очередь, потребует переработки пользовательского интерфейса, т.е. создания новых интерфейсных форм и доработки некоторых старых.

Описанная выше БД предназначена не только для хранения данных, но, прежде всего, для использования в составе геоинформационных систем (например «ГеоМарк»), в качестве основного источника данных для построения трехмерной модели массива горных пород. Главное структурное отличие данной БД от предыдущих разработок [3] – наличие таблицы «Стволы», что позволяет разбить скважину на элементарные участки, а следовательно - и избежать неоправданного дублирования информации при ее хранении.

БД предназначена для использования на горнодобывающих предприятиях угольной промышленности, но с успехом может быть применена и на рудных месторождениях, а также геологоразведочными предприятиями и проектными институтами для решения широкого спектра горно-геометрических, горнотехнических и проектных задач. Примером таких задач могут служить задачи вентиляции, подземного шахтного транспорта, водоотлива, контроля состояния горных выработок, движения запасов полезного ископаемого, учета его добычи и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов А.В., Глухов А.А., Омельченко А.А. Разработка геоинформационной системы, ориентированной на задачи горнодобывающей отрасли // Геологія и геохімія горючих копалин. – Львов: 1998. – №4 (105). – С.79-87.

2. Анциферов А.В., Глухов А.А., Омельченко А.А., Селяков Б.И. Географическая информационная система “ГеоМарк” для решения задач угледобывающей отрасли // Проблемы и перспективы использования геоинформационных технологий в горном деле. – Днепропетровск: РИК НГА Украины, 2000. – С.25-28.

3. Анциферов А.В., Хламов Д.М. Зостосування геолого-маркшей-дерської бази даних для вирішення задач гірничого добувної галузі // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів: Львівська політехніка, №63. – 2003. – С.29-32.

УДК 622.817.47:533.6.011.001.57

Инж. Л.А. Новиков
(ИГТМ НАН Украины)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ГАЗОВЗВЕСИ В ДЕГАЗАЦИОННОМ ТРУБОПРОВОДЕ

На основі приведеної математичної моделі руху турбулентного потоку газозвісі в дегазаційному трубопроводі розглянуто основні параметри турбулентного потоку двофазного середовища.

MATHEMATICAL MODEL OF MOVE OF A TURBULENT FLOW OF A GAS MIXTURE IN THE VENT PIPE LINE

On the basis of reduced mathematical model of move of a turbulent flow of a gas mixture in the vent pipe line the arguments of a turbulent flow of twophase environment are reviewed.

Турбулентное движение является наиболее распространенной формой движения жидких и газообразных сред в технологических устройствах и в природе. На сегодняшний день достаточно универсальных и обоснованных методов расчета турбулентных течений не существует. Данное обстоятельство связано со сложностью рассматриваемого явления, ограниченностью возможностей преобладающего на сегодняшний день направления в теории турбулентности, а также отсутствием точных экспериментальных исследований [1].

При исследовании турбулентных течений газовзвеси и суспензии при различных технологических процессах помимо полуэмпирических теорий, как правило, используется аппарат современной статистической гидромеханики. Практические результаты по исследованию турбулентных течений многофазных сред получены с использованием модели Х.А. Рахматулина [2], которая основана на идее взаимопроникающих континуумов. В этой модели несущей фазой является газ, а дисперсной – твердые частицы. Основные допущения применительно к данной модели изложены в работах [3, 4]. Уравнения, описывающие каждую из фаз, имеют связь, выраженную через источниковые члены, учитывающие межфазный обмен энергией и импульсом.

Согласно работе [5] при скорости трения воздушного потока в канале 1÷2 м/с, диапазон диаметров переносимых частиц плотностью ρ_1 = 2650 кг/м3 будет составлять от d_i = 1÷10 мкм. При этом влияние силы тяжести на распределение объемных концентраций частиц в сечениях канала будет не существенным. Данное обстоятельство связано с тем, что среднеквадратические отклонения каждой из фаз в этом случае будут совпадать [5], т.е твердые частицы повторяют поведение мелких вихревых структур газовой среды, характеризующих микромасштаб турбулентности. В случае, если в потоке газовзвеси будут присутствовать твердые частицы с плотностью меньшей чем ρ_1, то приведенный выше диапазон диаметров частиц будет смещен в большую сторону. Приближенную оценку диаметра переносимых частиц в зависимости от их плотности при скорости воздушного потока 1÷2 м/с можно сделать по формуле:

$$d_j = d_i \frac{\rho_j}{\rho_1}, \qquad (1)$$

где dj – диаметры твердых частиц плотностью ρj ≤ 2650, кг/м3.

