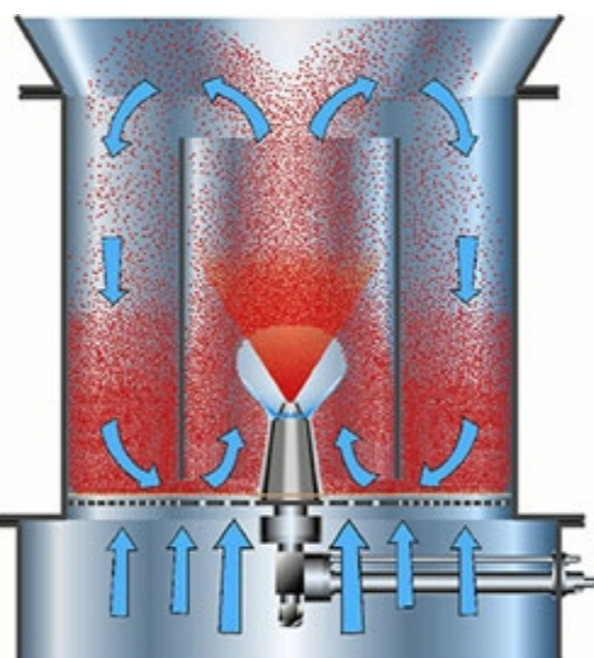


# Моделирование движения частиц кипящего слоя методом дискретных элементов

## Введение

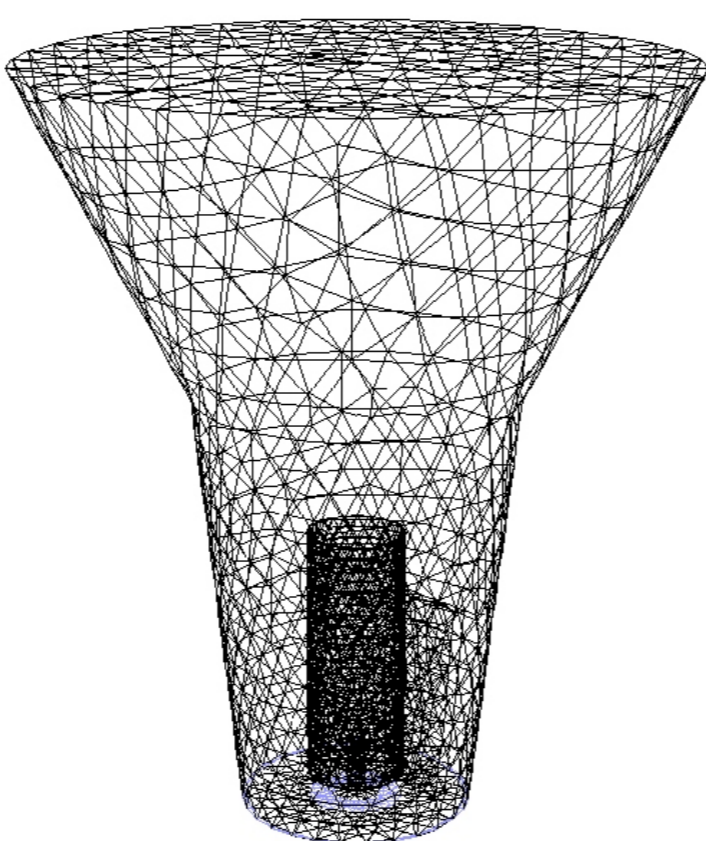
Аппараты кипящего слоя применяются в работе с сыпучим материалом в различных сферах промышленности и используются для нанесения покрытия на частицы, их транспортировки, сушки и гранулирования. В основе лежит эффект псевдооживления массы частиц при прохождении сквозь нее потока газа.

В аппарате Вурстера область нанесения покрытия на частицы и область сушки разделены цилиндрической трубой, при этом между нижней кромкой трубы и дном аппарата остается зазор, что позволяет частицам совершать периодическое движение.



