



Две модели динамики лагранжевых частиц в канале вихревой трубы

Баширова К.И., Михайленко К.И.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Рассматривается разделение потока дисперсных частиц по выходам из канала вихревой трубы. Численное моделирование проводится в пакете OpenFOAM. В частности, проводится сравнение скоростей, с которыми частицы покидают канал через горячую и холодную диафрагмы. Вихревые трубы могут применяться для разделения жидкостей и газов на фракции и их очистки от примесей. Например, они применяются для удаления из природного и попутного нефтяного газа излишков влаги.

В представленной работе проведено сравнение поведения частиц с различными моделями тензора напряжений: Лана и Харриса–Крайтона. Для этого использовалась модель вихревой трубы длиной 0.12 м и диаметром 0.016 м. В начальный момент времени давление в трубе составляет 10^5 Па, давление на входе — $6.5 \cdot 10^5$ Па. В трубу добавляются мелкодисперсные частицы диаметром 0.00001 м и плотностью 2526 кг/м³. Скорость инъекции частиц — 20000 частиц в секунду, начальная скорость каждой частицы составляет 15 м/с и направлена вдоль входных патрубков вихревой трубы. В качестве несущей фазы использован воздух.

Математическая модель

Влияние моделей тензора напряжений проверялось с использованием метода MP-PIC. Стандартная модель MP-PIC включает в себя систему уравнений для несущей фазы, состоящую из уравнений

неразрывности и импульсов [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_{(1)}}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_{(1)} v_{(1)i})}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial(\alpha_{(1)} v_{(1)j})}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_{(1)} v_{(1)j} v_{(1)i})}{\partial x_i} &= \\ &= -\frac{1}{\rho_{(1)}} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \alpha_{(1)} g_j - \frac{F_{(21)i}}{\rho_{(1)}} \end{aligned}$$

где $\alpha_{(1)}$ — объемная концентрация газовой фазы; $v_{(1)i}$ — i -я составляющая вектора скорости газовой фазы; p — давление; $\rho_{(1)}$ — плотность газовой фазы; g_i — компоненты вектора ускорения свободного падения; $F_{(21)i}$ — функция межфазной передачи импульса; $i = 1, 2, 3$.

Для несомой гранулированной среды записывается уравнение для $f(x, v_{(2)}, m, t)$ — функции, определяющей распределение частиц, где $x, v_{(2)}, m$ — расположение, плотность и масса частицы, соответственно, t — время:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f v_{(2)i}}{\partial x_i} + \frac{\partial f A}{\partial v_{(2)i}} = 0$$

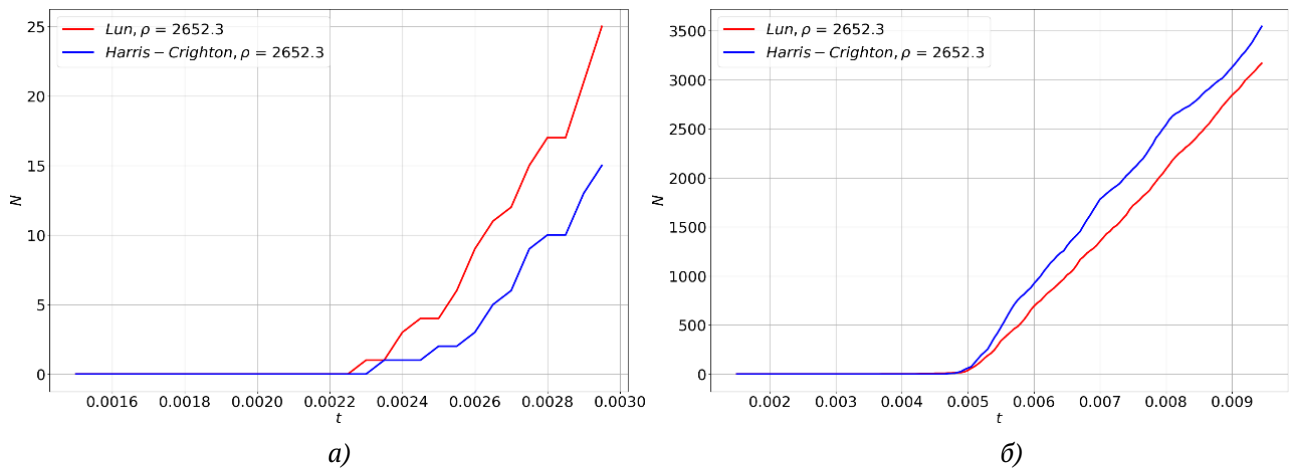


Рис. 1. Количество частиц, вылетевших из «горячего» выхода (а) и из «холодного» выхода (б)

Здесь $v_{(2)i}$ — i -я составляющая вектора скорости частиц; A — производная по времени от скорости твердых частиц:

$$A = D(v_{(1)} - v_{(2)}) - \frac{1}{\rho_{(2)}} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g - \frac{1}{\alpha \rho_{(2)}} \frac{\partial \tau}{\partial x_i}$$

где $D = C_d \frac{3 \rho_{(1)}}{8 \rho_{(2)}} \frac{|v_{(1)} - v_{(2)}|}{R}$ — функция переноса;

