

# Эйлер–Эйлерова модель динамики дисперсной среды в нижней части лифт-реактора

Козлова А.Ю.\*, Михайленко К.И.\*\*

\*Уфимский университет науки и технологий, Уфа

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

## 1. Введение

В современной химической промышленности многофазные реакторы с подвижным слоем гранулированных катализаторов широко применяются, несмотря на их сложные и недостаточно изученные гидродинамические характеристики. Особенно сложным является переход от лабораторных исследований к промышленному оборудованию, так как связан в том числе с проблемой масштабирования. В связи с этим достаточно часто возникает необходимость моделирования двухфазной дисперсной среды, чтобы лучше понять и оптимизировать процессы, связанные с обсуждаемыми системами [1, 2].

Вычислительная гидродинамика (CFD – Computational Fluid Dynamics) наиболее подходящий инженерный инструмент для прогнозирования потоков в различных типах устройств в промышленных масштабах. Следует отметить, что несмотря на то, что инструменты для моделирования однофазной среды широко доступны, исследование многофазных потоков все еще является сложным как с физической, так и с вычислительной точек зрения. Более того, экспериментальная проверка многофазных CFD-моделей все еще находится в зачаточном состоянии, поскольку и моделирование и эксперимент требуют много времени, в связи с чем надежные прогнозы поведения многофазных сред в крупномасштабном оборудовании получить нелегко [3].

## 2. Математическая модель

При моделировании многофазных процессов с участием дисперсной среды можно выделить два основных подхода. Модель Эйлера–Лагранжа (ЭЛ), когда уравнения динамики неразрывной фазы записываются в Эйлеровой системе отсчета, а частицы дисперсной фазы — в Лагранжевой системе отсчета. Модель Эйлера–Эйлера (ЭЭ) исходит из предположения, что каждая фаза может быть описана с использованием уравнений в Эйлеровом представлении. Преимущество ЭЛ подхода заключается в том, что мы можем отслеживать траекторию отдельных частиц, их взаимодействия, изменения размеров каждой частицы и т.д. Однако с другой стороны, такое моделирование требует значительных вычислительных ресурсов, тем больших, чем больший масштаб модели необходимо описывать. В случае ЭЭ системы, дисперсная фаза описывается на основе уравнений неразрывной среды с введенными дополнительными ограничениями. С одной стороны, такой подход в значительной степени упрощает вычислительный процесс [4], но при этом и ограничивает в возможностях моделирования изменений отдельных частиц в рамках дисперсной среды.

В представленной работе использована ЭЭ (континуальная) модель динамики двухфазных сред, где обе фазы рассматриваются как непрерывные, взаимопроникающие и описываются усредненными уравнениями сохранения. Процесс усреднения в контексте данного исследования вводит в рассмотрение фазовую переменную  $\alpha_k$ , которая представляет собой вероятностную характеристику присутствия определенной фазы в конкретный момент времени и пространственной точке [5].

Основные уравнения континуальной модели для несущей и дисперсной фаз могут быть представлены в следующем виде:

— уравнение неразрывности для несущей среды:

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k) = 0$$

— уравнение неразрывности для дисперсной среды:

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot U_k \alpha_k \rho_k + \nabla \cdot (U_m \alpha_k \rho_k (1 - \alpha_k)) = 0$$

— уравнение импульсов (одинаково для обеих фаз):

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k U_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k U_k) = -\nabla \cdot (\alpha_k \tau_k) - \alpha_k \nabla p + \alpha_k \rho_k g$$

$$\sum_k \alpha_k = 1.0 \quad \rho_m = \sum_k \alpha_k \rho_k \quad U_m = \frac{\sum_k \alpha_k \rho_k U_k}{\rho_m}$$

где  $\alpha_k$  — объемная доля каждой фазы;  $\rho_k$  — плотность  $k$ -той фазы;  $U_k$  — скорость фазы;  $\tau_k$  — тензор вязких напряжений;  $p$  — термодинамическое давление;  $g$  — ускорение свободного падения.

