

**Чальцев М. Н. к.т.н., проф., Войцеховский С. В.**

*Автомобильно-дорожный институт Донецкого национального технического университета*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА**

*Разработана математическая модель течения закрученного двухфазного потока газ – твердые частицы в круглой трубе. Модель может быть использована для расчета параметров пневматического транспортирования сыпучих материалов.*

*Analytic – experimental model of tow phase circulation gas – solids flow in circular pipe is derived. The model can be used for calculation of parameters of solids pneumatic conveying.*

В последнее время у исследователей в области пневмотранспорта особый интерес вызывает применение закрутки при транспортировке потока. Из-за вращения здесь возникает аэродинамический эффект, который создает повышенное давление воздуха у стенок трубопровода. Применительно к пневмотранспорту мелкодисперсных сыпучих материалов благодаря этому снижается износ транспортного трубопровода. В данной работе ставилась задача теоретически определить количественные и качественные показатели вышеуказанного аэродинамического эффекта, а так же установить каким образом закрутка влияет на параметры транспортирования. Для этого была разработана математическая модель движения закрученного двухфазного потока на выходе из питателя в транспортный трубопровод. В качестве питателя, который бы обеспечивал вращательно-поступательное движение транспортируемой аэросмеси, можно использовать различные закручивающие устройства. Наиболее простым и надежным является вихревой эжектор, изображенный на рисунке 1. Он представляет собой тангенциальный завихритель, в котором закрутка воздуха осуществляется посредством тангенциального сопла, а подвод сыпучего материала из бункера производится через осевой подвод.

Для решения поставленной задачи была предложена аналитико-экспериментальная модель течения закрученного потока в круглой трубе, основанная на аппроксимации профилей вращательной и осевой компонент скорости. Для облегчения моделирования весь поток разбивается на три зоны:

1. Зона пристенного течения ( $R - \delta < r \leq R$ );
2. Зона основного течения ( $r_{om} < r \leq R - \delta$ ), в которой осевая компонента скорости имеет максимальное значение;
3. Зона обратного приосевого течения ( $r \leq r_{om}$ ).

Здесь:  $R$  – внутренний радиус трубы,  $r_{om}$  – радиус, на котором осевая скорость равна нулю,  $r$  – текущий радиус,  $\delta$  – толщина пограничного слоя [1]

$$\delta = 0,37 \left( \frac{w_{\infty} x}{\nu} \right)^{-1/5}.$$

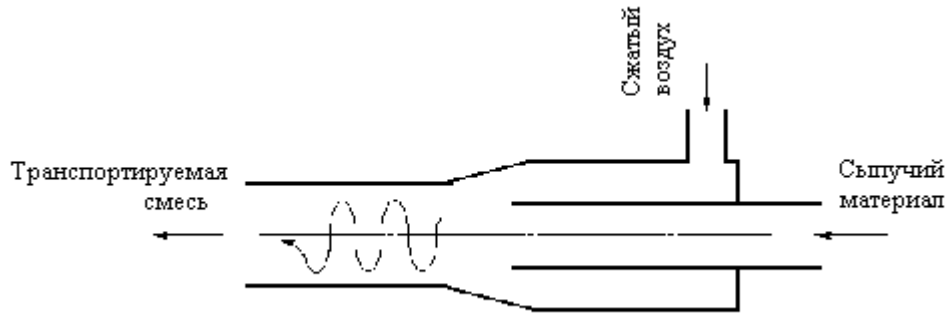


Рисунок 1 – Схема вихревого эжектора

Как показал анализ работ различных авторов ([2], [3]), кинематическое подобие внутреннего закрученного потока в трубе определяется безразмерным параметром  $\Phi_*$ , который характеризует отношение момента количества движения  $M$  к осевому количеству движения  $K_1$  в произвольном сечении в масштабе линейного размера трубопровода  $L$ :

$$\Phi_* = M / K_1 L.$$

Начальное значение параметра  $\Phi_*$  определяется как отношение момента количества движения воздуха, поступающего в тангенциальное сопло, к количеству движения сыпучего материала в осевом подводе, рассчитанное в том же сечении. Для каждого сечения трубопровода можно определить радиус зоны обратных течений по рассчитанному  $\Phi_*$

$$\frac{r_{om}}{R} = 0,3(\Phi_* - 0,24)^{0,72}.$$

Зона основного течения, ( $r_{om} < r \leq R - \delta$ ):