## Постановка задачи

Движение газа рассчитывается из уравнений Навье-Стокса с учетом пористости ( $\epsilon$ ) ячеек сетки конечных объемов и силового воздействия частиц ( $\mathbf{S}$ ). Используется k- $\epsilon$  модель турбулентности.



$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{g} - \mathbf{S}$$

Траектории частиц устанавливаются путем интегрирования уравнения движения.

$$m \ddot{\mathbf{r}} = (\rho_f V_p \mathbf{g} + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_{Cont})$$

где  $\mathbf{F}_D$  - сила лобового сопротивления,  $\mathbf{F}_{Cont}$  - контактная сила взаимодействия.

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{2} C_D \rho_f A_p (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p) |\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p|$$

$$\mathbf{F}_{Cont} = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_n^d + \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_t^d$$

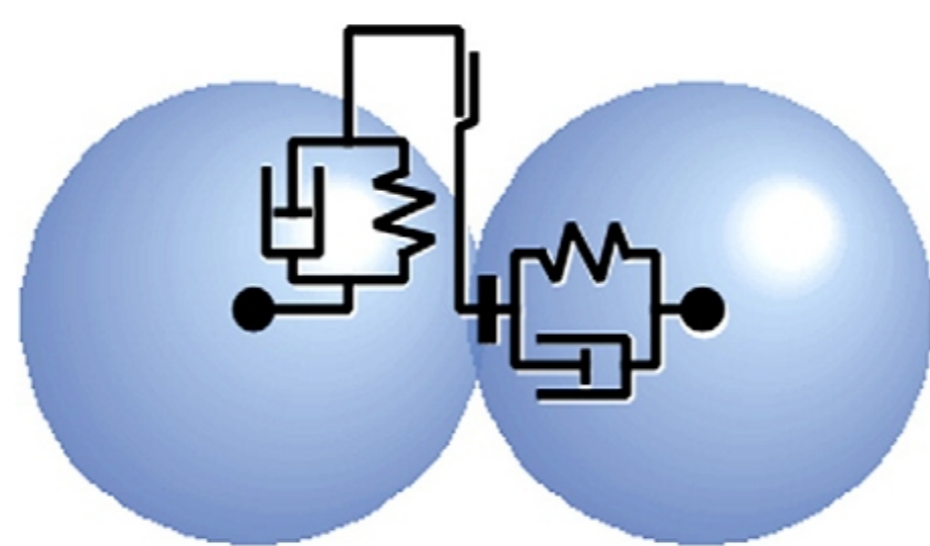
Для контактной силы взаимодействия отдельно рассчитывается нормальная и касательная составляющие, имеющие диссипативные слагаемые.

$$F_n = \frac{4}{3} \hat{E} \sqrt{R_n}^{1.5}$$

$$F_n^d = 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e}} \sqrt{S_n} \hat{m} \mathbf{v}_n^{rel}$$

