

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ: МОДЕЛЬ ЭЙЛЕРА-ЛАГРАНЖА В СИСТЕМЕ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ГАЗ-ТВЕРДОЕ ТЕЛО

У.Д.Шеркулов, Э.Кудратов,
М.Н.Каршибоева, Д.Х.Рахматова

Узбекистан, Навоийский государственный университет, г. Навои

***Аннотация.** В данной статье анализируется применение модели Эйлера-Лагранжа для оценки последствий сложных аэродинамических взаимодействий в системе двухфазных потоков газ-твердое тело. Подход Эйлера-Лагранжа позволяет моделировать газовую фазу как сплошную среду, а частицы твердого тела — как объекты, движущиеся по дискретным траекториям. В статье подробно рассматриваются различные аэродинамические силы, воздействующие на частицы, в частности, силы сопротивления, подъемные силы, силы виртуальной массы и Бассе, а также взаимные столкновения частиц и их влияние на турбулентность газовой фазы. Анализируются возможности, ограничения и результаты применения модели с использованием результатов мировых исследований и современных методов численного моделирования (CFD). Предложенный анализ демонстрирует эффективность модели Эйлера-Лагранжа в оптимизации промышленных процессов и решении экологических проблем.*

***Ключевые слова:** модель Эйлера-Лагранжа, поток газ-твердое тело, аэродинамические взаимодействия, современное численное*

моделирование, сила драга (сопротивления), моделирование турбулентности, валидация.

Введение

Двухфазные потоки газ-твердое тело являются широко распространенным явлением в природе и промышленности. Примерами таких систем могут служить песчаные бури, вулканические извержения, порошковая металлургия, химические реакторы (например, псевдоожиженные слои), производство энергии (сжигание угля) и загрязнение окружающей среды. Для эффективного управления, проектирования и оптимизации этих процессов необходимо понимание сложных механических и термических взаимодействий между газовой и твердой фазами [1, 2]. В последние десятилетия развитие методов вычислительной гидродинамики сделало возможным численное моделирование этих сложных потоков. Среди существующих подходов модель Эйлера-Лагранжа выделяется своей точностью и гибкостью для систем с относительно низкой объемной концентрацией частиц (разбавленные потоки) [3]. Эта модель описывает газовую фазу с помощью подхода Эйлера (уравнения Навье-Стокса), а частицы твердого тела — с помощью подхода Лагранжа (второй закон Ньютона). Это позволяет учитывать траекторию каждой частицы, ее взаимодействие с другими частицами и газовым потоком. Целью данной статьи является всесторонняя оценка последствий аэродинамических взаимодействий в потоках газ-твердое тело в рамках модели Эйлера-Лагранжа, опираясь на данные последних мировых исследований. В статье рассматриваются теоретические основы модели, различные механизмы взаимодействий, методы применения модели и ее практическое значение в промышленности.

Основы модели Эйлера-Лагранжа

В модели Эйлера-Лагранжа физические свойства системы описываются с помощью двух различных подходов.

Уравнения газовой фазы (Эйлер). Движение газовой фазы описывается уравнениями сохранения массы и импульса (уравнения Навье-Стокса) [4]. Такие величины, как скорость, давление, плотность и температура в каждой точке газа, рассматриваются как функции пространства и времени:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}) &= 0 \\ \frac{\partial(\rho_g \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u} \mathbf{u}) &= \\ &= -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho_g \mathbf{g} + \mathbf{S}_M\end{aligned}$$

Здесь:

- ρ_g - плотность газа,
- $\mathbf{u}$ - вектор скорости газа,
- p - давление,
- $\boldsymbol{\tau}$ - тензор вязких напряжений,
- $\mathbf{g}$ - ускорение силы тяжести,
- $\mathbf{S}_M$ - источниковый член, описывающий воздействие частиц на газ (перенос импульса).

