

ISSN: 2658–5782

Номер 3–4

2021

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Моделирование осаждения закрученного потока разреженной гранулированной среды в цилиндрической области методом MP-PIC

Баширова К.И

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

Объектом исследования является процесс осаждения сферических частиц в цилиндрической трубе, для оценки которого построена модель в пакете OpenFOAM. Исследования показывают, что метод MP-PIC хорошо подходит для моделирования взаимодействия гранулированной среды с потоками жидкости и газа. В настоящей работе оценивается применимость метода для решения поставленной задачи. В процессе изучения осаждения в закрученном потоке рассматривались группы частиц разного диаметра. Показано, что чем мельче частицы, тем быстрее они осаждаются на стенках цилиндрической трубки. Напротив, более крупные и тяжелые частицы пролетают большее расстояние вдоль трубки, что объясняется значительным влиянием инертного компонента по сравнению с силой Стокса. Для оценки полученных результатов проведена серия расчетов с использованием сеток различных размеров. Показана хорошая сопоставимость результатов при вычислениях на сетках разного масштаба и при разных размерах дисперсных частиц. Планируется дальнейшее сравнение с экспериментальными данными.

Ключевые слова: численное моделирование, осаждение частиц, OpenFOAM, MP-PIC, denseParticleFoam, многофазные системы

1. Введение

В настоящей работе с помощью численных экспериментов в пакете OpenFOAM рассматривается процесс осаждения сферических частиц разных диаметров в трубе.

Для моделирования процессов, происходящих в трубе, используется численный метод MP-PIC (multiphase particle-in-cell method), объединяющий подходы Эйлера для жидкой фазы и Лагранжа для частиц [1]. В работах [2–5] также показывается, что выбранный метод хорошо описывает взаимодействие частиц с потоками жидкостей и газов. Авторы работ [6–8] оценивают применимость метода для моделей пузырьковых колонн с осаждением или поднятием частиц в отсутствии завихряющихся потоков. В работе [9] сравниваются существующие подходы к моделированию пузырьков в среде: подход Эйлера, подход Лагранжа и гибридный

подход. По мнению авторов гибридный подход в некоторых случаях позволяет получать более высокую точность. В настоящей работе рассматривается применимость метода MP-PIC для моделирования закрученного потока с гранулированной средой. Для проверки результатов моделирования проводятся численные эксперименты с использованием сеток с различным числом ячеек.

2. Постановка задачи

Рассматривается модель двухмерной ударной трубы длиной 0,6 м и диаметром 0,1 м. Начальное значение давления в трубе и вне ее составляет 10^5 Па, давление у входного отверстия — $1,1 \cdot 10^5$ Па. Диаметр частиц варьируется от 0,0001 до 0,00015 м.

Скорость добавления частиц составляет 20000 частиц в секунду, начальная скорость каждой частицы, направленная вдоль трубы — 15 м/с. Добавление частиц в поток начинается спустя 0,0015 с. При расчетах используются песок в качестве дисперсной среды и воздух в качестве несущей фазы.

2.1. Математическая модель

Для решения поставленной задачи используется метод МР-РС. Стандартная модель МР-РС включает следующую систему уравнений неразрывности и импульсов для несущей фазы [2]:

$$\frac{\partial \rho_{(1)}}{\partial t} + \frac{(\partial \rho_{(1)} v_{(1)i})}{\partial x_i} = 0,$$

$$\frac{(\partial \rho_{(1)} v_{(1)j})}{\partial t} + \frac{(\partial \rho_{(1)} v_{(1)j} v_{(1)i})}{\partial x_i} =$$

$$= -\alpha_{(1)} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho_{(1)} g_j - \frac{F_{(21)j}}{\rho_{(1)}}.$$

Здесь $\rho_{(1)}$, $\alpha_{(1)}$, $v_{(1)i}$ — плотность, объемная концентрация и i -я составляющая вектора скорости несущей среды; t — время; g_i — компоненты вектора ускорения свободного падения; $F_{(21)j}$ — функция межфазной передачи импульса; $i = 1, 2, 3$.