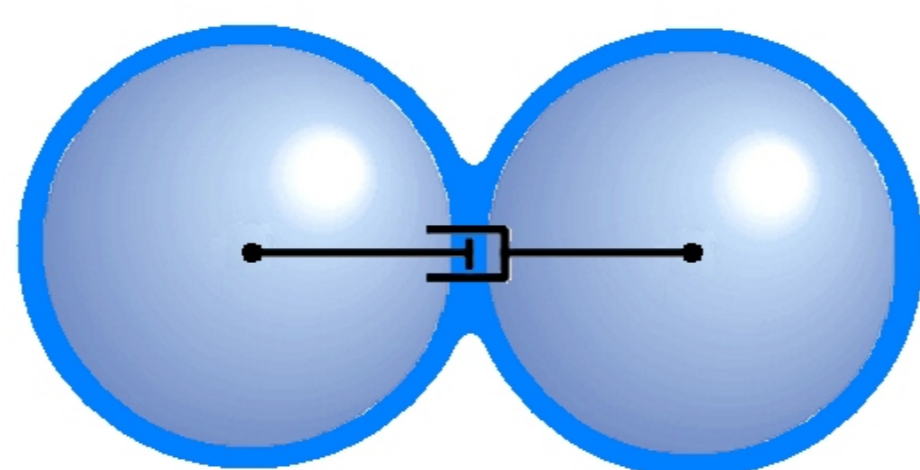
$$F_t = \min(S_t; F_n)$$

$$F_t^d = 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e}} \sqrt{S_t} \hat{m} \mathbf{v}_t^{rel}$$



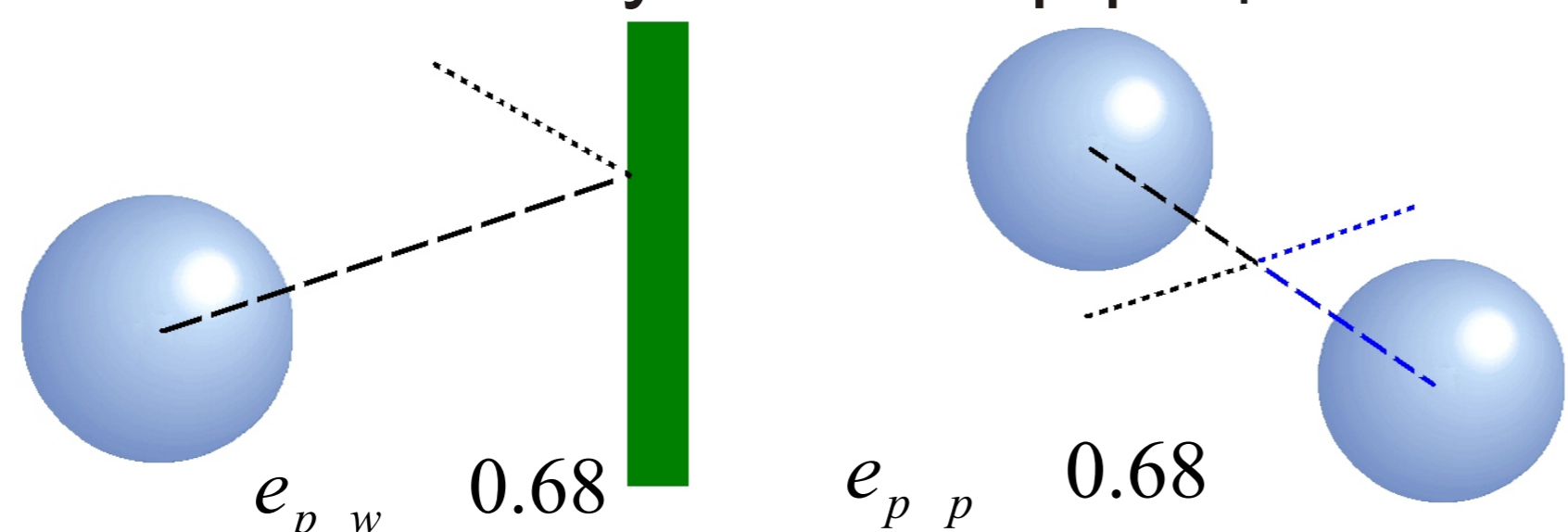
В случае наличия жидкости на поверхности частиц появляется дополнительная вязкая составляющая нормальной силы.

