Численное исследование методом граничных элементов динамики пузырькового кластера с примесями твердых частиц в акустическом поле[1]

Зарафутдинов И.А., Питюк Ю.А.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем, БашГУ, Уфа

В данной работе рассматривается совместная динамика пузырьков и твердых сферических частиц при наличии акустического поля в неограниченной идеальной несжимаемой жидкости. Данное исследование представляет практический интерес для очистки поверхности в микроэлектронике и пенной флотации.

Существует множество работ, посвященных исследованию динамики пузырьков и частиц (например, [1]), однако динамика кластера, содержащего несферические пузырьки и твердые сферические частицы, особенно в трехмерном случае, малоисследована, поскольку в большинстве теорий трехмерными эффектами пренебрегают. В связи с этим является актуальной задачей разработка численного подхода для изучения совместной трехмерной динамики деформированных пузырьков и частиц. Для решения задачи был выбран метод граничных элементов для потенциальных течений, описанный авторами настоящей работы в [2]

Рассматривается движение пузырька объема V_b ограниченного поверхностью S_b и твердой частицы объема V_p ограниченной поверхностью S_p в неограниченной идеальной несжимаемой жидкости. Движение жидкости описывается уравнениями Эйлера.

$$\rho\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \rho\mathbf{g},\quad \nabla\cdot\mathbf{v} = 0,\quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}\cdot\nabla,$$

p – давление, $\mathbf{v}$ – скорость, ρ – плотность, $\mathbf{g}$ – вектор ускорения свободного падения.

Кроме того, предполагается, что течение потенциальное, то есть $\mathbf{v} = \nabla\phi$, где ϕ — потенциал скорости, который удовлетворяет уравнению Лапласа $\nabla^2\phi = 0$ и на границе S_b определяется согласно динамическому условию

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2}|\mathbf{v}|^2 + \frac{p_\infty - p_g + 2\gamma k}{\rho} + \mathbf{g}\cdot\mathbf{x},\quad \mathbf{x}\in S_b$$

Давление в газе определяется согласно некоторому политропному процессу

$$p_{\mathrm{g}}(t) = p_{\mathrm{g}0}\left(\frac{\mathrm{V}_0}{\mathrm{V}}\right)^\kappa,\qquad p_{\mathrm{g}0} = p_0 + \frac{2\gamma}{a_0},$$

где κ – средняя кривизна поверхности пузырька, γ – коэффициент поверхностного натяжения.

Давление в жидкости p_∞ изменяется согласно действующему акустическому полю и в момент времени t определяется как

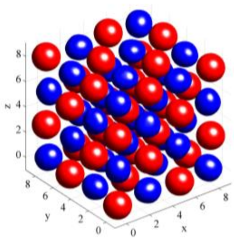
$$p_\infty(t) = p_0 + p_a(t),\qquad p_a(t) = P_a\, sin(\omega t + \phi).$$

Движение точек поверхности пузырька и частицы описывается кинематическим уравнением

$$\mathbf{n}_b\cdot\mathbf{v}|_{x=x_b} = \mathbf{n}_b\cdot\frac{d\mathbf{x}_b}{dt},\quad \mathbf{n}_{\mathrm{p}}\cdot\mathbf{v}|_{x=x_p} = \mathbf{n}_p\cdot\frac{d\mathbf{x}_{\mathrm{p}}}{dt},$$

где $\mathbf{n}$ – нормаль к поверхности дисперсных включений S, направленная в сторону жидкости, $\mathbf{x}$ – радиус-вектор точек на поверхности S.

Проведены расчеты и анализ динамики структурированного кубического пузырькового кластера с примесями твердых сферических частиц. На рисунке представлена форма кластера из пузырьков (синий цвет) и твердых частиц (красный цвет) в конце одного периода колебаний акустического поля.



Численное моделирование показало зависимость деформации пузырьков от размеров кластера. В маленьких кластерах пузырек может испытывать сильные деформации включая образование струи. Анализ динамики показал, что в среднем за период пузырьки перемещаются к центру кластера, частицы оказывают влияние на динамику пузырьков, особенно во время сжатия.

Список литературы:

[1] Ralston J., Dukhin S. S. The interaction between particles and bubbles // Colloids and Surfaces A. 1999. V. 151. P. 3–14.

[2] Zarafutdinov I.A., Gainetdinov A.R., Pityuk Yu.A., Abramova O.A., Gumerov N.A., Akhatov I. Sh. GPU acceleration of bubble-particle dynamics simulation// Communications in Computer and Information Science (CCIS). 2018. Vol. 910. P. 235–250.

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 18-71-00068.