Для несомой гранулированной фазы было записано уравнение для $f(x, v_{(2)}, m, t)$ — функции, определяющей распределение частиц, где x , $v_{(2)}$, m — расположение, плотность и масса частицы.

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

где A — производная скорости частицы:

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

p — давление; $\rho_{(2)}$ — плотность частиц;

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

C_d — коэффициент переноса; R — радиус частиц;

$\tau = P_{(2)} \frac{\alpha^\beta}{\max[\alpha_{cp} - \alpha, \omega(1 - \alpha)]}$ — изотропное напряжение; α — объемная концентрация частиц; α_{cp} — объемная концентрация частиц при плотной упаковке; $P_{(2)}$ — константа в единицах давления.

Концентрация частиц в зависимости от функции распределения представлена следующим образом:

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

Для замыкания системы используется уравнение для функции межфазной передачи импульса:

$$F = \iint f m [D(v_{(1)} - v_{(2)}) - \frac{1}{\rho_{(2)}} \nabla p] dm dv_{(2)}.$$

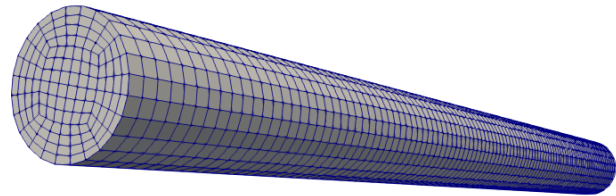


Рис. 1. Двухмерная сетка

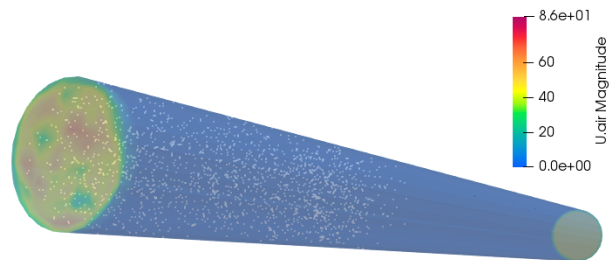


Рис. 2. Схема размещения частиц внутри трубы

3. Применение пакета OpenFOAM

Для решения приведенных уравнений используется солвер пакета OpenFOAM — denseParticleFoam, применяемый для моделирования частиц в жидкости или газе.

На рис. 1 представлена использованная сетка, а на рис. 2 — распределение гранулированной среды в трубе в момент времени 0,01 с.

Для оценки корректности результатов проводились исследования сходимости по сетке. Поскольку аналитическое решение отсутствует, полученные результаты сравнивались между собой, чтобы исключить серьезные отклонения. В работе использовалось 5 видов сеток, число ячеек приведено в табл. 1. Сетки № 2 и № 4 являются комбинированными: в первой части расчета до момента времени 0,001 с используется сетка с меньшим числом ячеек (Количество 1), во второй части расчета с помощью команды mapFields пакета OpenFOAM производится переход на сетку с большим числом ячеек (Количество 2), результаты расчетов давле-

Таблица 1. Число ячеек для сеток

№	Количество 1	Количество 2
1	7650	7650
2	7650	13200
3	13200	13200
4	13200	20790
5	20790	20790