$$\mathbf{F}_{vis} = \frac{3}{2} \frac{R_p^2}{s} \mathbf{v}_n^{rel}$$



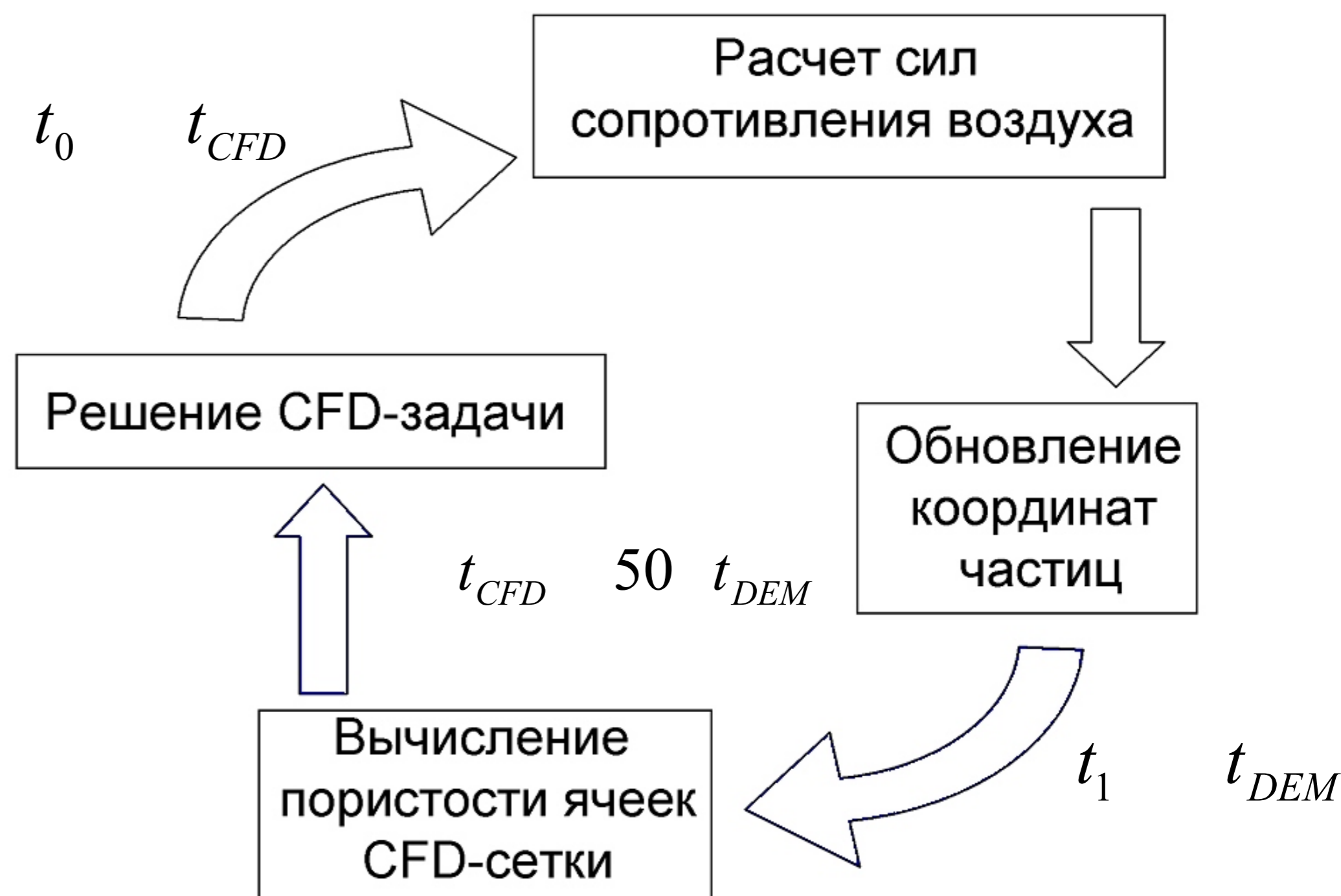
Моделирование проводилось для 75,000 частиц Zeolite4A, что составляет примерно 1 кг массы вещества. Для описания неупругих ударов между частицами и между частицами и стенкой используется коэффициент восстановления ( $e$ ).

