ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Д.В. Есипов, В.Н. Лапин, Д.С. Куранаков, Д.В. Чирков

Институт вычислительных технологий СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

Рассматриваются течения с дисперсными сферическими частицами большого размера и с высокой их объемной концентрацией. Такого рода течения возникают во многих технических и биологических системах. В случае если диаметр частиц относительно ширины канала мал, то существует ряд хороших модельных подходов. В этих подходах смесь представляется как вязкая жидкость, вязкость которой зависит от объемной концентрации частиц. Конкретные выражения для эффективной вязкости такой смеси могут быть получены путем осреднения влияния частиц на поток жидкости. В случае, если частицы имеют большие относительные размеры, влияние частиц на поток становится существенным и такие модельные подходы уже не годятся. Однако и в этом случае хотелось бы иметь упрощенное представление для смеси пусть и с более сложными реологическими соотношениями.

Авторами разработан эффективный метод прямого моделирования дисперсных течений, основанный на методе погруженной границы. Математическая модель состоит из уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости и набора уравнений движения и вращения для каждой из частиц. Считается, что жидкость занимает все пространство канала, включая место, занимаемое частицами. Наличие частиц в заданной точке пространства учитывается в уравнениях Навье-Стокса путем добавления специальной силы от погруженной границы. Эта сила вычисляется таким образом, чтобы приближенно удовлетворить условие прилипания на погруженной границе. Применяется схема с прямым вычислением силы, действующей на погруженную границу (в англоязычной литературе – direct forcing [1]).

Уравнения Навье-Стокса решаются методом SIMPLE на прямоугольной шахматно-разнесенной эйлеровой сетке. Набор уравнений движения и вращения частиц решается методом Рунге – Кутты. Границы частиц аппроксимируются подвижной лагранжевой сеткой с приблизительно равномерным распределением точек по поверхности частицы.

Столкновения частиц в жидкости между собой и со стенками канала моделируется на основе эмпирической модели для упругих частиц с малой диссипацией энергии при столкновениях. В зависимости от величины расстояния между частицами применяется три модели описания взаимодействия: гидродинамическое взаимодействие, связанное с поперечным течением жидкости из зоны будущего контакта, взаимодействие по модели мягкой сферы на малых расстояниях и взаимодействие по модели жесткой сферы на отрицательных расстояниях. Коэффициенты этих моделей подобраны так, чтобы характеристики до и после столкновения были согласованы с результатами экспериментов из [2]. Характерная картина дисперсного течения представлена на рис. 1.