Уравнения частиц твердого тела (Лагранж). Движение каждой дискретной частицы (i-й частицы) рассчитывается в соответствии со вторым законом Ньютона как сумма всех сил, воздействующих на нее [5]:

$$\begin{aligned}
 m_p \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = & \mathbf{F}_{i,\text{aerodinamik}} \\
 & + \mathbf{F}_{i,\text{gravitatsiya}} \\
 & + \mathbf{F}_{i,\text{to'qnashuv}}
 \end{aligned}$$

Здесь:

- m_p - масса частицы,
- $\mathbf{v}_i$ - вектор скорости i -й частицы.

В этом уравнении наиболее важной и сложной частью являются аэродинамические силы ($\mathbf{F}_{i,\text{аэродинамическая}}$). Основные силы, воздействующие на одну частицу в модели Эйлера-Лагранжа, представлены на следующей схеме.

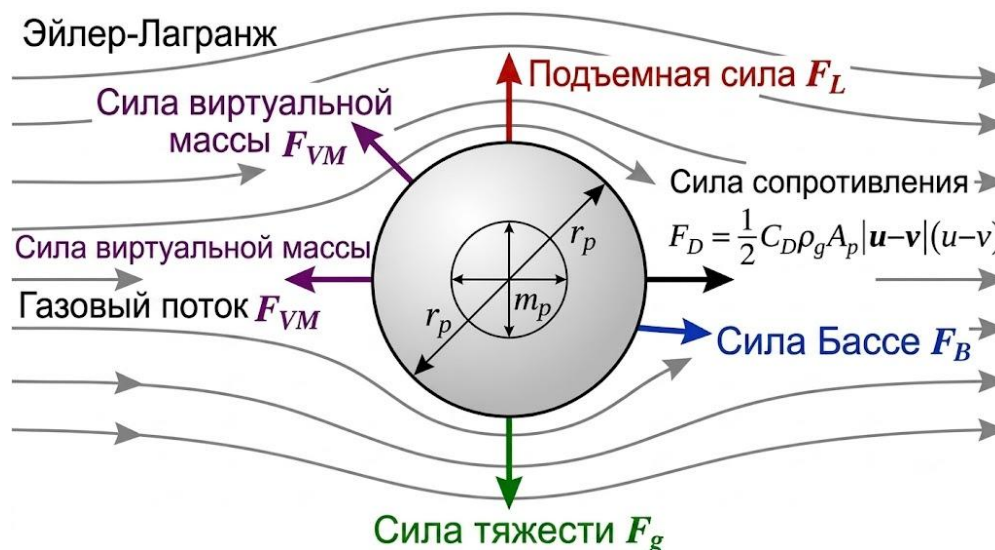


Рис. 1. Схема аэродинамических сил, учитываемых в уравнении движения частицы. Здесь показаны сила драга (сопротивления), подъемная сила, силы виртуальной массы и Бассе, а также сила тяжести и сила Магнуса, возникающая в результате

вращения частицы, воздействующие на одну сферическую частицу со стороны газового потока.

Подробное описание этих сил представлено в табл. 1.

Таблица 1. Основные аэродинамические силы, воздействующие на частицу, и их описание

Название силы	Символ	Основной механизм действия	Основной параметр математической модели
Сила сопротивления	F_D	Основная движущая или тормозящая сила, возникающая из-за разницы относительных скоростей между газом и частицей.	Коэффициент сопротивления, число Рейнольдса ($R_{земля}$)
Подъемная сила	F_L	Сила, возникающая из-за градиента скорости газового потока или вращения частицы (например, сила Магнуса, сила Саффмэна).	Коэффициент подъемной силы, скорость вращения (ω)
Сила виртуальной массы	F_{VM}	Сила, затрачиваемая на ускорение газа вокруг частицы при ее ускорении. Эта сила важна, когда плотность газа близка к плотности частицы.	Коэффициент виртуальной массы (C_{VM})
Сила Бассе (историческая)	F_B	Сила, связанная с развитием пограничного слоя на поверхности частицы из-за ее прошлого ускорения и "эффектом памяти".	Интеграл Бассе, временной шаг
Сила градиента давления	F_p	Сила, возникающая в результате неравномерного распределения давления вокруг частицы.	Градиент давления (∇p)

Последствия аэродинамических взаимодействий.