$$e = \sqrt{\frac{E_{Kin}^{rebound}}{E_{Kin}^{impact}}}$$



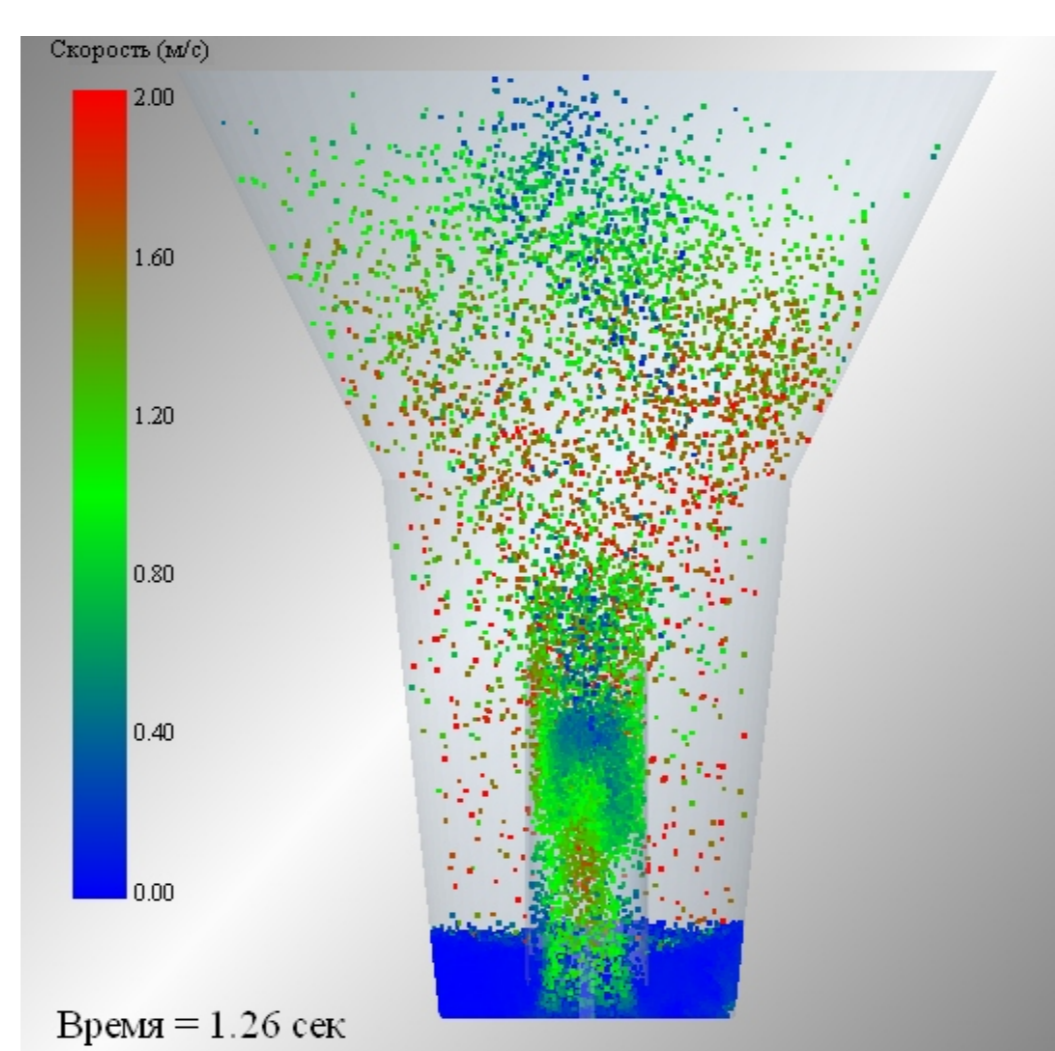
## Связанное моделирование

Для расчета движения гранулированной среды решается связанная задача вычислительной аэродинамики - при помощи программного пакета FLUENT - и динамики частиц - при использовании программного пакета EDEM, DEM Solutions. Взаимодействие программ осуществлялось передачей поля скоростей сплошной среды для расчета сил лобового сопротивления и координат частиц для расчета пористости ячеек конечных объемов.