### 3. Двумерная сетка и граничные условия

В настоящей работе нижняя часть лифт-ректора описывается двумерной областью, моделирующей трубу длиной 2 м и диаметром 0.15 м, в которой может быть организован дополнительный подвод гранулированной среды из бокового наклонного патрубка.

В качестве инструмента для решения поставленной задачи выбран пакет прикладных программ OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox — пакет программ для операций и манипуляций с полями с открытым исходным кодом). OpenFOAM — свободно распространяемая открытая интегрируемая платформа вычислительной гидродинамики для операций с полями (скалярными, векторными и тензорными) [6, 7]. Хотя пакет OpenFOAM представляет собой библиотеку инструментов для дискретизации и решения произвольных систем уравнений в частных производных, он также имеет в своем составе и достаточно обширное множество решателей для относительно стандартных задач. Для рассматриваемой задачи в текущей постановке достаточным является решатель, для моделирования двухфазного потока в континуальном приближении twoPhaseEulerFoam. Указанный решатель для системы двух сжимаемых фаз, одна из которых является дисперсной. Обе фазы описываются с использованием уравнений сохранения Эйлера, представленных выше.

В текущей двумерной постановке конечно-объемной сетке, которая описывает область нижней части лифт-реактора, уделяется относительно небольшое внимание. Однако принципы ортогональности и равномерности конечных объемов, необходимые для снижения вычислительной погрешности [8], соблюдены при построении данной сетки.

В задаче приняты следующие граничные условия. Справа и слева — условия прилипания для воздуха и проскальзывания для гранулированной среды. На нижней границе заданы расход с постоянной скоростью для несущей среды и условие непротекания для гранулированной. На верхней границе задано условие протекания для обеих фаз.

### 4. Результаты

В проведенных вычислительных экспериментах, представленных ниже, каждом случае в начальный момент задано распределение концентрации гранулированных частиц  $\alpha = 0.3$  в нижней половине моделируемой области. Рассмотрены два случая. В первом подача воздуха осуществляется с постоянной скоростью 3 м/с, во втором — 5 м/с.

На Рис. 1 и 2 показано распределение концентрации гранулированной среды для обоих рассматриваемых постановок в одинаковые моменты времени.

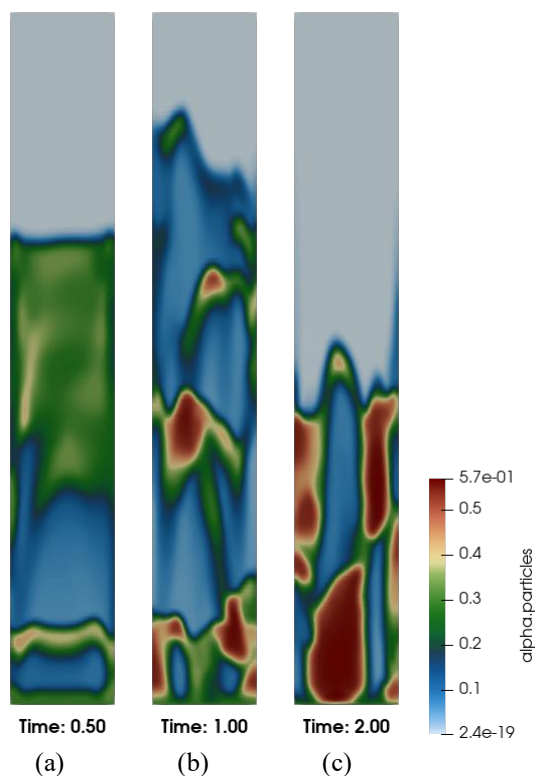


Рис. 1. Распределение концентрации гранулированных частиц в моменты времени (a) – 0.5 с, (b) – 1.0 с, (c) – 2.0 с при скорости подаваемого воздуха 3 м/с

