

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РИКОШЕТА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В РАСЧЕТЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННЫХ ПОТОКОВ В ВОЗДУХОЗАБОРНИКЕ ВРД

Еникеев Г.Г., Гузаиров А.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет,
ФГУП «НПП «Мотор», г. Уфа

Математическая модель движения воздуха с твердыми частицами при обтекании воздухозаборника составлена со следующими допущениями: в потоке присутствуют твердые частицы определенного минералогического состава, имеющие известный закон распределения по размерам в однородной области; размеры дисперсных частиц во много раз больше расстояний между молекулами и во много раз меньше расстояний, на которых параметры пылевоздушного потока меняются существенно; объемная концентрация дисперсной фазы не очень велика, поэтому ее влияние на несущую фазу не учитывается; отсутствуют процессы непосредственного взаимодействия и столкновения между частицами, их дробление и агломерация; межфазные тепло- и массообмен отсутствуют, существует также равновесие между фазами по температуре; при расчете течения несущей фазы рассматривается установившийся во времени адиабатный, несжимаемый, идеальный поток; эффекты вязкости в несущем потоке учитываются только в тонком слое на межфазных границах; при рассмотрении взаимодействия фаз учитываются аэродинамическая сила, действующая на отдельную дисперсную частицу со стороны воздушного потока; дисперсная фаза присутствует в виде сферических частиц, сохраняющих свою форму, массу, размеры и температуру на всей траектории движения; отклонения от сферической формы учитываются только при воздействии на частицу аэродинамических сил и при использовании соотношений для расчета коэффициентов восстановления скорости и угла при ударе частицы о поверхность. Влиянием сил Архимеда, присоединенных масс, Бассэ пренебрегаем ввиду их малости, из-за отсутствия возмущений в несущей среде на расстоянии, сравнимой с размером частиц, и существенным различием плотностей дисперсной и несущей фаз; влияние пограничного слоя на поверхностях элементов проточной части на движение частиц не учитывается.

Сила Магнуса, обусловленная возникновением вращения частицы после соударения с ограничивающими поверхностями, и сила тяжести не учитываются.

С учетом допущений можно считать, что движение несущей фазы подчиняется уравнениям движения однофазной среды. Для воздушного

потока это позволяет ограничиться только уравнением сохранения массы в виде

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

описывающим потенциальное течение несжимаемой идеальной жидкости.

Для твердой фазы уравнения сохранения масс и импульсов примут вид

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_i \mathbf{v}_i = 0;$$

$$\rho_i \frac{d_i \mathbf{v}_i}{dt} = \rho_i \mathbf{g}_i + \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_m,$$

где \mathbf{F}_a и \mathbf{F}_m - сила аэродинамического взаимодействия и сила Магнуса, приходящиеся на единицу объема смеси [1].

Решение задачи изучения движения пылевоздушного потока в воздухозаборнике сводится к определению поля течения воздушного потока с привлечением моделей течения однофазного газового потока, удовлетворяющих уравнению (1), и расчету движения в этом поле частиц.

На рис. 1 показана расчетная схема воздухозаборника и выбранная система координат.

Для расчета поля несущего потока был использован метод наложения потенциальных потоков. Основные соотношения для расчета по этому методу приведены в виде системы уравнений (3) [1].

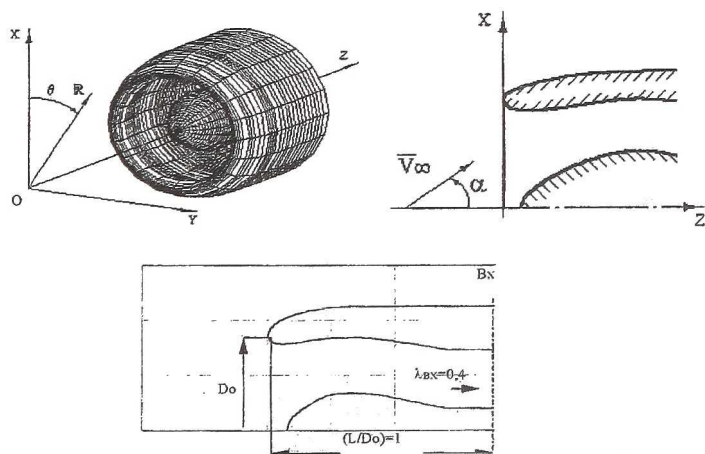


Рис.1. Расчетная схема воздухозаборник: диаметр входа $Do=1,717$ м – 1 вариант; $Do=0,3434$ м – 2 вариант; относительная длина ВЗ $(L/Do)=1$. Материал поверхности – алюминиевый сплав. Расчетное сечение – “Вх-Вх” перед двигателем

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$$

$$\frac{q}{2} + \frac{1}{4\pi} \cdot \iint \frac{q_s \cos(n\rho)}{\rho^2} \cdot ds = -\vec{V}_\infty \frac{\partial x}{\partial n} \quad (3)$$

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_{1A} K_A + \vec{v}_{1B} K_B + \vec{v}_{1C} K_C,$$

где \vec{v}_{1A} , \vec{v}_{1B} , \vec{v}_{1C} - искомое векторное поле скоростей несущего потока соответственно для трех фундаментальных решений А, В и С [1]. K_A , K_B , K_C - коэффициенты линейной комбинации фундаментальных решений, зависящие от совокупности значений следующих величин: скорости невозмущенного потока \vec{V}_∞ , угла атаки α обтекания воздухозаборника и массового расхода воздуха G через воздухозаборник.