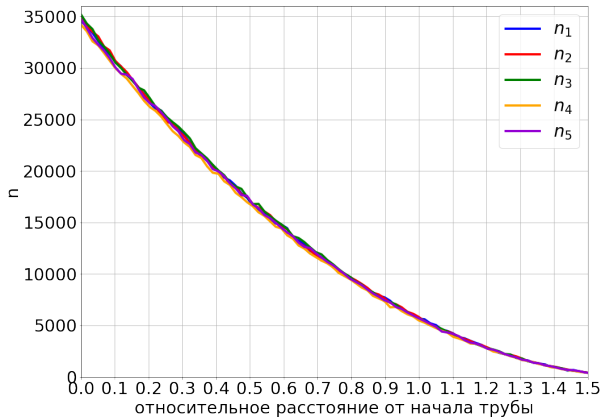


Рис. 3. Количество частиц, достигших расстояния вдоль трубы

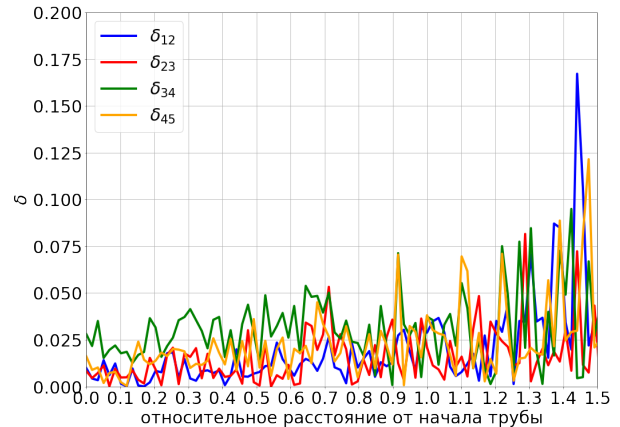


Рис. 4. Относительная разница между количествами частиц

ния и скорости жидкости при этом интерполируются. Описанный выше подход позволяет снизить время вычислений, при этом не оказывает существенного влияния на расчеты траекторий частиц. Размеры ячеек сетки выбираются исходя из условия, что размеры частиц не могут превышать размер ячейки.

4. Результаты и их обсуждение

Для сравнения результатов, полученных с помощью описанных выше сеток, построим графики зависимости количества частиц, достигших заданных расстояний от начала трубы (рис. 3), и относительной разницы между количествами частиц для разных сеток (рис. 4), которая вычислялась по формуле:

$$\delta_{k,k+1} = \frac{n_k - n_{k+1}}{n_k},$$

где n_k — количество частиц в интервале для k -й сетки.

Видно, что в пределах трубы относительная разница δ находится в пределах 0,2, что говорит о слабой зависимости поведения осаждающихся частиц от количества ячеек в сетке. Для оценки влияния размера частицы на скорость осаждения рассмотрим частицы пяти радиусов: 0,0001, 0,00011, 0,00012, 0,000125, 0,00015 м.

На рис. 5 приведено количество частиц в трубе в зависимости от времени, на рис. 6 — в зависимости от относительного расстояния вдоль трубы. Рассматриваются две серии расчетов: с условием отскокивания частиц от боковых стенок и с условием прохождения через стенки (осаждения). Пунктирными линиями отмечено количество частиц, которые остаются в трубе в первой серии расчетов, сплошной линией — количество частиц во второй

серии расчетов, n^k — количество частиц для k -й сетки, d — диаметр частицы в метрах.

Для всех диаметров в обеих сериях расчетов количество частиц равномерно возрастает с течением времени. Из рис. 5 и 6 видно, что суммарное количество частиц в трубе с условием осаждения на стенках уменьшается.

5. Заключение

При сравнении времени осаждения и количества частиц, достигших выходного отверстия трубы, можно сделать вывод, что чем меньше размер частицы, тем раньше она оседает на стенках трубы. Таким образом, увеличение размера частицы способствует дальнейшему прохождению вдоль трубы, так как влияние сил инерции растет пропорционально радиусу частицы с большей скоростью по