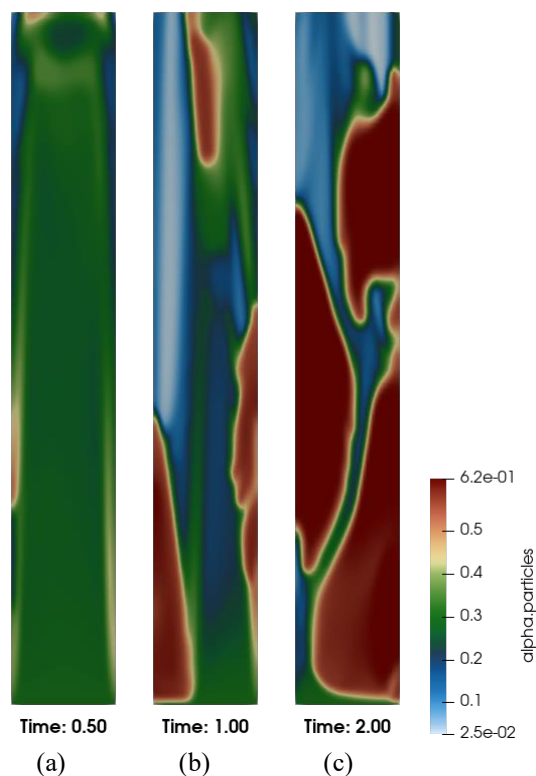


Рис. 2. Распределение концентрации гранулированных частиц в моменты времени (a) – 0.5 с, (b) – 1.0 с, (c) – 2.0 с при скорости подаваемого воздуха 5 м/с

Из Рис. 1. можно заключить, что при недостаточном расходе несущей фазы не возникает подъемного течения гранулированной среды и, как следует из распределения концентрации, возникает псевдооживленный слой.

Рис. 2. демонстрирует, что при достаточном расходе воздуха возникает искомое подъемное течение гранулированной среды. Однако следует отметить, что для штатной работы нижней части лифт-реактора при таком подъемном течении необходимо равномерное распределение (перемешивание) несущей фазы и гранулированной среды. В то же время, на Рис. 2 можно видеть расслоенное течение, подобное показанному в работе [1]. Таким образом, расчёт с использованием более сложной модели и подробной сетки не опровергает сделанные ранее выводы.

## 5. Заключение

В представленной работе рассмотрена двумерная модель нижней части лифт-реактора без подачи гранулированной среды через боковой ввод. Показано, что возможность подъема гранулированной среды и характер смешивания с потоком несущей фазы определяется, в частности, скоростью несущей фазы.

Проведено сравнение с ранее полученными результатами, показано качественное сходство с ними. Дальнейшее развитие данной работы предполагает исследования при наличии постоянной подачи гранулированной среды, а также трехмерной постановки модели исследуемого устройства.

## Список литературы

- [1] Михайленко К.И., Везиров Р.Р., Ахатов И.Ш., Урманчеев С.Ф. Численное моделирование течения мелкодисперсного катализатора в канале лифт-реактора // Нефтепереработка и нефтехимия. 1997. № 12. С. 17–20.
- [2] Урманчеев С.Ф., Киреев В.Н., Ильясов А.М., Михайленко К.И. К исследованию гидродинамических особенностей процессов переработки нефти // Башкирский химический журнал. 2000. Т. 7, № 5. С. 66–72.
- [3] Brennen С.Е. Fundamentals of Multiphase Flows. Cambridge University Press. 2005. 410 p.
- [4] Михайленко, К.И., Валеева Ю.Р. Моделирование осаждения мелкодисперсной взвеси из воздуха при прохождении волн давления // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14, № 3. С. 328–333.
- [5] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. В 2 ч. М.:Наука. 1987. 464 с., 360 с.
- [6] Нуриев А.Н., Зайцева О.Н., Камалутдинов А.М., Жучкова О.С. Введение в компьютерное моделирование гидродинамических процессов в программном комплексе OpenFOAM: учебное пособие. Казань: Издательство Казанского университета. 2022. 84 с.
- [7] OPENFOAM® <https://openfoam.org/> (дата обращения 10.04.2024)
- [8] Mikhaylenko С.І. Building a finite-difference mesh and selecting a turbulence model for numerical simulations of a vortex tube in OpenFOAM software // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 167. 012021.