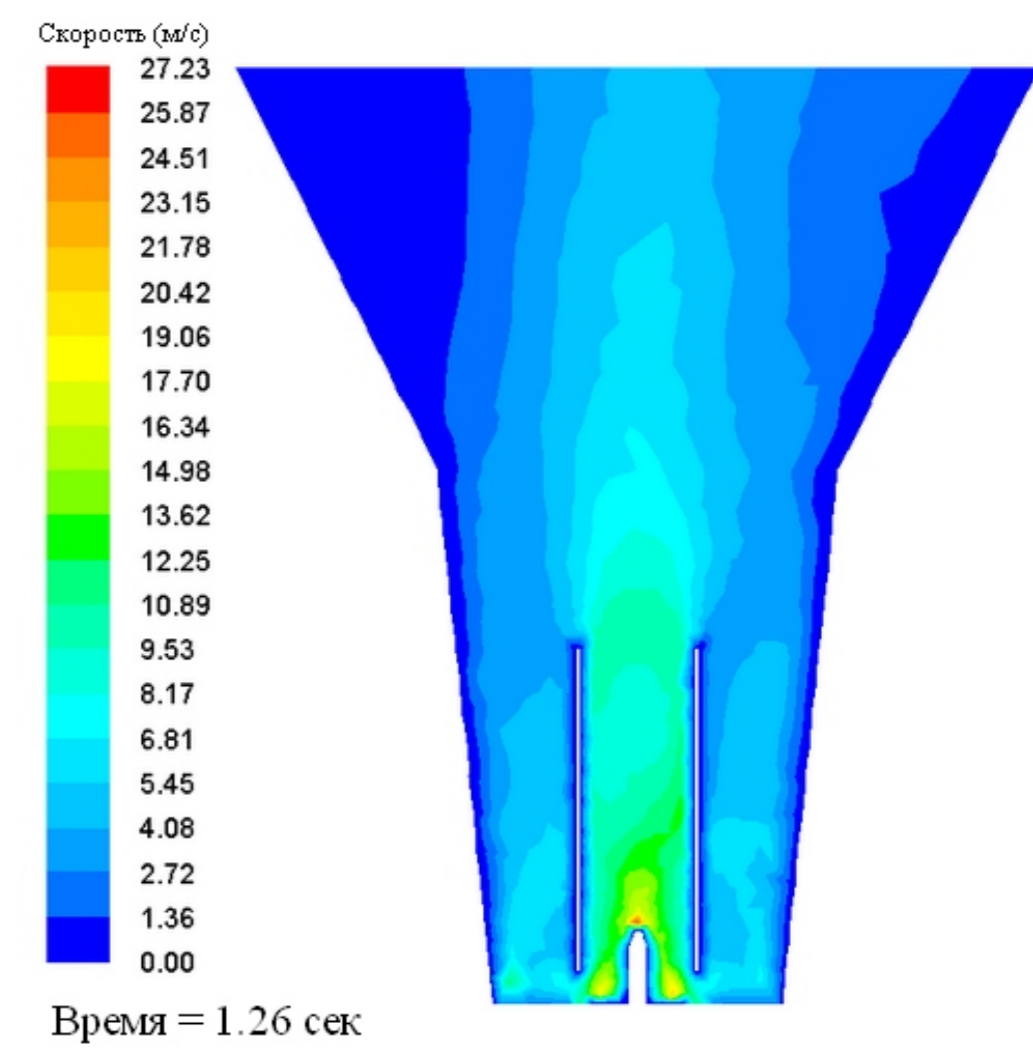


## Результаты

Результатом расчета является распределение скоростей сплошной среды по пространству камеры во времени и данные о скоростях частиц, их энергии и о контактах между ними.