Согласно [5] при обычных числах Рейнольдса максимальный диаметр твердых частиц, который намного меньше микромасштаба турбулентности разделяющей среды (газ или жидкость) можно определить по формуле

$$\frac{d_{\max}}{D_h}\sqrt{\left|\frac{\rho_s}{\rho}-1\right|}\cdot\sqrt{\mathrm{Re}} \le 0,2, \qquad (2)$$

где ρ_S и ρ – соответственно плотность твердой частицы и разделяющей среды, кг/м^3.

При моделировании процессов пылепереноса и распределения объемных концентраций твердых частиц на участках газопроводной сети необходимо учитывать скорость, давление и направление движения потока метано-воздушной смеси (МВС), а также плотность материала переносимых частиц.

Рассмотрим процесс турбулентного движения потока газовзвеси, состоящей из метано-воздушной смеси и твердых частиц сферической формы на горизонтальном участке дегазационного трубопровода диаметром d (м) и длиной L_t (м). Будем рассматривать плоскую турбулентность, которая будет однородной и изотропной во всех направлениях. Согласно [6] система уравнений, описывающих движение двухфазной среды, в случае локально однородной и изотропной турбулентности имеет вид

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho_m}{\partial t} + div\left(\rho_m u_{mc}\right) = 0; \\ \dfrac{\partial u_{mc}}{\partial t} + \left(u_{mc}\nabla\right)u_{mc} = \dfrac{1}{\rho_m}F_{mc} - \dfrac{1}{\rho_m}gradP_m + \\ K_m \Delta u_{mc} + \dfrac{K_m}{3}grad\left(divu_{mc}\right); \\ \dfrac{\partial c_i}{\partial t} = div\left(D_i gradc_i - c_i u_{ic} - B_i c_i F_{ic}\right); \\ \dfrac{\partial \bar{u}_{ic}}{\partial t} + \left(u_{ic}\nabla\right)u_{ic} = \dfrac{1}{\rho_i}F_{ic} - \dfrac{1}{\rho_i}gradP_i + \\ K_i \Delta u_{ic} + \dfrac{K_i}{3}grad\left(divu_{ic}\right), \end{cases} \qquad (3)$$

где t – время, с; u_{ic} и u_{mc} - векторы средних скоростей соответственно частиц i – й компоненты твердой фазы и турбулентных вихрей газовой среды в данной точке, м/с; F_{ic} и F_{mc} - суммарные средние силы, действующие соответственно на частицы i – й компоненты твердой фазы и турбулентные вихри газовой среды, отнесенные к единице объема двухфазной среды, Н/м3; P_i и P_m - средние статические давления соответственно частиц i – й компоненты твердой фазы и турбулентных вихрей газовой среды в данной точке, Н/м2; ρ_i и ρ_m - средние плотности соответственно частиц i – й компоненты твердой фазы и турбулентных вихрей газовой среды, кг/м3; c_i – объемная концентрация частиц i – й компоненты твердой фазы, д.е; D_i – коэффициент турбулентной диффузии частиц i – й компоненты твердой фазы, м2/с; B_i – коэффициент подвижности частиц i – й компоненты твердой фазы, кг/с; K_i и K_m - коэффициенты макровязкости соответственно частиц i – й компоненты твердой фазы и турбулентных вихрей газовой среды, м2/с; ∇ - символический векторный оператор; Δ – оператор Лапласа.

В системе уравнений (3) первое уравнение представляет собой уравнение неразрывности, второе – уравнение Навье-Стокса для осредненного турбулентного движения газовой среды, третье - уравнение макродиффузии Фоккера-Планка, четвертое – уравнение Навье-Стокса для частиц i – й компоненты твердой фазы.

