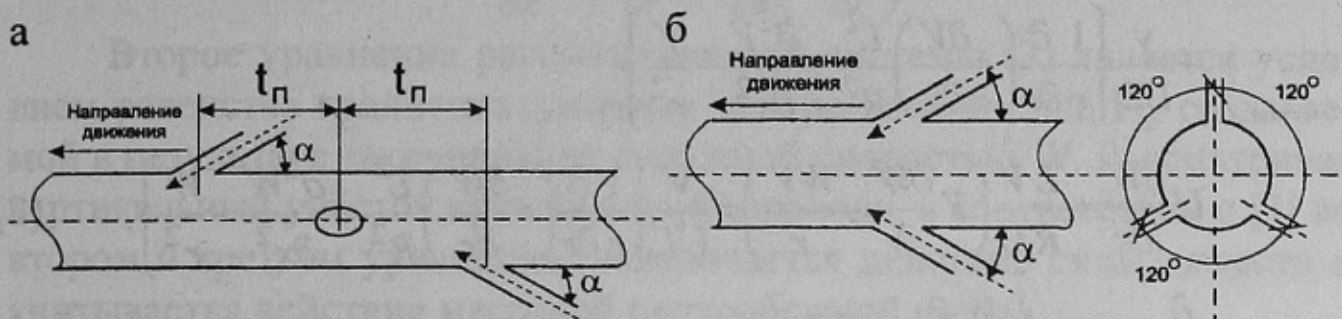


Рисунок 1 – Схема размещения сопел-побудителей: а – по винтовой образующей; б – в одном поперечном сечении

В асимметричных кардиналах x, r, θ , обозначив составляющие скорости U, V, W , уравнения Навье-Стокса могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}
 U \frac{dU}{dx} + V \frac{dU}{dy} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \nu \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU}{dr} \right) + \frac{d^2 U}{dx^2} \right\}, \\
 U \frac{dV}{dx} + V \frac{dV}{dr} - \frac{W^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} + \nu \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) + \frac{d^2 V}{dx^2} \right\}, \\
 U \frac{dW}{dx} + V \frac{dW}{dy} - \frac{VW}{r} &= \nu \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dW}{dr} \right) + \frac{d^2 W}{dx^2} - \frac{W}{r^2} \right\}, \\
 \frac{d}{dx} (rU) + \frac{d}{dr} (rV) &= 0, \\
 U \frac{dC}{dx} + V \frac{dC}{dr} &= D \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dC}{dr} \right) + \frac{d^2 C}{dx^2} \right\},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где ρ - плотность потока, C - концентрация твердой компоненты, D - коэффициент диффузии.

Система уравнений (1) в безразмерных переменных (знак безразмерной переменной опускается) записывается:

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{L}{R} \frac{V}{R} U \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\nu}{UL} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) \frac{L}{R^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right\},$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{LV}{RU} \left(V \frac{\partial W}{\partial r} - \frac{W^2}{r} \right) = -\frac{1}{RV} \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} +$$

$$+ \frac{\nu}{UL} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial x} \right) \frac{L^2}{R^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{V}{r^2} \right\},$$

$$U \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{LV}{RU} \left(V \frac{\partial W}{\partial r} - \frac{WV}{r} \right) = \frac{\nu}{UL} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) \frac{L^2}{R^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{W}{r^2} \right\}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (rU) + \frac{LV}{RU} \frac{\partial}{\partial r} (rV) = 0,$$

$$U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{LV}{RU} V \frac{\partial C}{\partial r} = \frac{a}{UL} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial x} \right) \frac{L^2}{R^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right\},$$

Здесь безразмерные переменные [2]:

$$\tilde{X} = \frac{x}{L}, \quad \tilde{r} = \frac{r}{R}, \quad \tilde{U} = \frac{u}{U}, \quad \tilde{v} = \frac{v}{V}, \quad \tilde{w} = \frac{W}{U}, \quad \tilde{P} = \frac{P - P_0}{\rho \frac{U^2}{2}}, \quad \tilde{C} = \frac{C}{C_0},$$

где L, R – продольный и поперечный масштабы, U, V – продольная и поперечная скорости, P_0 – масштаб давлений, масштаб концентраций, ν – кинематическая вязкость.

В предположении, что числа Рейнольдса $Re = \frac{UL}{\nu}$ и числа Пекле для рассматриваемой задачи будут достаточно большими, $\frac{L}{R} \frac{U}{V}, \frac{L^2}{R^2} \approx Re$, множители $\frac{L}{R} \frac{V}{U}$ и $\frac{1}{Re} \frac{L^2}{R^2}$ обращаются в единицу и система уравнений принимает вид:

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \frac{1}{r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right),$$

$$\frac{W^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r},$$

$$U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{VW}{r} = \nu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) - \frac{W}{r^2} \right\},$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(rU) + \frac{1}{\partial r}(rV) = 0, \tag{3}$$

$$U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial r} = a \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right).$$

Второе уравнение рассматриваемой системы (3) является условием равенства градиента давления центробежной силе $F_{ц}$, создаваемой в результате закручивания окружной скоростью W . Рассматривая вертикальный участок круглого трубопровода, в соответствии с [3] во втором и третьем уравнениях исключается действие силы тяжести и учитывается действие массовой центробежной силы.