C_d — коэффициент переноса; $\rho_{(2)}$ — плотность частиц; R — радиус частиц; α — объемная концентрация частиц, τ — тензор изотропного напряжения, определяемый моделью Лана:

$$\tau = \left[\rho_{(2)} \alpha + \rho_{(2)} \alpha^2 (1 + e) \frac{3}{5} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_{cp}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \frac{1}{3} \sigma^2$$

или моделью Харриса–Крайтона:

$$\tau = P_{(2)} \frac{\alpha^\beta}{\max(\alpha_{cp} - \alpha, \omega(1 - \alpha))}$$

Здесь α_{cp} — объемная концентрация частиц при плотной упаковке, $e = 0.95$ — коэффициент восстановления; σ — среднеквадратическое отклонение для колебаний скорости; $P_{(2)} = 10$ Па — эмпирический коэффициент; $\beta = 2$ — безразмерный эмпирический коэффициент; ω — коэффициент для обеспечения вычислительной устойчивости.

Концентрация частиц в зависимости от функции распределения представлена в выражении:

$$\alpha_{cp} = \iint f \frac{m}{\rho_{(2)}} dm dv_{(2)}, \quad \alpha_{cp} + \alpha = 1$$

Для замыкания системы используется уравнение для функции межфазной передачи импульса:

$$F = \int f_m \left[D(v_{(1)} - v_{(2)}) - \frac{1}{\rho_{(2)}} \nabla p \right] dm dv_{(2)}$$

Приведенные уравнения решаются при помощи решателя пакета OpenFOAM — *denseParticleFoam*, который используется для моделирования динамики лагранжевых дисперсных частиц в жидкости или газе. Применимость метода для решения подобных задач показана в работе [2].

Результаты численного моделирования

На Рис. 1 представлено количество частиц, вылетевших из горячего и холодного выходов. Красным представлено количество, полученное при использовании модели Лана, синим — Харриса–Крайтона.

На Рис. 2 показана относительная разница количества частиц, полученных при использовании описанных выше моделей. Видно существенное различие между результатами моделирования.

В работах [3, 4] проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными результатами, полученными при использовании моделей Лана и Харриса–Крайтона. Показано, что модель Лана лучше подходит для моделирования поведения частиц в случае отсутствия плотной упаковки. Это объясняется наличием большего количества эмпирических коэффициентов в модели Харриса–Крайтона. Кроме того, модель Лана позволяет учитывать изменения скорости частиц.

В представленной работе показано, что выбор модели тензора напряжений в гранулированной среде оказывает существенное влияние на скорость покидания канала вихревой трубы через диафрагмы и имеет непосредственное отношение к правильности оценки сепарации частиц в рассматриваемом устройстве. В дальнейших исследовани-

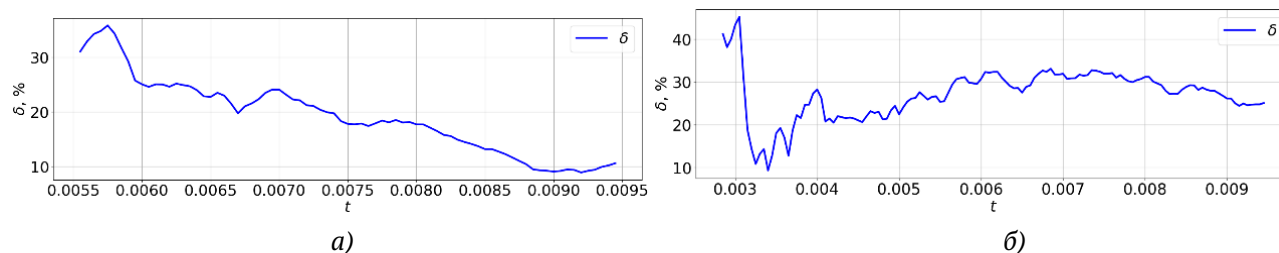


Рис. 2. Относительная разница количества частиц, вылетевших из «горячего» выхода (а) и из «холодного» выхода (б)

ях планируется сравнение с континуальной моделью гранулированной среды и с доступными экспериментальными данными для проверки полученных результатов.

Список литературы

- [1] Snider D.M. An In-compressible Three-Dimensional Multiphase Particle-in-Cell Model for Dense Particle Flows // *Journal of Computational Physics*. 2001. № 170. p. 523–549.
- [2] Баширова К.И. Моделирование осаждения закрученного потока разреженной гранулированной среды в цилиндрической области методом MP-PIC // *Многофазные системы*. 2021. Т. 16(3–4). С. 144–148.
- [3] Caliskan U., Miskovic S. A chimera approach for MP-PIC simulations of dense particulate flows using large parcel size relative to the computational cell size // *Chemical Engineering Journal Advances*. 2021. V. 5.
- [4] Lu S., Tan J.Z.Y., Maroto-Valer M.M. Investigation of CO₂ Photoreduction in an Annular Fluidized Bed Photoreactor by MP-PIC Simulation // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022. № 61(8). p. 3123-3136.