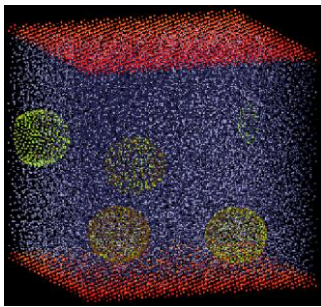


# Исследование реологических свойств суспензий на основе моделирования методом динамики частиц

П. А. Поцелуев

научный руководитель: к. ф.-м. н., доц. каф. «Теоретическая механика» В. А. Кузькин

- Разработана математическая модель смеси проппант-жидкость на основе метода динамики частиц
- На основе математической модели написан комплекс программ на языке C++, позволяющий моделировать течение смеси проппант-жидкость
- Предложен способ определения эффективной вязкости смеси в зависимости от концентрации проппанта
- Проведено моделирование течения смеси в канале постоянного сечения при объемных концентрациях проппанта до 25%. При низких концентрациях определена зависимость эффективной вязкости смеси от концентрации проппанта
- Проведено сравнение с аналитическими решениями (формулами для эффективной вязкости, предложенными Эйнштейном и Качановым)
- Исследована сходимость решения по числу частиц при некоторых значениях концентрации проппанта



Метод динамики частиц основан на моделировании среды совокупностью взаимодействующих частиц, для которых записываются классические уравнения динамики.

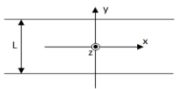
$m_i \dot{\mathbf{v}}_i = \sum_j \mathbf{F}_{ij} + m_i \mathbf{g}$  Взаимодействие частиц описывалось посредством потенциала Леннард-Джонса

Сила взаимодействия рассчитывалась по формуле

$$U(r) = D \left[ \left( \frac{a}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{a}{r} \right)^6 \right]$$

$$\mathbf{F}_{ij} = \frac{12Dk(r_{ij})}{a^2} \left( \left( \frac{a}{r_{ij}} \right)^{14} - \left( \frac{a}{r_{ij}} \right)^8 \right) \mathbf{r}_{ij}, \quad \mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$$

$$k(r) = \begin{cases} 1, & r < b, \\ 1 - \left( \frac{r^2 - b^2}{a_{cut}^2 - b^2} \right)^{2 \cdot 2}, & b \leq r \leq a_{cut}, \\ 0, & r > a_{cut} \end{cases}$$



Для вычисления вязкости смеси проводилось моделирование течений Пуазейля и Куэтта в плоском канале

## течение Пуазейля

параболический профиль скорости

$$v(y) = \frac{\rho f}{2\mu} \left( \left( \frac{L}{2} \right)^2 - y^2 \right)$$

вязкость

$$\mu = \frac{\rho f L^2}{12 < v >}$$

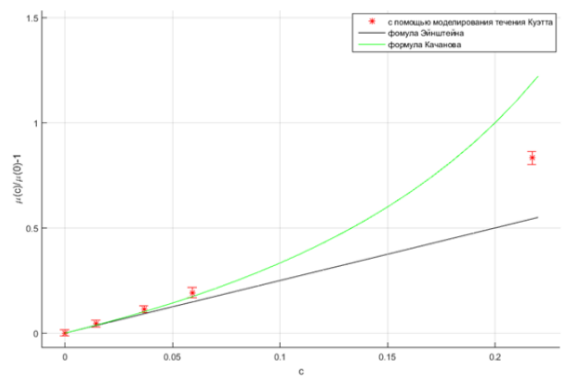
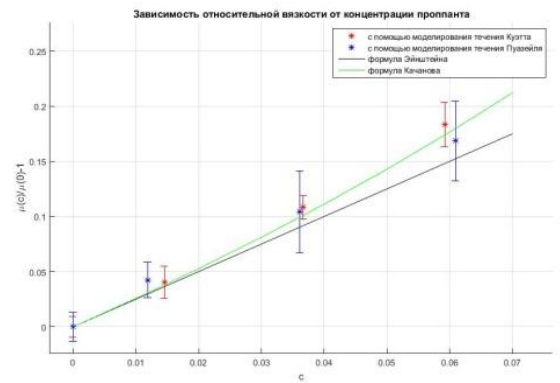
## течение Куэтта

линейный профиль скорости

$$v(y) = \frac{2u}{L} y$$

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} = \mu \frac{2u}{L}$$

$$\mu = \frac{\tau L}{2u} = \frac{F_{wall} L}{2uS}$$



## Аналитические формулы для вязкости

$$\frac{\mu(c)}{\mu(0)} = Ac + 1$$

формула Эйнштейна

(получены

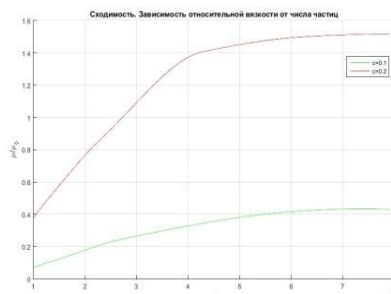
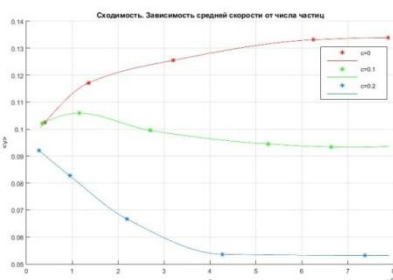
в приближении

невоздействия)

$$\frac{\mu(c)}{\mu(0)} = \frac{1}{1 - Ac}$$

[A=2.5 для 3D пространства]

формула Качанова



Линейная (в пределах погрешности) зависимость скорости установившегося течения Пуазейля от величины, пропорциональной внешней силе, подтверждает, что смесь при рассмотренных концентрациях является ньютоновской жидкостью