1. Профиль вращательной скорости определяется по формуле Шлихтинга

$$\frac{u}{u_*} = \left( \frac{2\eta}{1 + \eta^2} \right)^k, \text{ где параметр } \eta = \frac{r}{r_{\varphi m}},$$

$r_{\varphi m}$  – радиус максимальной вращательной скорости, определяется из соотношения

$$\frac{r_{\varphi m}}{R} = 0,51\hat{O}_*^{0,4}; \text{ максимальное значение вращательной скорости } \frac{u_*}{W_{cp}} = 2,04\Phi_*^{1,09}.$$

2. Профиль осевой скорости определяется по формуле

$$w = \frac{u}{\Phi_*} \frac{r}{R}.$$

Зона пристенного течения, ( $R - \delta < r \leq R$ ):

1. Профиль осевой скорости определяется по формуле

$$\frac{w}{w_*} = \left( \frac{R - r}{r} \right)^n,$$

где показатель степени определяется как

$$\frac{n}{n_0} = [1 + 0,78(\Phi_* - 0,07)]^{0,7}.$$

2. Профиль вращательной скорости определяется из соотношения

$$u = w \frac{\Phi_*}{r} R.$$

Зона обратного течения, ( $r \leq r_{om}$ ):

1. Профиль осевой скорости определяется как

$$\frac{w}{w_0} = 1 - \frac{r^2}{r_{om}^2}.$$

2. Профиль вращательной скорости определяется аналогично предыдущему пункту.

Профиль радиальной скорости во всех трех зонах определяется из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0.$$

Добавим дифференциальные уравнения движения для твердой частицы в закрученном потоке воздуха

$$\frac{dV}{dt} - \frac{U^2}{r} = F(v-V) - \frac{1}{\rho_q} \frac{\partial p}{\partial r} - g \cos \varphi;$$

$$\frac{dU}{dt} + \frac{UV}{r} = F(u-U) + g \sin \varphi;$$

$$\frac{dW}{dt} = F(w-W) - \frac{1}{\rho_q} \frac{\partial p}{\partial x},$$

где  $U$ ,  $V$ ,  $W$  – окружная, радиальная и осевая составляющие скорости частицы;  
 $F$  – реактивная сила, действующая со стороны потока воздуха на частицу;  
 $\rho_q$  – плотность частицы.

$$F = \frac{3}{4} k_\phi C \frac{\rho}{\rho_q} \frac{1}{a} |\vec{u} - \vec{U}|,$$

где коэффициент аэродинамического сопротивления равен

$$C = \frac{24}{Re} + \frac{4,4}{\sqrt{Re}} + 0,32$$

$a$  – диаметр частицы;

$Re$  – эффективное число Рейнольдса.

Коэффициент, учитывающий отклонение формы частицы от сферической

$$k_\phi = \left( 0,843 \lg \frac{1}{0,065 f} \right)^{-1}, \text{ при } Re < 0,05;$$

$$k_\phi = 12,4 - 11,4 f^{-1}, \text{ при } 2 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5.$$

Перепад давления по радиусу и по перемещению определим, выразив в частных производных из уравнения Навье – Стокса

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho \left( v \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{u^2}{r} \right);$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \left( v \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial x} \right).$$

Модель численно решалась на ЭВМ методом Рунге – Кутта. Были получены расчетные зависимости изменения скорости и давлений двухфазного закрученного потока по длине трубопровода. В качестве иллюстрации ниже приведены расчетные траектории движения твердых частиц на разгонном участке трубопровода в зависимости от безразмерного времени для различных диаметров частиц (рисунок 2). Здесь цифра 1 относится к диаметру частиц 40 мкм, 2–30 мкм.