Аэродинамические взаимодействия определяют динамику потоков

газ-твердое тело. Эти взаимодействия можно разделить на три основных типа [8].

Прямые взаимодействия (первый тип: газ -> частица). Это влияние газового потока на траекторию частиц. Сила сопротивления заставляет частицы двигаться вместе с газовым потоком. Маленькие и легкие частицы быстро воспринимают турбулентность газа и рассеиваются под ее воздействием (турбулентная диффузия). Крупные же частицы из-за своей инерции меньше реагируют на мелкомасштабные турбулентные структуры газа [9]. Подъемная сила заставляет частицы двигаться к стенкам трубы или отклоняться от оси потока в соответствии с механизмами вращения.

Обратные взаимодействия (второй тип: частица -> газ). Это влияние частиц на газовый поток и его турбулентность. В модели Эйлера-Лагранжа это учитывается через источниковый член S_M (учет силы сопротивления). Когда частицы входят в поток, они поглощают часть энергии газа через силу сопротивления, что может привести к затуханию турбулентности газа. Однако, если частицы крупные и их концентрация высока, "следы" за частицами и взаимодействие между ними дезорганизуют газовый поток, то есть усиливают турбулентность [10]. Это явление называется "Модуляция турбулентности", и его последствия показаны на следующем графике.

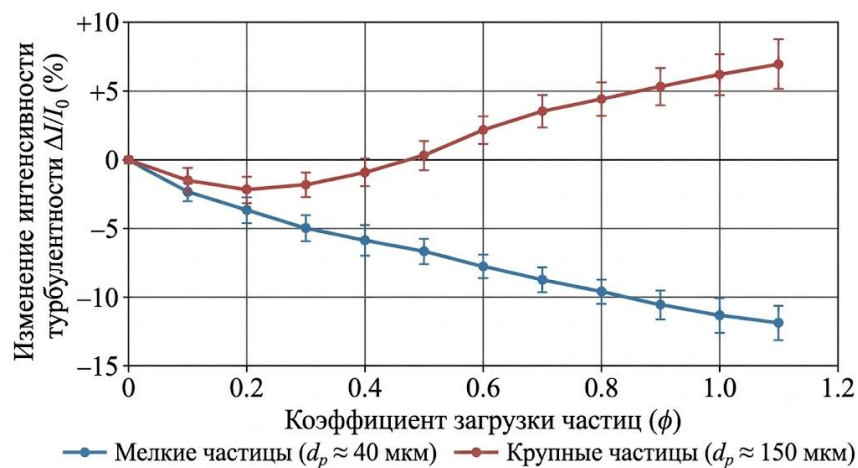


График 1. Влияние коэффициента загрузки частиц (ϕ) на интенсивность турбулентности газовой фазы ($\Delta I/I_0$).

На графике показано, согласно результатам симуляции Эйлера-Лагранжа, что мелкие частицы (синяя линия) ослабляют турбулентность, а крупные частицы (красная линия) усиливают ее. Этот эффект усиливается с увеличением коэффициента загрузки [11].

Взаимодействия четвертого типа (частица $\leftrightarrow$ частица).

Это столкновения частиц друг с другом и их взаимное аэродинамическое влияние. В модели Эйлера-Лагранжа при высокой концентрации частиц ($\alpha_p > 10^{-4}$) столкновения могут полностью изменить динамику потока [12]. Для этого метод дискретных элементов или модель случайных столкновений объединяются с моделью Эйлера-Лагранжа. Столкновения увеличивают дисперсию частиц и делают их распределение вдоль потока неравномерным. Также крупные частицы могут "собираться", образуя кластеры, что увеличивает их эффективную инерцию.