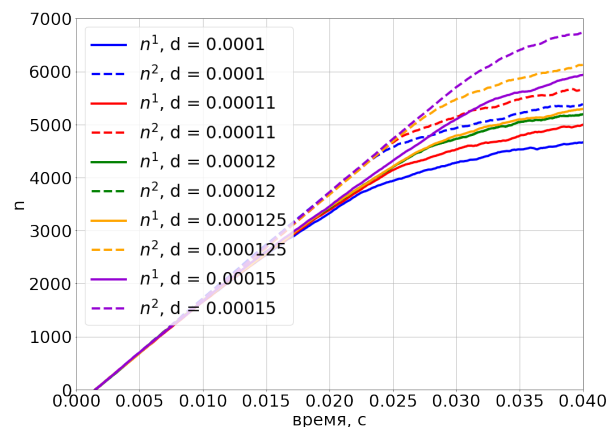


Рис. 5. Количество частиц в трубе в зависимости от времени

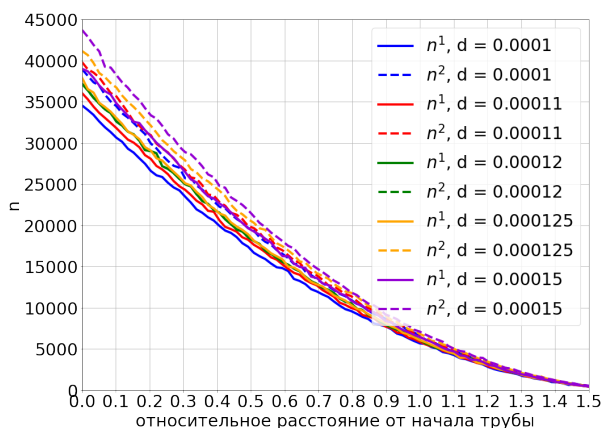


Рис. 6. Количество частиц в трубе в зависимости от относительного расстояния вдоль трубы

сравнению с силой Стокса.

Представленные результаты хорошо соотносятся друг с другом. В дальнейшем планируется сравнение с экспериментальными данными.

Список литературы

- [1] Snider D.M. An Incompressible Three-Dimensional Multiphase Particle-in-Cell Model for Dense Particle Flows // *Journal of Computational Physics*. 2001. V. 170, No. 2. Pp. 523–549. DOI: [10.1006/jcph.2001.6747](https://doi.org/10.1006/jcph.2001.6747)
- [2] Wargadalam V.J., Andira M.A., Putra C.A., Siswantara A.I., Gunadi G.G., Hariyotejo, Damis C., Aminuddin. Numerical Simulation of a Small-Scale Cyclone Separator using MP-PIC Method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 694. P. 012015. DOI: [10.1088/1757-899X/694/1/012015](https://doi.org/10.1088/1757-899X/694/1/012015)
- [3] Kim S.H., Lee J.H., Braatz R.D. Multi-phase particle-in-cell coupled with population balance equation (MP-PIC-PBE) method for multiscale computational fluid dynamics simulation // *Computers and Chemical Engineering*. 2020. V. 134. P. 106686. DOI: [10.1016/j.compchemeng.2019.106686](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106686)
- [4] Snider D.M., O'Rourke P.J., Andrews M.J. Sediment flow in inclined vessels calculated using a multiphase particle in-cell model for dense particle flows // *International Journal of Multiphase Flow*. 1998. V. 24, No. 8. Pp. 1359–1382. DOI: [10.1016/S0301-9322\(98\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(98)00030-5)
- [5] O'Rourke P.J., Zhao P., Snider D.M. A model for collisional exchange in gas/liquid/solid fluidized beds // *Chemical Engineering Science*. 2009. V. 64, No. 8. Pp. 1784–1797. DOI: [10.1016/j.ces.2008.12.014](https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.12.014)
- [6] Verma V., Padding J.T. A novel approach to MP-PIC: Continuum particle model for dense particle flows in fluidized beds // *Chemical Engineering Science*. 2020. V. 6. P. 100053. DOI: [10.1016/j.cesx.2019.100053](https://doi.org/10.1016/j.cesx.2019.100053)
- [7] Zhou L., Lv W., Bai L., Han Y., Wang J., Shi W., Huang G. CFD–DEM study of gas–solid flow characteristics in a fluidized bed with different diameter of coarse particles // *Energy Reports*. 2022. V. 8. Pp. 2376–2388. DOI: [10.1016/j.egy.2022.01.174](https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.174)
- [8] Muilwijk C., Van den Akker H. The effect of liquid co-flow on gas fractions, bubble velocities and chord lengths in bubbly flows. Part I: Uniform gas sparging and liquid co-flow // *International Journal of Multiphase Flow*. 2021. V. 137. P. 103498. DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103498](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103498)
- [9] Ghahramani E., Arabnejad M., Bensow R. A comparative study between numerical methods in simulation of cavitating bubbles // *International Journal of Multiphase Flow*. 2019. V. 111. Pp. 339–359. DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.10.010](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.10.010)



Simulation of the sedimentation of a swirling flow of a rarefied granular medium in a cylindrical region by MP-PIC method

Bashirova K.I.

