

УДК 621.928.9

А.А. Буров, канд. техн. наук,  
 А.В. Силин, магистр,  
 С.В. Сурков, канд. техн. наук,  
 Одес. нац. политехн. ун-т

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В КАНАЛЕ С КВАДРАТНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

О.О. Буров, О.В. Сілін, С.В. Сурков. **Моделювання міграції частинок пилу в каналі з квадратним поперечним перерізом.** Метод, що базується на розрахунку траєкторій частинок пилу, дозволив моделювати перерозподіл концентрації пилу та осадження пилу на стінках у каналі із квадратним поперечним перерізом.

A.A. Burov, A.V. Silin, S.V. Surkov. **Modeling of dust particles migration in a duct with the square cross-section.** A method based on the calculation of trajectories of dust particles allowed to model the dust concentration redistribution and dust precipitation on the walls in a duct with the square cross-section.

Опыт эксплуатации систем газоочистки показывает, что оседание пыли на стенках газоходов имеет существенно неравномерный характер [1]. Однако до настоящего времени компьютерное моделирование и прогнозирование не позволяло адекватно описать движение частиц пыли в элементах пылеулавливающего оборудования. Причина состояла в том, что ранее использовавшиеся методики не учитывали вторичные течения во взвешенных потоках газа.

Предложены достаточно точные и простые модели вторичных течений [2]. На основании этих моделей разработана методика, позволяющая рассчитывать траектории отдельных частиц во взвешенном потоке [3].

Дальнейшим развитием рассматриваемой методики является моделирование движения потока, содержащего большое количество частиц, с учетом трехмерного характера движения.

Для случая трубы с квадратным поперечным сечением использован анализ известных формул, описывающих распределения продольной скорости газа [4]. Была выбрана сравнительно простая формула [5]

$$u_x = u_{cp} + \frac{u_\tau}{\kappa} \left\{ \frac{5}{3} + \sqrt{\bar{y}} + \sqrt{\bar{z}} + \ln[(1 - \sqrt{\bar{y}})(1 - \sqrt{\bar{z}})] \right\}, \quad (1)$$

где  $u_x$  — продольная проекция скорости в заданной точке поперечного сечения, м/с;

$u_{cp}$  — осредненная по сечению продольная скорость, м/с;

$u_\tau$  — динамическая скорость, м/с;

$\kappa = 0,38 \dots 0,40$  — постоянная Кармана;

$\bar{y} = y/R$  и  $\bar{z} = z/R$  — безразмерные координаты;

$R$  — половина стороны поперечного сечения трубы.

Для расчета скоростей вторичных течений использовались предложенные ранее математические модели вторичных течений [2]. В частности, для трубы с квадратным поперечным сечением скорости вторичного течения рассчитывались по формулам

$$u_y = \frac{U}{8} [ \sin(2\bar{y} - \bar{z}) + \sin(2\bar{y} + \bar{z}) - 2\sin(2\bar{z} + \bar{y}) + 2\sin(2\bar{z} - \bar{y}) ], \quad (2)$$

$$u_z = \frac{U}{8} [ 2\sin(2\bar{y} - \bar{z}) - 2\sin(2\bar{y} + \bar{z}) + \sin(2\bar{z} + \bar{y}) + \sin(2\bar{z} - \bar{y}) ], \quad (3)$$

где  $u_y$  и  $u_z$  — скорости вторичного течения;

$U$  — характерная скорость, м/с.

Адекватность формул (2) и (3) проверена путем сравнения с результатами экспериментов [6] и результатами численного решения уравнений Навье–Стокса [7].

При расчете средняя скорость основного течения принималась  $u_{cp} = 20$  м/с, коэффициент Дарси  $\lambda = 0,02$ . Поперечное сечение трубы представляло собой квадрат со стороной 0,5 м; тогда в формуле (1)  $R = 0,25$  м.

Динамическая скорость, вычисленная по формуле

$$u_{\tau} = u_{cp} \sqrt{\frac{\lambda}{8}},$$

составляла  $u_{\tau} = 1$  м/с.

На рисунках 1 и 2 в качестве примера представлены результаты расчета траектории частицы в соответствии с описанной методикой. Диаметр частицы принят равным 0,1 мм, плотность —  $\rho_{ч} = 2474$  кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 1 показаны проекции траектории частицы на меридиональные плоскости  $xOy$  и  $xOz$ . Точками отмечались положения частицы через каждые 0,1 с.