Методы исследования. Для использования модели Эйлера-Лагранжа требуются современные программы численного моделирования (такие как Ansys Fluent, OpenFOAM, MFiX) и мощная компьютерная техника. Процесс моделирования состоит из нескольких этапов:

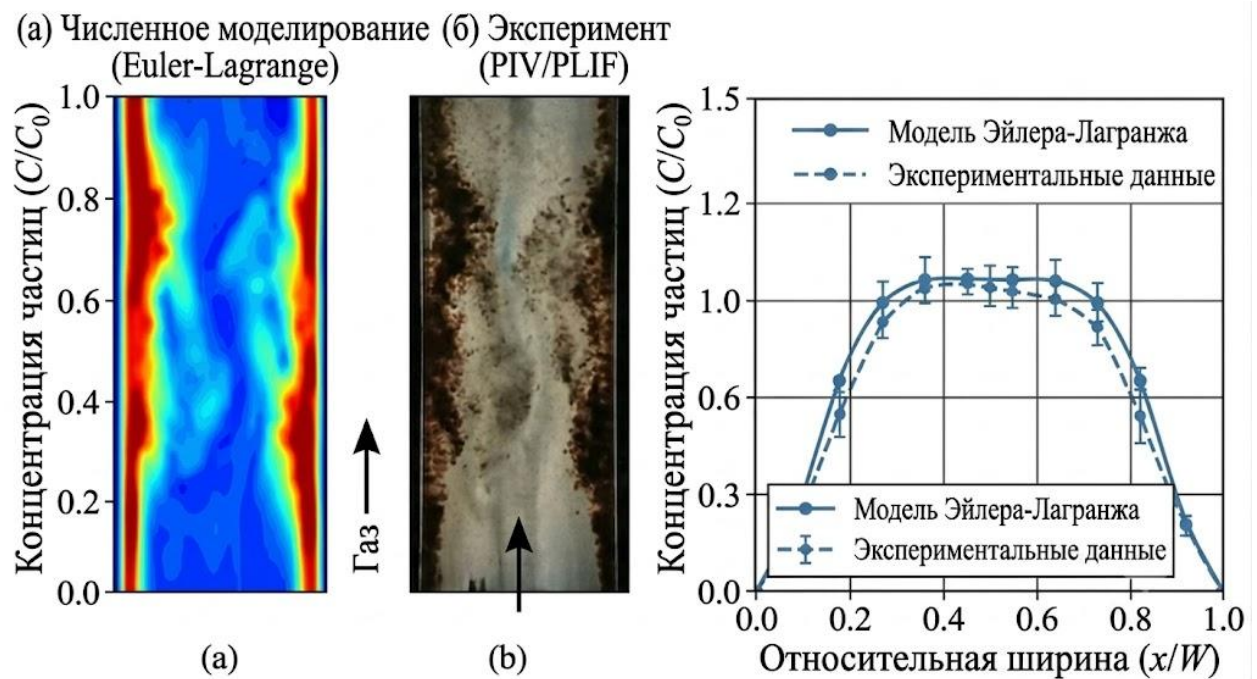


Рис. 2. Экспериментальные апробации (валидации) модели Эйлера-Лагранжа. (а) Цветной контур профиля концентрации частиц в вертикальной трубе, полученный с помощью численной симуляции. (б) Фотография велосиметрии изображений частиц, полученная в ходе эксперимента при тех же условиях. Снизу показано сравнение симуляции (Эйлер-Лагранж) и экспериментальных данных по профилю концентрации частиц. Соответствие на графике показывает точность модели [14].

1. Создание геометрии потока и расчетной сетки.
2. Определение физических свойств частиц и газа (плотность, распределение по размерам, вязкость).
3. Выбор моделей аэродинамических сил (сопротивления), подъемной, столкновений).
4. Установка граничных условий.
5. Выполнение численных расчетов.

6. Визуализация и анализ результатов [13]. Для обеспечения надежности

результатов исследования апробация (применение) модели является наиболее важным этапом. В проведенных исследованиях для апробации модели Эйлера-Лагранжа используются следующие методы.

