

Моделирование осаждения мелкодисперсной взвеси из воздуха при прохождении волн давления

Михайленко К.И., Валеева Ю.Р.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

ПаВТ'2013

В работе исследован процесс осаждения мелкодисперсной среды под воздействием проходящих волн давления. Записана математическая модель, предусматривающая коагуляцию дисперсных частиц с ростом концентрации. На дисперсные частицы действуют силы Стокса со стороны дисперсионной среды и сила тяжести. Приведены результаты вычислительного моделирования процессов осаждения дисперсной взвеси. Показано, что одним из механизмов осаждения взвесей может быть коагуляция частиц при прохождении волн давления. Произведено распараллеливание задачи на основе MPI, что позволило проводить численные эксперименты на больших пространственно-временных сетках.

- Гранулированная среда состоит из гладких сферических частиц одинакового размера;
- время коагуляции пары частиц при их соударении пренебрежимо мало по сравнению со средним временем между столкновениями;
- после соединения частицы гранулированной среды вновь образуют сферическую частицу с вдвое бóльшим объёмом;
- воздействие газовой фазы на дисперсную описывается осреднённой по пространству силой Стокса;
- воздействие на газовую фазу со стороны дисперсной пренебрежимо мало;
- на гранулированную среду действует осреднённая по пространству сила тяжести.

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla_\ell \cdot \rho_i v_i^\ell = 0,$$

$$\rho_i \frac{\partial v_i^\ell}{\partial t} + \rho_i v_i \frac{\partial v_i^\ell}{\partial x^\ell} = -\alpha_i \nabla_\ell p + \nabla_k \tau_i^{\ell k} + \rho_i g + F_{ji}^\ell,$$

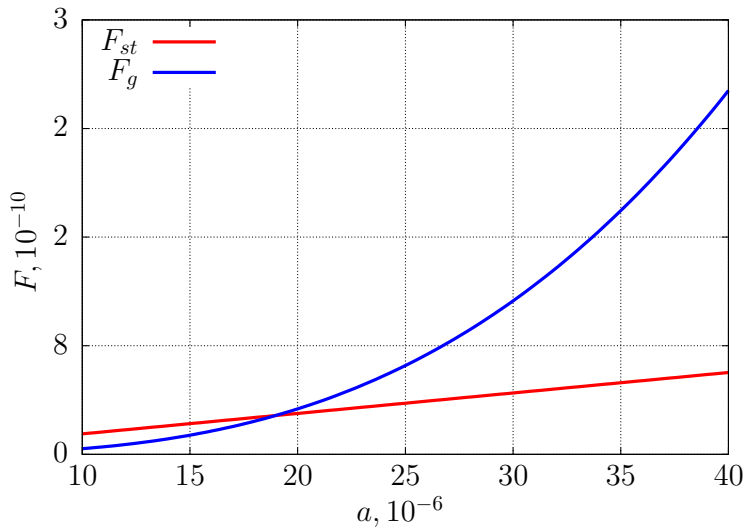
В соответствии с введёнными выше предположениями, принимаем

$$\rho_1 g = 0, \quad F_{21}^\ell = 0, \quad \tau_2^{\ell k} = 0.$$

$$\mathbf{F}_{st}^0 = 6\pi a\mu(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_p),$$

$$\mathbf{F}_g^0 = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_2 \mathbf{g}.$$

Зависимость сил Стокса и тяжести от размера частицы



Запишем выражения для внешних сил в форме взаимодействия единицы объёма с заданной концентрацией дисперсной фазы α_2 .

