УДК 677.31.08.021.16/022

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПРИМЕСЬЮ СОРНЫХ ЧАСТИЦ

С.Ю. КАПУСТИН, В.Д. ФРОЛОВ, А.П. БАШКОВ

(Ивановская государственная текстильная академия)

При пневмотранспортировании волокна и удалении сорных примесей аспирационными системами в воздухопроводах наблюдается двухфазное турбулентное движение (рис. 1) с дисперсной примесью сорных частиц. Допускаем также наличие поперечного градиента скорости.

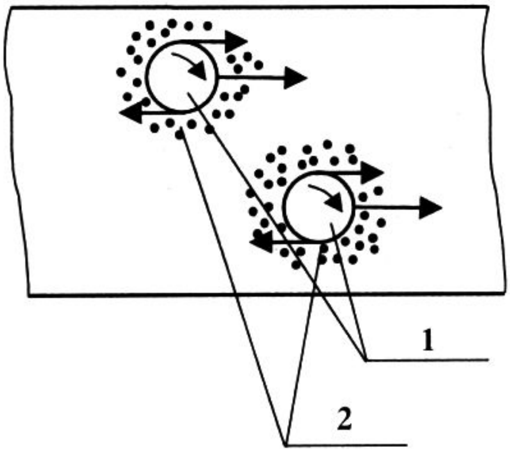

Рис. 1

В первом приближении средние значения скоростей воздуха и сорных частиц считаем одинаковыми, а пульсационные скорости υ'_g воздуха и υ'_p частиц – разными. Относительный вес примеси: $\gamma = G_p / G_g$ (где G_p – вес примеси; G_g – вес воздуха в элементарном объеме смеси).

Линейный размер d_p каждой сорной частицы принимаем меньшим среднего линейного размера турбулентного вихря воздуха. Сорную частицу считаем дискретной от момента ее образования до момента слияния с соседним слоем газового потока.

В двухфазном течении при обтекании вихрем сорных частиц их пульсационная скорость изменяется под действием аэродинамической силы. Условие сохранения суммарного движения воздуха и сорных частиц, составляющих вихрь, имеет вид:

$$\upsilon'_{g0} - \upsilon'_g = \gamma(\upsilon'_p - \upsilon'_{p0}) , \qquad (1)$$

где υ'_g и υ'_p – значения пульсационных скоростей воздуха и сорных частиц; υ'_{g0} и υ'_{p0} – значения этих скоростей в момент образования вихря.

Принимаем допущение, что среднестатистическое значение начальной скорости сорных частиц равно нулю ($\upsilon'_{p0} = 0$). Это допущение упрощает нахождение конечных значений пульсационных скоростей υ'_{gk} газа и сорных частиц υ'_{pk} из (1):

$$\upsilon'_{g0} - \upsilon'_{gk} = \gamma \upsilon'_{pk} . \qquad (2)$$

Заменим в (2) пульсационную скорость сорных частиц относительной скоростью движения вихря и частиц $\upsilon_{\sim} = \upsilon'_g - \upsilon'_p$. Для конечного движения вихря: $\upsilon_{\sim k} = \upsilon'_{gk} - \upsilon'_{pk}$.

Определим из (2) конечную пульсационную скорость воздуха как функцию относительной скорости:

$$\frac{\upsilon'_{gk}}{\upsilon'_{g0}} = \frac{1+\gamma\dfrac{\upsilon_{\sim k}}{\upsilon'_{g0}}}{1+\gamma}. \qquad (3)$$

Величина $\upsilon_{\sim k}$ находится из уравнения движения сорной частицы под действием аэродинамической силы:

$$m_p \frac{d\upsilon'_p}{dt} = c_x \varrho_g \frac{\upsilon_{\sim}^2}{2} F_p, \qquad (4)$$

где c_x – коэффициент лобового сопротивления частицы, величина которого зависит от формы частицы и числа $Re_p = \dfrac{\varrho_g \upsilon_{\sim} d_p}{\nu}$; F_p – площадь миделевого сечения частицы; $m_p = \varrho_p V_p$ – масса частицы, равная произведению ее плотности на объем.

Пульсационная скорость относительно мелких частиц ($d_p < 30$ мкм), как показывают расчеты, на протяжении пути смешения становится равной пульсационной скорости газа ($\upsilon'_{pk} \approx \upsilon'_{gk}$, то есть $\upsilon_{\sim k} \approx 0$). Тогда зависимость (3) упрощается:

$$\frac{\upsilon'_{gk}}{\upsilon'_{g0}} = \frac{1}{1+\gamma}. \qquad (5)$$

В дифференциальных уравнениях осредненного движения двухфазную жидкость можно считать сплошной средой. Ранее упоминалось, что осредненные скорости воздуха и сорных частиц приняты одинаковыми. Пульсационные же скорости компонентов двухфазной смеси, как следует из сказанного, существенно различаются.