Процесс велосиметрии изображений частиц позволяет оценить, насколько правильно модель отражает различные аэродинамические силы и взаимодействия [15].

Заключение

В данной статье на основе существующих результатов исследований проанализированы роль и значение модели Эйлера-Лагранжа в оценке сложных аэродинамических взаимодействий в системах двухфазных потоков газ-твердое тело. Показано, что подход Эйлера-Лагранжа является мощным инструментом, позволяющим определять траекторию движения каждой частицы, ее взаимодействие с газовым потоком, другими частицами и стенками с помощью численных методов. Приведенные в тексте таблицы, схемы и графики помогли визуализировать сложные механизмы аэродинамических сил, таких как сопротивление, подъемная, воздействующих на частицы, а также влияние частиц на турбулентность газовой фазы. Ослабление турбулентности мелкими частицами и ее усиление крупными частицами, а также образование кластеров частиц входят в число важных явлений, выявленных с помощью симуляции Эйлера-Лагранжа.

Процесс апробации (применение) модели показал хорошее соответствие численных результатов экспериментальным данным, что подтверждает надежность модели Эйлера-Лагранжа как инструмента для оптимизации промышленных процессов и решения экологических проблем. Будущие исследования, вероятно, будут направлены на повышение точности моделирования взаимодействий четвертого типа для потоков с более высокой концентрацией частиц.

Список литературы

1. Crowe C.T., Schwarzkopf J.D., Sommerfeld M. & Tsuji Y. (2011). Multiphase flows with droplets and particles. CRC press.
2. Kleinstreuer C. (2017). Two-phase flow: theory and applications. Taylor & Francis Group.
3. Balachandar S. & Eaton J.K. (2010). Turbulent dispersed multiphase flow. Annual review of fluid mechanics, 42, 111-133.
4. Fox R.O. (2012). Computational models for turbulent reacting flows. Cambridge University Press.
5. Maxey M.R. & Riley J.J. (1983). Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow. The Physics of Fluids, 26(4), 883-889.
6. Mei R. (1992). An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite Reynolds number. International Journal of Multiphase Flow, 18(1), 145-147.
7. Parmar M., Haselbacher A. & Balachandar S. (2011). Modeling generalized Basset force on a sphere. Physical Review E, 84(6), 066311.

8. Sommerfeld M. (1992). Modelling of particle-wall collisions in confined gas-particle flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 18(6), 905-926.
9. Zhu H.P., Zhou Z.Y., Yang R.Y. & Yu A.B. (2007). Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, 62(13), 3378-3396.
10. Eaton J.K. & Fessler J.R. (1994). Preferential concentration of particles by turbulence. *International Journal of Multiphase Flow*, 20, 169-209.
11. Hetsroni G. (1989). Particles-turbulence interaction. *International Journal of Multiphase Flow*, 15(5), 735-746.
12. Tsuji Y., Kawaguchi T. & Tanaka T. (1993). Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed. *Powder technology*, 77(1), 79-87.
13. Morsi S.A. & Alexander A.J. (1972). An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 55(2), 193-208.
14. Guha A. (2008). Transport and deposition of particles in turbulent and laminar flow. *Annual review of fluid mechanics*, 40, 311-341.
15. Vreman A.W. (2015). A direct numerical simulation study of the two-way interaction between turbulence and particles. *International Journal of Multiphase Flow*, 68, 127-134.
16. Панферова, И. В. (2024). Организационные изменения в контексте модернизации современной школы. *Экономика и социум*, (12-2 (127)), 1378-1382.
17. Irina, P. (2019). Conceptualization of the Components of the Psycholinguistic Aspect of Foreign Language Acquisition. *European Journal of Research and Reflection in Educational Sciences* Vol, 7(12).

18. Panferova, I. V., & Dusimbetova, N. B. (2019). Integration of linguistic and didactic issues in the language acquisition process. Молодой ученый, (43), 269-270.