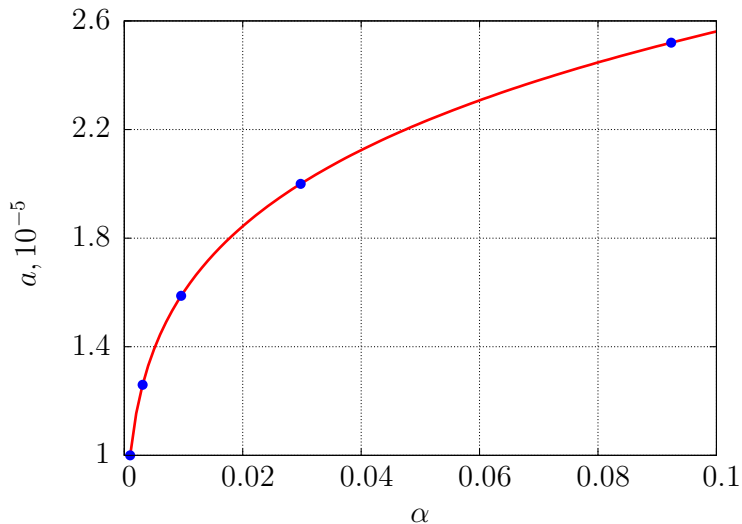
$$\mathbf{F}_{st} = \eta_\mu \alpha_1 \alpha_2 a^{-2} (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2),$$

$$\mathbf{F}_g = \alpha_2 \rho_2^0 \mathbf{g}.$$

Коагуляция частиц. Эффективный радиус \tilde{a}

- Начальная концентрация дисперсной фазы α_0 ;
- размер частиц определяет начальный эффективный радиус $\tilde{a}_0 = a$;
- при увеличении концентрации частицы начинают коагулировать таким образом, что при достижении некоторого значения $\xi\alpha_0$ достигаем максимума коагуляции исходных частиц, когда все частицы считаются попарно объединившимися;
- новый эффективный радиус, определяемый их удвоенным от начального объёмом: $\tilde{a}_1 = 2^{1/3}a$
- $\alpha_i = \xi^i\alpha_0 \Rightarrow \tilde{a}_i = 2^{i/3}a.$

Расчёт эффективного радиуса $\tilde{a} = f(\alpha)$



Эйлеров этап, на котором пренебрегаем всеми эффектами, связанными с перемещением элементарной ячейки (потока массы через границы ячеек нет), и учитываем эффекты ускорения жидкости лишь за счёт давления; здесь для крупной частицы определяются промежуточные значения искомых параметров потока $(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{E})$.

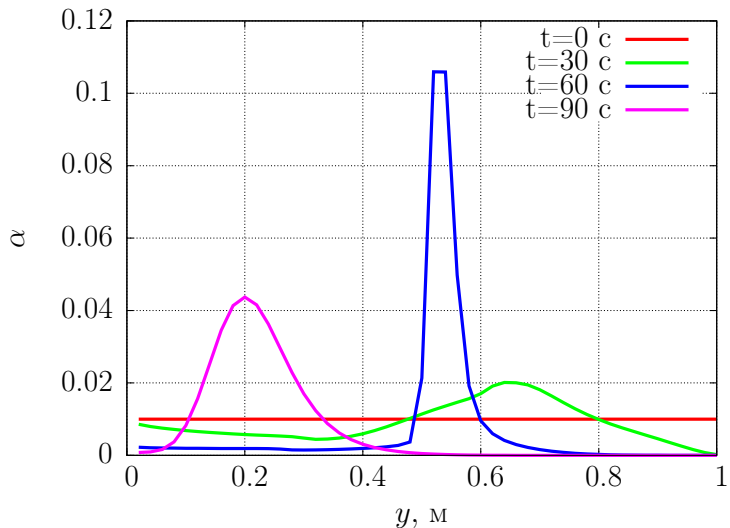
Лагранжев этап, во время которого вычисляются потоки физических величин через границы ячеек.

Заключительный этап для определения в новый момент времени окончательных значений гидродинамических параметров потока (u, v, E, ρ) на основе законов сохранения массы, импульса и энергии для каждой ячейки и всей системы в целом на фиксированной расчётной сетке.