Обозначая для упрощения u_{ic} = V и u_{mc} = U, перепишем систему уравнений (3) в следующем виде

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial \rho_m}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial x_k}(\rho_m U_k) = 0; \\
\dfrac{\partial u_j}{\partial t} + \dfrac{\partial (U_j U_k)}{\partial x_k} = \dfrac{1}{\rho_m} F_{mc} - \dfrac{1}{\rho_m}\dfrac{\partial (P_m)}{\partial x_j} + K_m \dfrac{\partial^2 u_j}{\partial x_k{}^2} + \dfrac{K_m}{3}\dfrac{\partial^2 U_j}{\partial x_j \partial x_k}; \\
\dfrac{\partial c_i}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x_k}\left(D_i \dfrac{\partial (c_i)}{\partial x_j} - c_i v_k - B_i c_i F_{ic} \right); \\
\dfrac{\partial v_j}{\partial t} + \dfrac{\partial (V_j V_k)}{\partial x_k} = \dfrac{1}{\rho_i} F_{ic} - \dfrac{1}{\rho_i}\dfrac{\partial (P_i)}{\partial x_j} + K_i \dfrac{\partial^2 V_j}{\partial x_k{}^2} + \dfrac{K_i}{3}\dfrac{\partial^2 V_j}{\partial x_j \partial x_k}
\end{cases} \qquad (4)
$$

В системе уравнений (4) индексы j или k принимают значения x и y.

Граничные условия для величин, входящих в систему уравнений (4) будут иметь вид

$$
\begin{cases}
U_{y=0} = U_{y=d} = 0; \\
V_{y=0} = V_{y=d} = 0; \\
U'_{y=0} = U'_{y=d} = 0; \\
V'_{y=0} = V'_{y=d} = 0; \\
\left(P_m\right)_{y=0} = \left(P_m\right)_{y=d}; \\
\left(P_i\right)_{y=0} = \left(P_i\right)_{y=d}; \\
\left(B_i\right)_{y=0} = \left(B_i\right)_{y=d}; \\
\left(c_i\right)_{y=0} = \left(c_i\right)_{y=d},
\end{cases} \qquad (5)
$$

где величины $U'_{y=0} = U'_{y=d} = 0$ и $V'_{y=0} = V'_{y=d} = 0$ представляют собой пульсационные составляющие соответственно газовой среды и твердых частиц на внутренней поверхности трубопровода.

Обозначая индексами «*kr*» и «*m*» «крупномасштабную» и «мелкомасштабную» части начальных возмущений газообразной $\langle u_j^2 \rangle$ и твердой $\langle v_j^2 \rangle$ фазы в начальном сечении рассматриваемого участка газопроводной сети, запишем

$$
\begin{cases}
\langle u_j^2 \rangle = \langle u_j^2 \rangle_{kr} + \langle u_j^2 \rangle_m; \\
\langle v_j^2 \rangle = \langle v_j^2 \rangle_{kr} + \langle v_j^2 \rangle_m,
\end{cases} \qquad (6)
$$

Руководствуясь работой [1], где приведены выражения для величин среднеквадратичных скоростей начальных возмущений жидкой фазы, применительно к газовзвеси можно записать

$$\begin{cases} u_0^2 = \dfrac{1}{3}\left\{\sum\limits_{j=1}^{2}\left\langle u_j^2\right\rangle_{kr}\right\}_{t=0}; \\ v_0^2 = \dfrac{1}{3}\left\{\sum\limits_{j=1}^{2}\left\langle v_j^2\right\rangle_{kr}\right\}_{t=0}, \end{cases} \tag{7}$$

где u_0^2 и v_0^2 - среднеквадратичные скорости начальных возмущений соответственно газообразной и твердой фазы.