Как можно заметить из приведенной диаграммы более крупные, а следовательно более массивные частицы, обладая относительно большей инерцией, имеют более пологую траекторию, чем более мелкие частицы. Но обладая большей инерционностью, тем самым они дольше разгоняются, и поэтому более длительное время испытывают воздействие от закрутки, которое стремится концентрировать частицы у оси трубопровода. В общем же наблюдается тенденция смещения твердой фазы вращающегося потока к его оси в начале трубопровода в момент его разгона. В дальнейшем, по мере затухания закрутки, частицы начинают выпадать на стенки (рисунок 3).

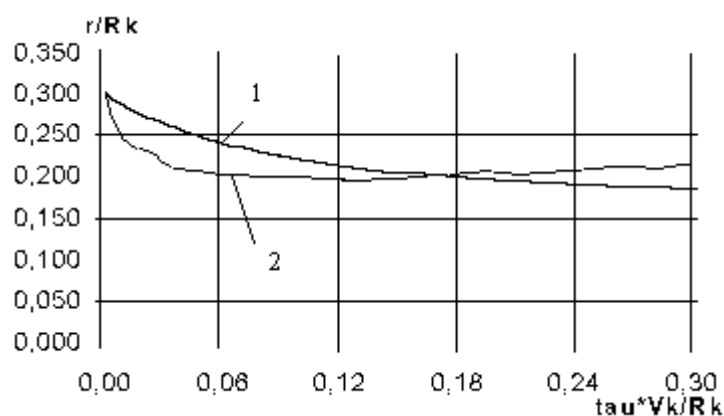


Рисунок 2 – Траектории частиц

Таким образом подтверждается предположение о возникновении «защитного слоя» воздуха у стенки трубопровода, который предохраняет его от повышенного износа.

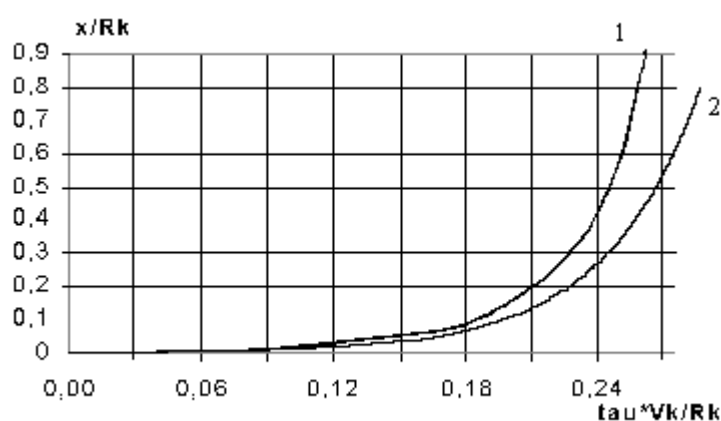


Рисунок 3 – Координата выпадения частиц на стенку трубопровода

Приведенная математическая модель описывает движение твердых частиц в закрученном потоке воздуха в круглой трубе и может быть использована для расчета параметров пневматического транспортирования сыпучих материалов закрученным потоком сжатого воздуха. При этом предельная объемная концентрация твердой фазы не должна превышать 2 %. К примеру для золы, снимаемой с электрофильтров угольных ТЭС, это составляет 40 кг сыпучего материала на 1 кг воздуха.

### *Список источников*

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1984. – 712 с.
2. Халатов А. А. Теория и практика закрученных потоков / А. А. Халатов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
3. Шукин В. К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В. К. Шукин, А. А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкостей и газов / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.