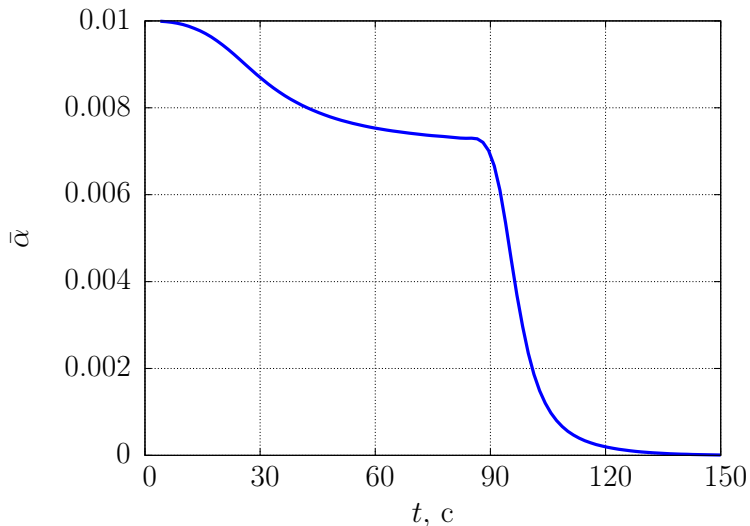
Расчётная область представляет собой закрытую с одного конца трубу прямоугольного сечения. В качестве граничных условий на боковых и верхней границах используется условие прилипания (стенка). На нижней границе ставится условие периодического изменения давления (акустическое воздействие).

- исходный размер дисперсных частиц $a = 10^{-5}$;
- исходная объёмная концентрация дисперсной среды $\alpha = 0.01$;
- исходная плотность газовой фазы $\rho_1^0 = 1 \text{ кг/м}^3$;
- плотность дисперсной фазы $\rho_2^0 = 1000 \text{ кг/м}^3$;
- вязкость газовой фазы газ $\mu = 10^{-5} \text{ П}$;
- геометрические размеры системы $1 \times 0.15 \times 0.15 \text{ м}^3$.

