

# Трехмерная численная модель течений вязкой несжимаемой жидкости с частицами произвольной формы

**АВТОРЫ:** к.ф.-м.н. Есипов Д.В., к.ф.-м.н. Чирков Д.В., к.ф.-м.н. Лапин В.Н., Куранаков Д.С.

Разработана численная модель течений вязкой жидкости с частицами в каналах произвольной геометрической формы. Математическая модель включает в себя систему уравнений Навье – Стокса для описания течения жидкости, набор систем уравнений движения и вращения частиц и подмодель столкновения частиц между собой и со стенками канала. Численный метод основывается на комбинации улучшенного SIMPLE алгоритма и метода погруженной границы для решения уравнений Навье – Стокса, а также метода дискретных элементов для определения движения частиц и описания их столкновений. Модель позволяет непосредственно рассчитывать движение каждой частицы и все характеристики течения (рис. 1).

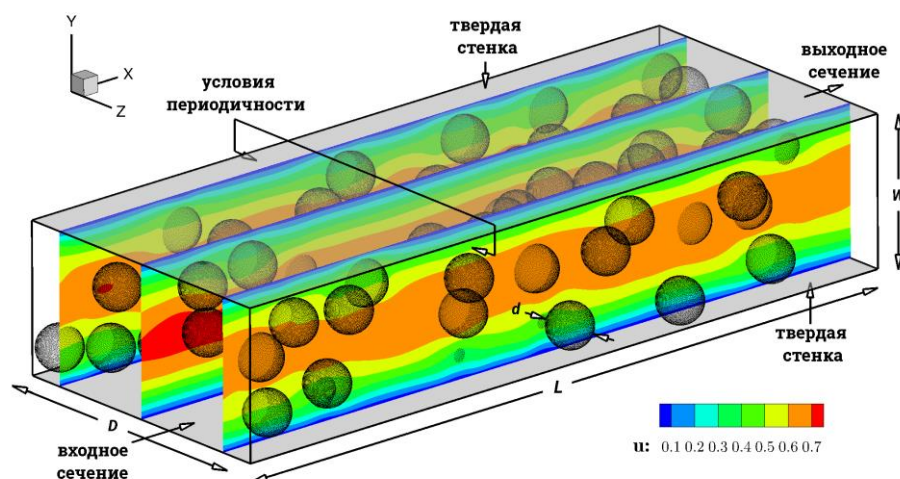


Рис. 1. Постановка задачи и мгновенная картина течения для сферических частиц с объемной концентрацией  $c = 0.07$ . Цветом обозначена безразмерная величина продольной скорости в трех сечениях

С помощью разработанной численной модели исследован перенос одиночной сферической частицы течением вязкой несжимаемой жидкости в круглой трубе. Частица вращается и постепенно занимает равновесное положение между стенкой и осью трубы (эффект Сегре – Зильберберга). При этом сила Саффмана, которая является причиной этого эффекта, на 3–4 порядка меньше других сил, влияющих на движение частицы. Результаты расчетов хорошо согласуются (рис. 2) с экспериментальными данными (Segre(1962)) и результатами расчетов с использованием других постановок и численных методов. Впервые детально исследован эффект Сегре – Зильберберга для плоского канала [1]. Установлено, что с увеличением числа Рейнольдса  $Re$  частица занимает устойчивое положение более близкое к стенке. Обнаружено, что при  $Re = 500 - 2000$  частица может занимать еще одно устойчивое равновесное положение – ближе к центру канала.

Выполнены расчеты переноса сферических частиц течением жидкости в плоском канале [2,3]. Исследована зависимость вязкости получающейся суспензии от объемной концентрации частиц  $c$ . Установлено, что при отсутствии сухого трения между частицами вязкость суспензии  $\mu$  слабо зависит от величины диаметра  $d$  частиц и подчиняется закону Кригера – Догерти с показателем  $n = 1$ :

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{c}{c^*}\right)^n,$$

где  $\mu_0$  – вязкость чистой жидкости,  $c^*$  – объемная концентрация плотной упаковки частиц.

Разработанная численная модель найдет применение для прямого моделирования дисперсных течений, а также конструирования новых и усовершенствования существующих микрофлюидных устройств.

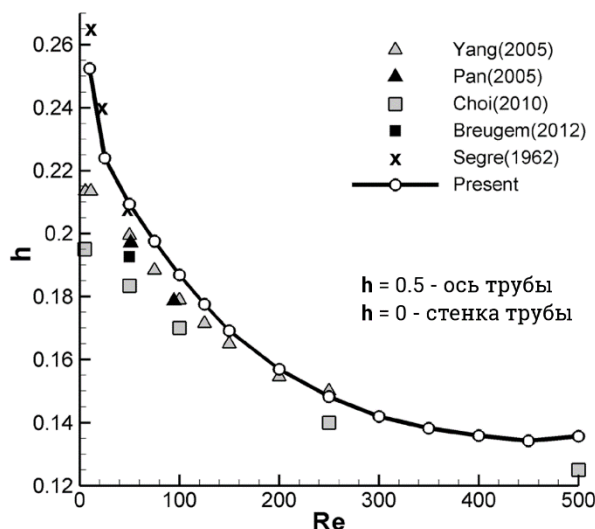


Рис. 2. Равновесное положение центра сферической частицы нейтральной плавучести диаметра  $d = 0.15$  от стенки круглой трубы в зависимости от числа  $Re$

Результат получен в рамках выполнения проекта РНФ № 17-71-20139 «Разработка математических моделей переноса и оседания пропанта и их применение в моделировании процесса гидроразрыва».

## ПУБЛИКАЦИИ:

1. Esipov, D.V., Chirkov, D.V., Kuranakov, D.S., Lapin, V.N. Direct numerical simulation of the Segre-Silberberg effect using Immersed boundary method // Journal of Fluids Engineering. 2020. Vol. 142. Iss. 11. Art. No. 111501. – WoS. Scopus. IF = 2.056.
2. Esipov, D.V., Lapin, V.N., Kuranakov, D.S., Chirkov, D.V. Direct numerical simulation of viscous incompressible flow with spherical particles in the flat channel // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1404, Iss. 1. 16th All-Russian Seminar with International Participation on Dynamics of Multiphase Media. Art. No. 012017. – Scopus.
3. Есипов Д.В., Лапин В.Н., Куранаков Д.С., Чирков Д.В. Численное моделирование дисперсных течений в плоском канале методом погруженной границы // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. Т. 2: Механика жидкости и газа. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. С. 1012-1014.