На рис. 2 представлена проекция траектории той же частицы на плоскость поперечного сечения  $yOz$ . Здесь замкнутыми серыми линиями показаны линии тока вторичного течения воздуха, описываемого функцией тока.

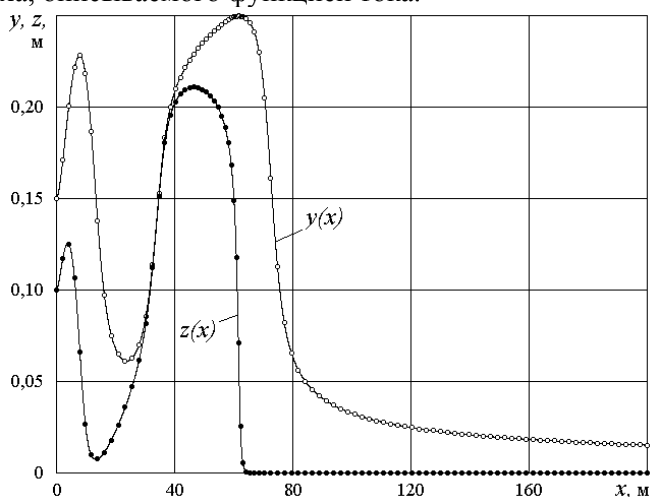


Рис. 1. Проекция траектории частицы в квадратной трубе на меридиональные плоскости  $xOy$  и  $xOz$

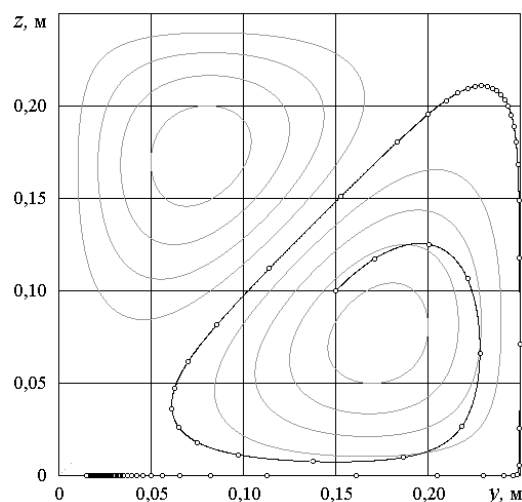


Рис. 2. Проекция траектории частицы в квадратной трубе на плоскость поперечного сечения  $yOz$

$$\bar{\psi} = \sin \bar{y} \sin \bar{z} \sin \frac{\bar{z} + \bar{y}}{2} \sin \frac{\bar{z} - \bar{y}}{2}. \quad (4)$$

Особенность данной траектории состоит в том, что примерно через 60 м частица попадает в центральную область трубы с малыми поперечными скоростями и далее перемещается преимущественно в продольном направлении.

От расчета траектории одной частицы можно перейти к расчету траекторий большого массива частиц, моделирующего взвесенесущий поток. Это позволяет понять закономерности перераспределения концентрации частиц взвеси по сечению потока на различных расстояниях от входного сечения.

В расчете принималось, что концентрация частиц во входном сечении трубы равномерная. Чтобы нагляднее увидеть влияние вторичных течений, сила тяжести не учитывалась. Принималось, что при первом же соударении со стенкой трубы частицы прилипают к стенке.

При моделировании в начальном сечении потока равномерно размещались  $256 \times 256 = 65536$  частиц и рассчитывались положения частиц через каждые 10 м. Время расчета траекторий такого количества частиц на компьютере с процессором Celeron-2000 составляло несколько часов для каждого значения диаметра частицы.

На рисунках 3...5 точками показаны положения частиц диаметром 0,25 мм соответственно через 10, 20 и 30 м от входа в трубу. Поскольку картина течения симметричная, на рисунках показан только первый квадрант поперечного сечения (верхний правый угол). Замкнутые серые линии представляют собой линии тока вторичного течения воздуха.