Введем из [1] эквивалентную пульсационную скорость, характеризующую движение вихря смеси, которую можно определить из сравнения двух способов нахождения величины напряжения трения τ (для единой среды и для двухкомпонентной смеси):

$$\tau = \varrho {\upsilon'_{ek}}^2 = \varrho_g {\upsilon'_{gk}}^2 + \varrho_g \gamma {\upsilon'_{pk}}^2, \qquad (6)$$

где плотность смеси выражается через плотность газа и относительный вес сорных частиц:

$$\varrho = \varrho_g (1+\gamma). \qquad (7)$$

Откуда

$$\upsilon'_{ek} = \sqrt{\frac{{\upsilon'_{gk}}^2 + \gamma {\upsilon'_{pk}}^2}{1+\gamma}} \qquad (8)$$

или согласно (3):

$$\upsilon'_{ek} = \frac{\upsilon'_{g0}}{1+\gamma}\sqrt{1+\gamma\frac{\upsilon_{\sim k}^2}{{\upsilon'_{g0}}^2}}. \qquad (9)$$

Эквивалентная пульсационная скорость в начальный момент движения вихря (при $\upsilon'_{p0} \approx 0$) имеет вид: $\upsilon'_{e0} = \sqrt{\dfrac{{\upsilon'_{g0}}^2}{1+\gamma}}$. Одновременное решение динамической и диффузной задач дает возможность получить профили осредненной скорости смеси и концентрации сорных примесей, при этом необходимо знать соотношение коэффициентов турбулентного переноса импульса и вещества примеси, которое является аналогом числа Шмидта газовой смеси:

$$Sc = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{\ell_u}{\ell_p}\frac{\upsilon'_{ek}}{\upsilon'_{pk}}, \qquad (10)$$

где ε – коэффициент турбулентной кинематической вязкости; D – коэффициент турбулентной диффузии; ℓ_u – путь смешения для переноса импульса смеси; ℓ_p – путь смешения для диффузии примеси.

В воздушной смеси, пульсирующей как единая среда, $\upsilon'_{ek} = \upsilon'_{pk}$. Турбулентный путь смешения равен произведению среднего дискретного существования t турбулентного объема на среднее значение пульсационной скорости:

$$\ell = t\upsilon'_m . \qquad (11)$$

Для переноса импульса путь смешения равен

$$\ell_u = t_u \frac{\upsilon'_{ek} + \upsilon'_{e0}}{2} . \qquad (12)$$

Для переноса вещества при $\upsilon'_{p0} = 0$ путь смешения

$$\ell_p = t_p \frac{\upsilon'_{pk}}{2} , \qquad (13)$$

откуда согласно (10):

$$Sc = \frac{t_u}{t_p} = \frac{\upsilon'_{ek} + \upsilon'_{e0}}{\upsilon'_{pk}} \frac{\upsilon'_{ek}}{\upsilon'_{pk}} . \qquad (14)$$

В газе $\upsilon'_e = \upsilon'_g = \upsilon'_p$ и, как следует из (11), число Шмидта равно

$$Sc = \frac{\ell_u}{\ell_p} = \frac{t_u}{t_p} . \qquad (15)$$

Допустим, что отношение величин характерного времени для переноса импульса и вещества в двухфазной и однородных средах одинаково ($t_u/t_p \approx idem$).

Используя выражения (14) и (15), турбулентное число Шмидта для двухфазной среды получаем через число Шмидта газовой смеси:

$$Sc = Sc_g \frac{\sqrt{1+\gamma} + \sqrt{1 + \gamma \frac{\upsilon^2_{\sim k}}{\upsilon'^2_{g0}}}}{1 - \frac{\upsilon^2_{\sim k}}{\upsilon'^2_{g0}}} \qquad (16)$$

или для мелкой примеси ($\upsilon'_{\sim k} = 0$) имеем:

$$Sc = Sc_g \left(\sqrt{1+\gamma} + 1\right) . \qquad (17)$$

В соответствии с принятой схемой двухфазного турбулентного потока, в котором осредненные скорости фаз одинаковы, а пульсационные – различны, дифференциальные уравнения неразрывности (18) и движения (19) (в приближении пограничного слоя) при постоянном давлении следует записать для смеси как единой среды:

$$\frac{\partial \varrho u y^k}{\partial x} + \frac{\partial \varrho \upsilon_1 y^k}{\partial x} = 0 , \qquad (18)$$

$$\varrho u y^k \frac{\partial u}{\partial x} + \varrho \upsilon_1 y^k \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial (\varrho \varepsilon y^k \frac{\partial u}{\partial y})}{\partial y} , \qquad (19)$$

где $k = 0$ для плоского течения; $k = 1$ для осесимметричного.

Дифференциальное уравнение диффузии обычно записывают для концентрации c, вычисленной как отношение веса примеси к весу смеси:

$$c = \frac{1}{1+\gamma} ,$$

$$\varrho u y^k \frac{\partial c}{\partial x} + \varrho \upsilon_1 y^k \frac{\partial c}{\partial y} = - \frac{\partial (\varrho D y^k \frac{\partial c}{\partial y})}{\partial y} + q_x y^k , \qquad (20)$$

где q_x – выделяющаяся в единице объема масса примеси; $\upsilon_1 = \upsilon + \overline{\upsilon' c'}$ – приведенная поперечная скорость турбулентного потока, учитывающая корреляцию пульсаций скорости и концентрации в диффузном потоке вещества.

В уравнении (20) величину D согласно (10) заменяем отношением коэффициента кинематической турбулентной вязкости к турбулентному числу Шмидта $(D = \varepsilon/Sc)$.

Интегрируя (18)...(20) поперек потока, получаем интегральные условия сохранения импульса:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta_u} y^k \varrho u (u - u_\delta) dy = 0 , \qquad (21)$$

и концентрации сорных примесей:

$$\frac{d}{dx}\int_0^{\delta_{pu}} y^k \varrho u(c - c_\delta)dy = \int_0^{\delta_{pu}} y^k q_x dy, \quad (22)$$

где δ_u, δ_p – соответственно динамическая и диффузная величины размера потока.

ВЫВОДЫ

Предложенная методика дает возможность прогнозировать поведение турбулентного воздушного потока в воздуховодах при удалении и транспортировании сорных примесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамович Г.Н., Гиршович Т.Ч.* О диффузии тяжелых частиц в турбулентных потоках. – ДАН СССР, 1973, №3, т.212. С.573...576.

Рекомендована кафедрой механической технологии текстильных материалов. Поступила 10.11.04.