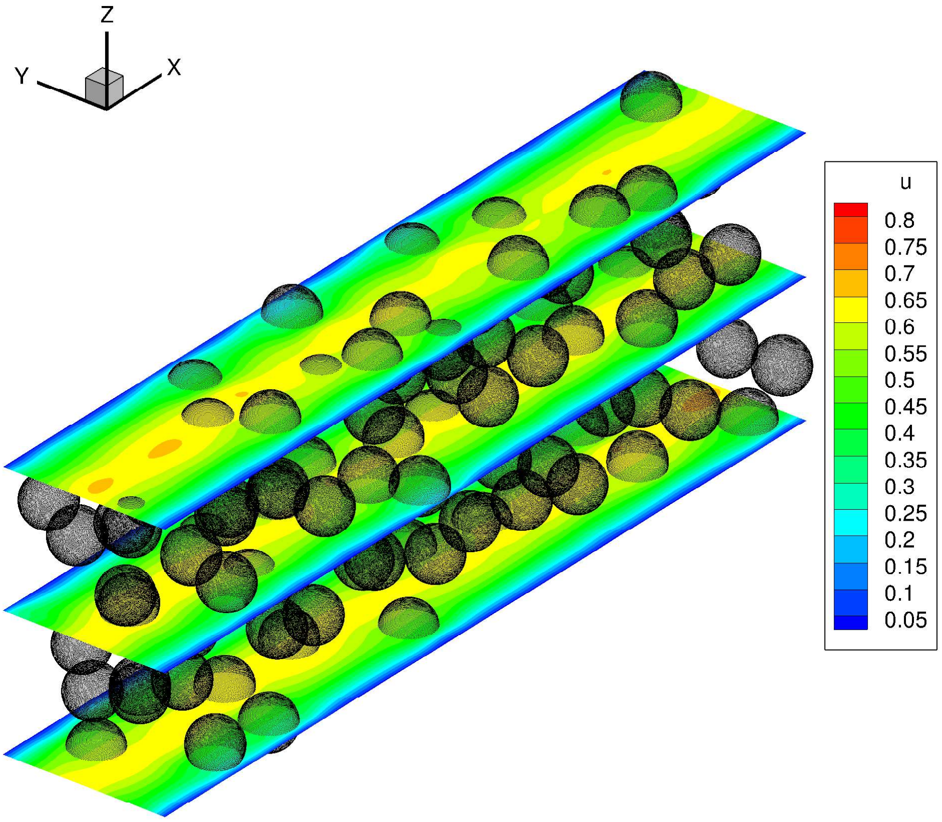

Рис. 1. Мгновенная картина течения вязкой несжимаемой жидкости со сферическими нейтрально-плавучими частицами d/W = 0.3 в плоском канале с размерами 5x1x2. Объемная концентрация частиц с = 0.15. Приведены распределения продольной скорости в трех сечениях продольных сечениях.

Для верификации разработанного метода был решен ряд тестовых задач: стационарное и нестационарное обтекание цилиндра и сферы, разгон частицы стационарным потоком жидкости, движение одиночной частицы в потоке Пуазейля (эффект Сегре – Зилберберга [3]). В последней задаче положение частицы определяется относительно малой разностью вязких и инерционных сил, вызванных вращением частицы. Эта величина на порядок меньше сил, вызываемых движением жидкости, в связи с чем определение равновесного положения частицы поперек канала затруднительно с вычислительной точки зрения. С помощью разработанного метода удалось определить равновесное положение сферической частицы с точностью несколько процентов от ширины канала.

Далее было проведено моделирование дисперсных течений. Такие течения определяются 4 параметрами: числом Рейнольдса невозмущенного частицами течения Re, относительным диаметром частиц d/W, числом плавучести Bu, характеризуемым разницей плотностей частиц и жидкости и объемной концентрацией частиц с. В расчетах рассматривались течения с высокой объемной концентрацией частиц $c \geq 0.15$. На свободных концах канала задавались условия периодичности скорости и давления. Между входным и выходным сечениями задавался дополнительный перепад давления. Этот перепад давления приводит к движению смеси, и подводимая таким образом энергия рассеивается вязким трением в жидкости и диссипацией при столкновении частиц. В случае если частица достигает выходное сечение канала, она переносится на входное сечение канала с сохранением ее поступательной скорости и скорости вращения. Для различных значений параметров, определяющих течение, были рассчитаны мгновенные профили скорости. Затем эти профили осреднялись как по времени, так и по пространству. Вычисленные осредненные профили скорости для различных объемных концентраций частиц сравнивались с результатами, полученными по формуле Марона – Пирса [4]. Установлено, что рассчитанный расход смеси выше, чем по формуле Марона – Пирса.

Таким образом, настоящая работа призвана с помощью моделирования улучшить понимание процессов, сопровождающих дисперсные течения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-71-20139).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Uhlmann M.** An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows // J. Comput. Phys. 2005. Vol. 209(2). P. 448-476.
2. **Brenner H.** The slow motion of a sphere through a viscous fluid towards plane surface // Chem. Eng Sci. 1961. Vol. 16. P. 242-251.
3. **Segre G., Silberberg A.** Behavior of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow // J. Fluid Mech. 1962. Vol. 14. P. 136-157.
4. **Maron M.H., Pierce P.E.** Application of ree-eyring generalized flow theory to suspensions of spherical particles // J. Colloid Sci. 1956. Vol. 11(1). P. 80-95.