Движение твердой частицы описывается уравнением (4).

$$\frac{d\vec{v}_{ik}}{dt} = \frac{3}{4} C_{dik} \frac{\rho_1^0}{\rho_i^0} \frac{|\vec{v}_1 - \vec{v}_{ik}|}{d} (\vec{v}_1 - \vec{v}_{ik}), \quad (4)$$

где ρ_1^0 и ρ_i^0 - плотности воздуха и вещества частицы; d - диаметр частицы; \vec{v}_1 и \vec{v}_{ik} - векторы абсолютных скоростей воздуха и частиц пыли определенной фракции; $C_{dik} = f(\text{Re}_{ik})$; $\text{Re}_{dik} = \frac{\rho_1^0 d_{ik} (v_1 - v_{ik})}{\mu}$ - число Рейнольдса частицы.

Рейнольдса частицы.

Динамика отскока частиц при взаимодействии с ограничивающими поверхностями описывается статистическими зависимостями (5) [2] для частиц кварца и поверхности из алюминиевого сплава. Основными параметрами, характеризующими соударение частицы, являются средние значения коэффициентов восстановления скорости e_V (отношение скорости отскока к скорости падения $\vec{v}_{ik}^2 / \vec{v}_{ik}^1$) и угла e_β (отношение угла отскока к углу падения β_2 / β_1), а также средне квадратичные отклонения $\sigma(e_V)$ и $\sigma(e_\beta)$ указанных коэффициентов восстановления скорости и угла.

$$\begin{aligned} e_V &= 0.93551 - 0.05710\beta_1 + 2.28628 \times 10^3 \beta_1^2 - 3.72484 \times 10^5 \beta_1^3 + 2.04537 \times 10^{-7} \beta_1^4 \\ e_\beta &= 2.68321 - 0.12570 \beta_1 + 2.54388 \times 10^3 \beta_1^2 - 1.59472 \times 10^{-5} \beta_1^3 \\ \sigma(e_V) &= 0.94778 - 0.09407 \beta_1 + 3.52115 \times 10^{-3} \beta_1^2 - 5.30096 \times 10^5 \beta_1^3 + \\ &+ 2.74714 \times 10^7 \beta_1^4 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sigma(e_\beta) = 1.47251 - 0.06238\beta_1 + 1.01706 \times 10^{-3} \beta_1^2 - 5.56946 \times 10^{-6} \beta_1^3,$$

где β_1 - угол в радианах между скоростью падения частицы и касательной

к поверхности в точке соударения (Рис. 2). Параметры e_V и e_β без учета среднеквадратичных отклонений характеризуют наиболее вероятный отскок - детерминированная модель рикошета твердых частиц.

Стохастическая (вероятностная) модель предусматривает возможные пределы изменения параметров восстановления с учетом статистического разброса: для нормального закона распределения

$$e_V = e_V \pm 3\sigma(e_V) ; e_\beta = e_\beta \pm 3\sigma(e_\beta) . \quad (6)$$

Результаты расчета. Расчет производился для схемы воздухозаборника, изображенной на рис. 1. Рассматриваемая среда – запыленный поток с твердыми частицами кварца, распределение частиц по фракциям подчиняется закону «АС крупная»

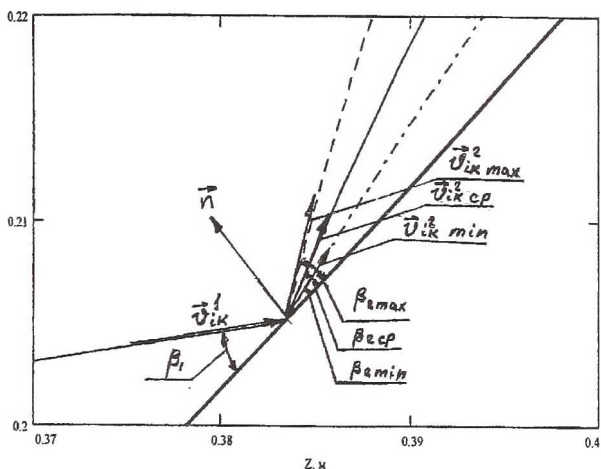


Рис.2. Схема соударения твердой частицы с поверхностью

Эффект применения стохастической модели рикошета твердых частиц показан на примере расчетов траекторий частиц, движущихся с соударением в канале воздухозаборника (рис.3). В случае детерминированной модели все частицы с одинаковыми граничными условиями на входе имеют одинаковые траектории после отскока от ограничивающей поверхности центрального тела (средняя траектория). Стохастическая модель дает иную картину отскока. После отскока частицы движутся по различным траекториям, которые находятся между двумя крайними (см. рис. 3). Причем вероятность движения частицы по той или иной траектории определяется нормальным законом распределения. На рис. 3 показано второе соударение и отскок частицы от поверхности обечайки. При вторичном отскоке частицы движутся также по различным траекториям. Расчет по стохастической модели дает заметный разброс положения частиц после отскока. В

результате наблюдается сглаживание распределения массы частиц по радиусу. На рис. 4 показаны результаты расчета распределения массы частиц по радиусу в расчетном сечении для частиц кварца размером 200 мкм для двух моделей: детерминированной и стохастической. На рис. 5 представлены результаты расчета по детерминированной и стохастической модели распределения массы частиц по радиусу для всего спектра частиц.