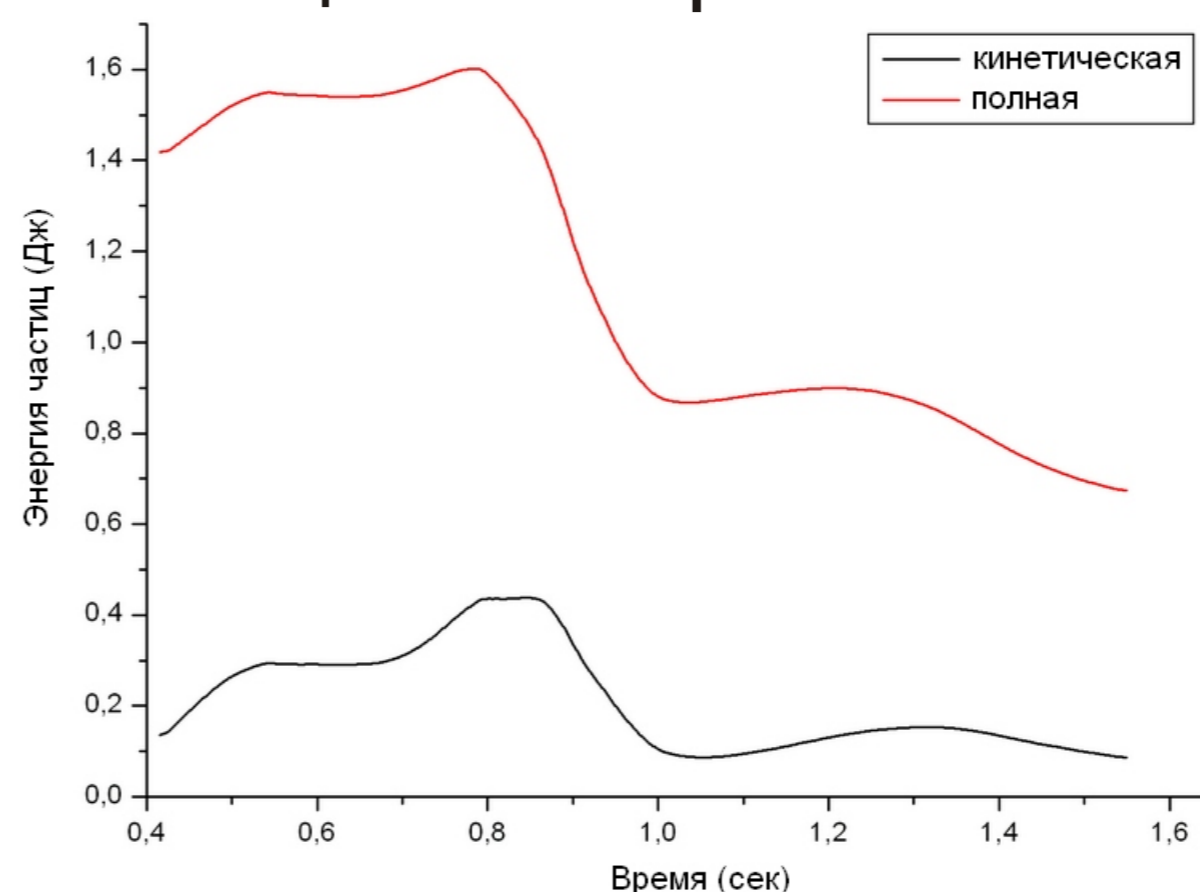


Поле скоростей дискретной среды

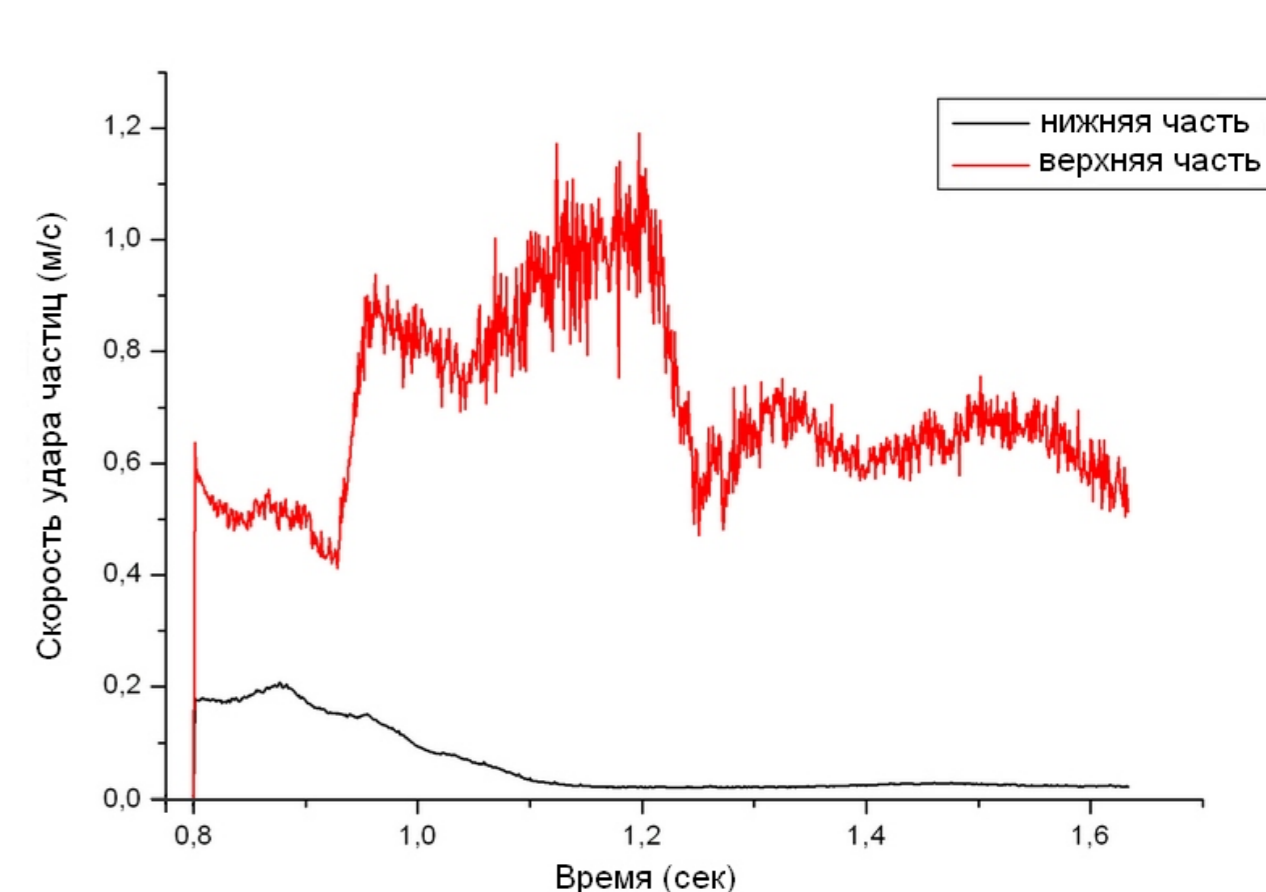


Поле скоростей сплошной среды

Располагая информацией об энергии частиц, можно установить диссипацию энергии и массовую миграцию частиц по камере.



Общая энергия частиц в камере



Скорость столкновения частиц в верхней и нижней частях камеры

Оценив количество столкновений частиц на низких скоростях, возможно выработать макропараметр - оценку скорости слипания частиц, то есть скорость образования агломератов. Значение этой оценки является актуальным вопросом при использовании аппаратов кипящего слоя в промышленности.

Исследования проводились на территории Технического университета Гамбурга (ТУНГ) под руководством к.ф.-м.н. С.И.Антонюка и Л.Фриза при содействии немецкого фонда DAAD.