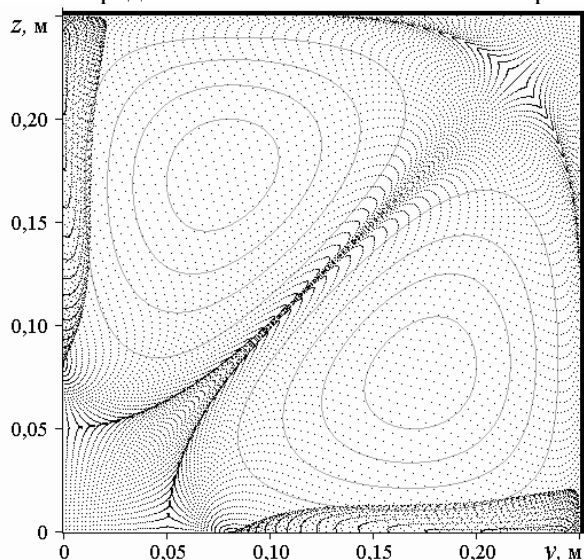


Рис. 3. Распределение частиц пыли по сечению трубы на расстоянии 10 м от входа в трубу

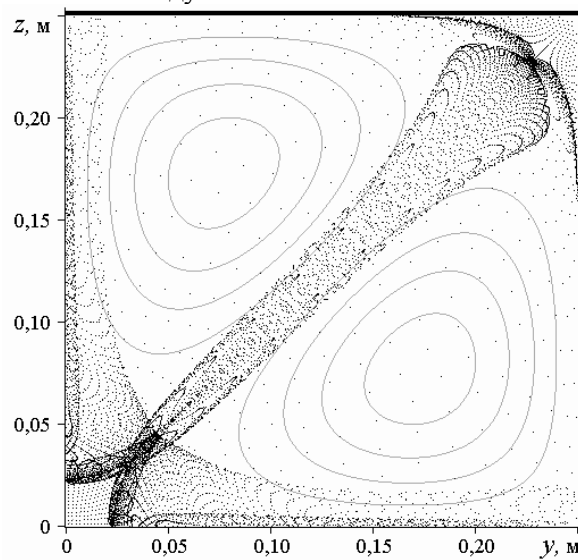


Рис. 4. Распределение частиц пыли по сечению трубы на расстоянии 20 м от входа в трубу

На рисунке 3 видно, что в центре трубы и в углах расположение частиц близко к первоначальному, т.е. “квадратно-гнездовому” расположению. В центрах вихревых ячеек концентрация частиц снизилась, а вдоль осей симметрии и вдоль диагоналей сформировались области повышенной концентрации, напоминающие складки или ударные волны. Расчет показывает, что в данном сечении концентрация пыли еще довольно высока, т.к. на стенках осело только 8,2 % от первоначального количества пыли.

На рисунке 4 еще отчетливее видно скопление частиц пыли вдоль диагоналей и осей симметрии. В центрах вихревых ячеек концентрация уже заметно снизилась, т.к. 24 % частиц уже осело на стенках.

И, наконец, через 30 метров на стенках осело уже 34,8 % частиц пыли. Вся пыль, не осевшая на стенках, сконцентрировалась на границах вихревых ячеек, т.е. вдоль осей симметрии и диагоналей квадрата, образуя “английский крест” (рис. 5).

Расчет концентрации частиц пыли может использоваться для прогнозирования оседания пыли в каналах со взвесенесущими потоками, а также при проектировании пылеулавливающих устройств.

Используя рассмотренный алгоритм расчета траекторий частиц, для каждой рассмат-

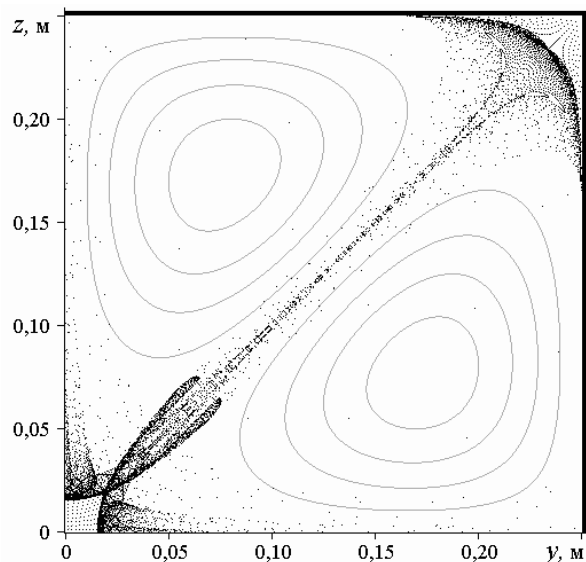


Рис. 5. Распределение частиц пыли по сечению трубы на расстоянии 30 м от входа в трубу

риваемой частицы определялось значение продольной координаты  $x$ , при которой частица соприкасается со стенкой. Считалось, что после соприкосновения частица оседает на стенке (все проекции скорости и ускорения обращаются в ноль).