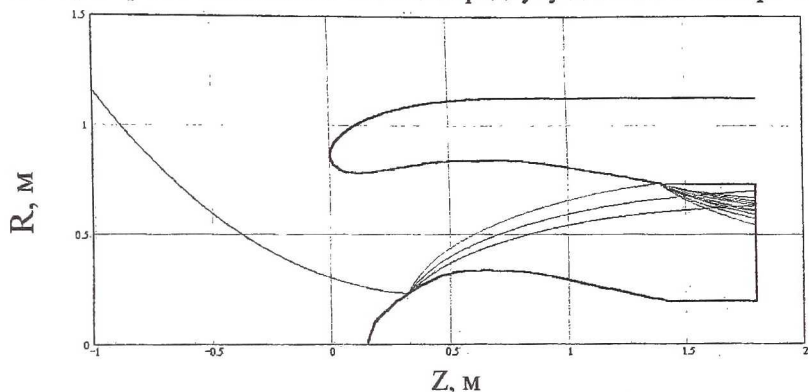


Рис. 3. Траектории частицы размером 200 мкм.

Средняя траектория соответствует расчету по детерминированной модели

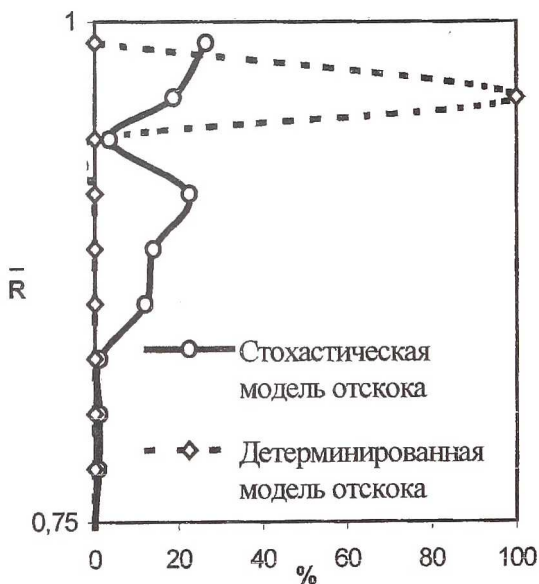


Рис.4. Распределение массы частиц по радиусу

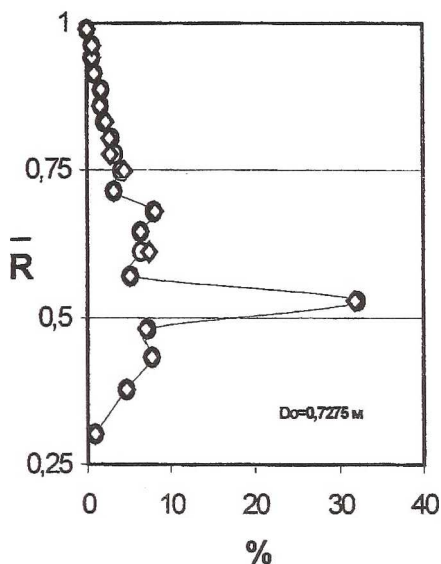


Рис. 5. Распределение массы частиц по радиусу для всего спектра частиц

Из графика видно, что для обеих моделей практически отсутствует разница в распределения частиц по радиусу. Объясняется это большой долей частиц малых размеров, которые не соударяются с поверхностью для приведенных условий решения задачи.

Выводы: Стохастическая модель дает заметный эффект при увеличении размеров частиц, количества их рикошетов и массовой доли в воздухе. В условиях большой запыленности (песчаные бури, морское побережье, пустыня) доля крупных частиц может повышаться, что в свою очередь может интенсифицировать процесс эрозии. Поэтому для увеличения точности расчета в задачах пылеочистки и эрозионного износа проточной части газотурбинного двигателя целесообразно использовать стохастическую модель рикошета.

Список литературы

1. Еникеев Г.Г., Гузаиров А.Р. Математическое моделирование движения воздуха с твердыми частицами в дозвуковом осесимметричном воздухозаборнике. Вестник УГАТУ.2001. №2(4), с. 88-96
2. Tabakoff W., Murugan D.M., Hamed A. Effect of target materials on the particle restitution characteristics for turbomachinery application. AIAA Pap., 1994, №0143, pp.1-9.