Mavlyutov Institute of Mechanics, UFRС RAS, Ufa, Russia

The object of the study is the deposition of small particles in a cylindrical region, for the evaluation of which a model was built in the OpenFOAM package. Many studies show that the MP-PIC method is well suited for modeling the interaction of a granular medium with liquid and gas flows. In this paper, the applicability of the method to solve the problem is evaluated. In the process of studying sedimentation in a swirling stream, groups of particles of different diameters were considered. It is shown that the smaller the particles, the faster they are deposited on the walls of a cylindrical tube. On the contrary, larger and heavier particles fly a long distance along the tube, which is explained by the greater influence of the inert component compared to the Stokes force. To evaluate the results obtained, a series of calculations using different sizes of grids was carried out. Good comparability of the results is shown. Further comparison with experimental data is planned.

Keywords: numerical simulation, particles sedimentation, OpenFOAM, MP-PIC, denseParticleFoam, multiphase systems

References

- [1] Snider D.M. An Incompressible Three-Dimension Snider D.M. An In-compressible Three-Dimensional Multiphase Particle-in-Cell Model for Dense Particle Flows // *Journal of Computational Physics*. 2001. V. 170, No. 2. Pp. 523–549.
DOI: 10.1006/jcph.2001.6747
- [2] Wargadalam V.J., Andira M.A., Putra C.A., Siswantara A.I., Gunadi G.G., Hariyotojo, Damis C., Aminuddin. Numerical Simulation of a Small-Scale Cyclone Separator using MP-PIC Method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 694. P. 012015.
DOI: 10.1088/1757-899X/694/1/012015
- [3] Kim S.H., Lee J.H., Braatz R.D. Multi-phase particle-in-cell coupled with population balance equation (MP-PIC-PBE) method for multiscale computational fluid dynamics simulation // *Computers and Chemical Engineering*. 2020. V. 134. P. 106686.
DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.106686
- [4] Snider D.M., O'Rourke P.J., Andrews M.J. Sediment flow in inclined ves-sels calculated using a multiphase particle in-cell model for dense particle flows // *International Journal of Multiphase Flow* 24. 1998. V. 24, No. 8. Pp. 1359–1382.
DOI: 10.1016/S0301-9322(98)00030-5
- [5] O'Rourke P.J., Zhao. P., Snider D.M. A model for collisional exchange in gas/liquid/solid fluidized beds // *Chemical Engineering Science*. 2009. V. 64, No. 8. Pp. 1784–1797.
DOI: 10.1016/j.ces.2008.12.014
- [6] Verma V., Padding J.T. A novel approach to MP-PIC: Continuum particle model for dense particle flows in fluidized beds // *Chemical Engineering Science*. 2020. V. 6. P. 100053.
DOI: 10.1016/j.cesx.2019.100053
- [7] Zhou L., Lv. W., Bai L., Han Y., Wang J., Shi W., Huang G. CFD– DEM study of gas–solid flow characteristics in a fluidized bed with different diameter of coarse particles // *Energy Reports*. 2022. V. 8. Pp. 2376–2388.
DOI: 10.1016/j.egy.2022.01.174
- [8] Muilwijk C., Van den Akker H. The effect of liquid co-flow on gas fractions, bubble velocities and chord lengths in bubbly flows. Part I: Uniform gas sparging and liquid co-flow // *International Journal of Multiphase Flow*. 2021. V. 137. P. 103498.
DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103498
- [9] Ghahramani E., Arabnejad M., Bensor R. A comparative study between numerical methods in simulation of cavitating bubbles // *International Journal of Multiphase Flow*. 2019. V. 111. Pp. 339–359.
DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.10.010