Вращательное движение газо-материальной смеси в транспортном трубопроводе формируется воздействием дополнительного воздушного потока, истекающего со скоростью W_c из сопел-побудителей (рис. 2). В этом случае за единицу времени в материалопровод дополнительно поступает энергия, равная:

$$E = \frac{mW_c^2}{2} = \frac{\rho_B S_C W_c^2}{2}, \tag{4}$$

где ρ_B - плотность воздушного потока; S_C - суммарная площадь поперечного сечения сопел.

Кинетическая энергия вращательного движения равна:

$$E = \frac{\omega^2 J}{2},$$

где ω - угловая скорость вращения, J - момент инерции воздушного столба относительно оси вращения.

Если принять шаг расстановки побудителей t_n , радиус воздушного столба R_T , длиной t_n , учитывая $J = \left(\frac{\rho\pi}{2}\right) R_T^4 t_n$, угловая скорость вращения равна:

$$\omega = \sqrt{\frac{2S_C W_c^3}{\pi R_T^4 t_n}}, \tag{6}$$

Линейная скорость вращающегося потока равна $W_{BP}(R) = \omega \cdot R$, что с учетом (6) дает:

$$W_{BP}(R) = R \sqrt{\frac{2S_C W_c^3}{\pi R_T^4 t_n}}$$

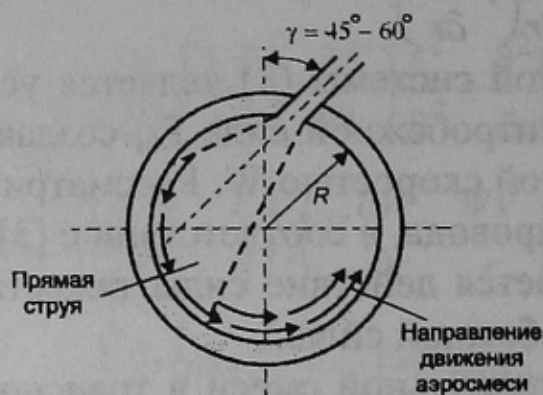


Рисунок 2 – Схема воздействия
воздушного потока

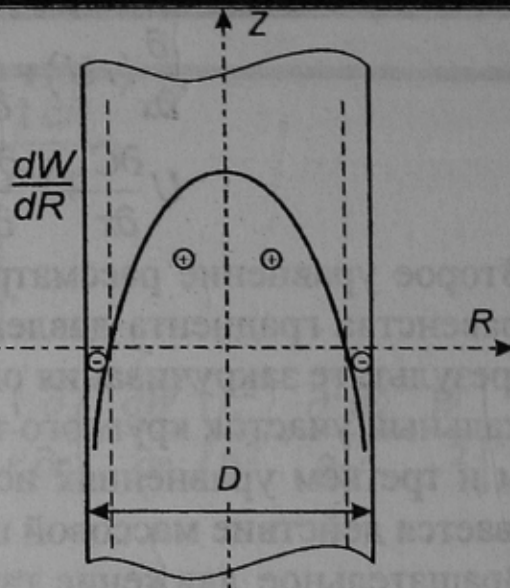


Рисунок 3 – Эпюра градиента скорости по поперечному сечению

Анализ показывает, что в потоках газоматериальной смеси с высокой степенью закрутки градиент скорости по поперечному сечению (рис. 3) характеризуется наличием трех областей: срединная зона, имеющая максимум по оси трубопровода, область с градиентом, близким к нулю, и последнее – область с отрицательным градиентом скорости. В рассматриваемом спиральном вихревом режиме движения газо-материального потока вдоль оси трубопровода со скоростями порядка $10..15 \text{ мс}^{-1}$ сыпучий материал по поперечному сечению трубопровода распределяются неравномерно. В срединной части поперечного сечения трубы концентрация смеси невысока с преобладанием легких и мелких фракций, в пристенной зоне ожидается практически отсутствие контакта частиц с внутренней поверхностью, а сыпучий материал размещается в виде кольцевого слоя в области с минимальными значениями градиента скорости.

Список источников.

1. Гуцин В.М. Новые пневмотранспортные установки для перемещения сыпучих материалов// 36.наук.праць "Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини" - К.: Вип.55, 2000. – С.70-73.
2. Механика жидкости и газа: Учебник для вузов/ Аверин С.И., Минаев А.Н., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. – М.: Металлургия, 1987. – 304 с.
3. Васильев О.Ф. Основы механики винтовых и циркулярных потоков. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 143 с.
4. Гуцин В.М., Топтунов Л.М. Рух аеросуміші у спіральному повітряному потоці пневмотранспортного трубопроводу. Вісник ВПІ, 2001, № 3. – С.90-94.
5. Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости. – М.: Энергия. – 480 с.