Тогда руководствуясь правилами построения начальных условий для различных видов турбулентности [1], для рассматриваемого случая плоского турбулентного течения газовзвеси запишем начальные условия для газообразной среды и твердых частиц

$$\begin{cases} k_j = 2\pi n\, l_j^{-1}; \\ \overline{k}_j = 3k_j; \\ \left\langle u_j^2\right\rangle_{kr} = 1,5u_0^2; \\ \left\langle v_j^2\right\rangle_{kr} = 1,5v_0^2; \\ \left\langle u_j^2\right\rangle_m = 0,01u_0^2; \\ \left\langle v_j^2\right\rangle_m = 0,01v_0^2; \\ \left\langle u_j u_k\right\rangle = 0 \quad при \quad j \neq k; \\ \left\langle v_j v_k\right\rangle = 0 \quad при \quad j \neq k; \\ L_j = I_j^3\lambda_j, \end{cases} \tag{8}$$

где k_j и $\overline{k}_j$ - числовые коэффициенты, значения которых выбираются таким образом, чтобы в размер рассчитываемой области турбулентного течения газовзвеси вдоль каждой из осей координат укладывалось целое число периодов; n – целое число, которое согласно [1] должно быть не меньше 4 или 5; L_j и I_j - соответственно макромасштаб и интенсивность турбулентности в направлении осей координат; λ_j – микромасштаб турбулентности в направлении осей координат; l_j – характерный размер рассматриваемой области турбулентного течения газовзвеси вдоль осей координат (l_x = d, l_y = Lt).

Знак $\langle\ \rangle$ означает осреднение данной величины по всей рассчитываемой области турбулентного течения газовзвеси.

Учитывая, что турбулентность является однородной и изотропной во всех направлениях, начальное распределение скоростей твердой ux и газообразной vx фазы согласно [1] можно представить в виде

$$\begin{cases} u_x = u_y = \sqrt{18}u_0 \cos\left(k_x \overline{x}\right)\cos\left(k_y \overline{y}\right) + \sqrt{0,08}u_0 \cos\left(\overline{k}_x \overline{x}\right)\cos\left(\overline{k}_y \overline{y}\right); \\ v_x = v_y = \sqrt{18}v_0 \cos\left(k_x \overline{x}\right)\cos\left(k_y \overline{y}\right) + \sqrt{0,08}v_0 \cos\left(\overline{k}_x \overline{x}\right)\cos\left(\overline{k}_y \overline{y}\right), \end{cases} \qquad (9)$$

В системе уравнений (9) члены с $\overline{k}_j$ характеризуют «мелкомасштабные возмущения» каждой из фаз.

Начальное распределение остальных величин можно записать в виде

$$\begin{cases} (P_m)_{x=0} = (P_m)_\eta; \\ (P_i)_{x=0} = (P_i)_\eta; \\ (D_i)_{x=0} = (D_i)_\eta; \\ (B_i)_{x=0} = (B_i)_\eta; \\ (F_i)_{x=0} = (F_i)_\eta; \\ (f_i)_{x=0} = (f_i)_\eta; \\ (c_i)_{x=0} = (c_i)_\eta \end{cases} \qquad (10)$$

Выводы:

1. Приведенная выше математическая модель движения турбулентного потока газовзвеси в дегазационном трубопроводе позволяет исследовать аэродинамические параметры турбулентного потока движущейся среды и объясняет закономерности образования пылевых скоплений на участках газопроводной сети.

2. Математическая модель может быть адаптирована для случая, когда вместо твердых частиц рассматриваются частицы влаги (туман).

3. При теоретическом исследовании аэрогазодинамических параметров турбулентного потока газовзвеси на основе уравнений движения двухфазной среды, в случае локально однородной и изотропной турбулентности можно использовать метод конечных разностей изложенный в работе [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Численное моделирование турбулентных течений / В.М. Иевлев – М.: Наука, 1990. – 216 с.

2. Рахматулин Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред // Прикл. мат. и механика. – 1956. – Вып. 20, № 3. – С. 184 – 195.

3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т.1, 2. – 464 с.

4. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1983. – 1. – 528 с.; 2. – 560 с.

5. А. Фортье. Механика суспензий., перев. с французского. М., «Мир», 1971. – 264 с.

6. Кривощеков В.И. Кинетический подход к выводу уравнений движения двухфазной среды в сепарационных аппаратах // Обогащение руд. - 2001. - №6. - С. 24.