Рассматривались первые 100 метров длины трубы. Программа подсчитывала количество частиц  $n_i$ , осевших на  $i$ -м погонном метре, а затем определялась интенсивность осаждения путем деления на общее число частиц

$$\eta = \frac{n_i}{n_{\Sigma}}$$

На рис. 6. представлены интенсивности осаждения частиц диаметром 0,25 и 0,4 мм на стенках трубы, полученные расчетным путем. Видно, что осаждение частиц происходит неравномерно по длине трубы: примерно через 10 м после входа в трубу имеется первый максимум, а через 25 м — второй, несколько меньший. Эта закономерность прослеживается в широком диапазоне размеров частиц, причем координата первого максимума мало изменяется при изменении размера частицы.

Результаты расчетов концентрации частиц пыли и их осаждения на стенках трубы использованы при анализе зарастания пылью газопроводов технологических газов и выборе оптимальных размеров поперечного сечения газопроводов на Молдавском металлургическом заводе. Кроме того, на основании полученных результатов можно выбрать участки газопроводов для установки пылеосадительных камер.

### Литература

1. Буров А.А. Пылеулавливание в системе вакуумирования стали / Буров А.А., Серебрянский Д.А., Лепихин А.П. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2003. — Вып. 1 (19). — С. 41 — 44.
2. Сурков С. В. Волновая модель вторичных течений в призматических каналах // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2002. — Вып. 2 (18). — С. 184 — 188.
3. Сурков С.В. Расчет движения пылевых частиц с использованием математических моделей вторичных течений / Сурков С.В., Цабиев О.Н. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2004. — Вып. 2 (22). — С. 184 — 188.
4. Бутенко А.Г. Определение расхода в трубах прямоугольного сечения с помощью осредняющих напорных трубок. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Одесса, 1992.
5. Сулов В.Я. Решение задачи о стабилизированном турбулентном течении в прямоугольном канале // Метрологич. исслед. в обл. измерения расхода и количества веществ. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — С. 9 — 12.
6. Brundrett E. Production and diffusion of vorticity in duct flow / Brundrett E., Baines W.D. // J. Fluid Mech. — 1964. — Vol. 19. — P. 375 — 394.
7. Nakayama A. Calculation of fully developed turbulent flow in ducts of arbitrary cross-section / Nakayama A., Chow W.L., Sharma D. // J. Fluid Mech. — 1983. — Vol. 128. — P. 199 — 217.

Поступила в редакцию 1 октября 2004 г.

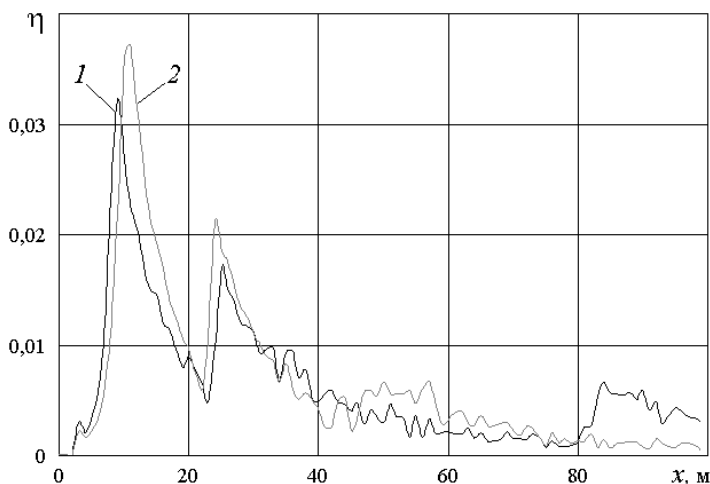


Рис. 6. Интенсивность осаждения частиц на стенках трубы. Размер частиц: 1 – 0,25 мм; 2 – 0,4 мм