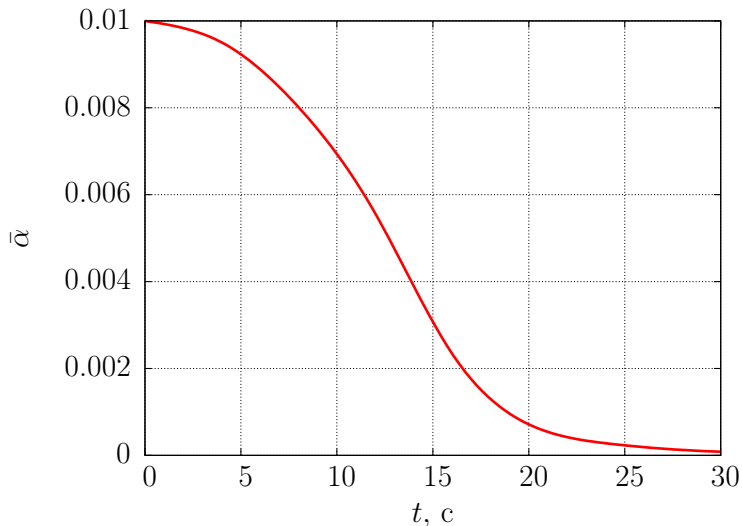
Динамика концентрации дисперсной фазы



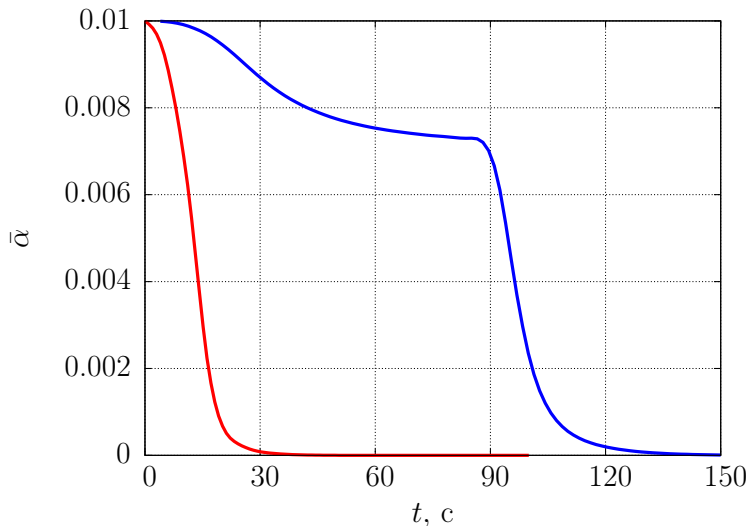
Динамика средней концентрации



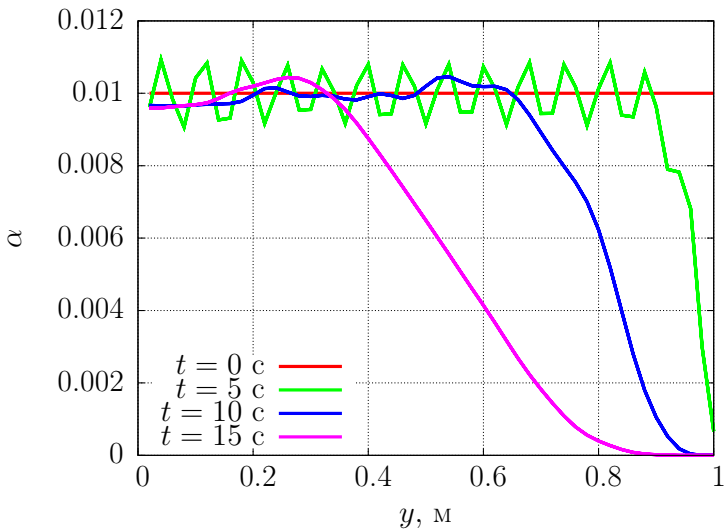
Динамика средней концентрации в стоячей волне



Динамика средней концентрации (сравнение)

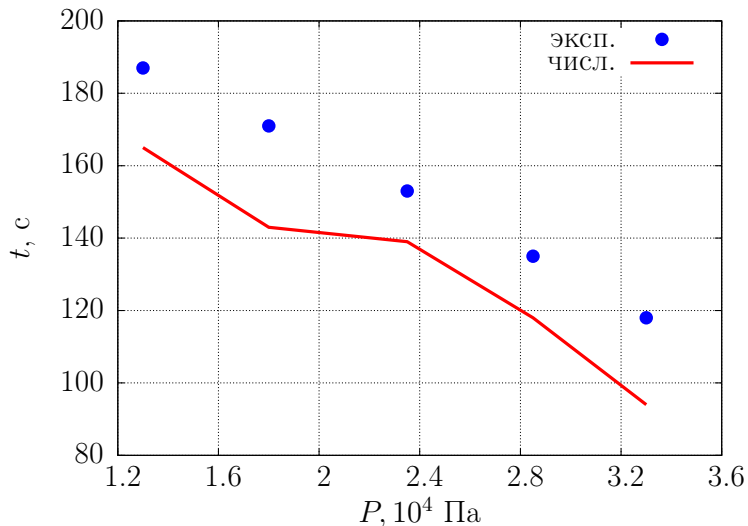


Динамика концентрации (стоячая волна)



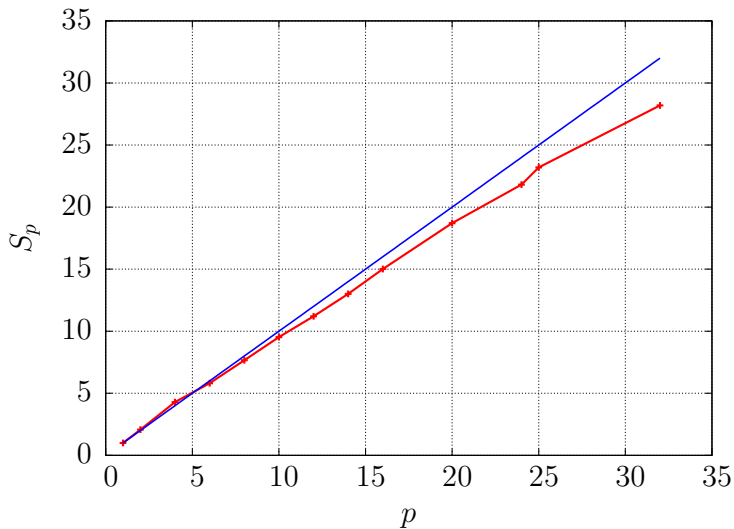
- исходный размер дисперсных частицы $a_0 = 0.83 \cdot 10^{-6}$ м, их плотность $\rho_2^0 = 557$ кг/м³ и начальная концентрация $\alpha = 0.073$;
- плотность и вязкость газовой фазы: $\rho_1^0 = 2$ кг/м³, $\mu = 1.97 \cdot 10^{-4}$ Пз;
- размер расчётной области: длина 1 м, диаметр 0.03 м);
- коэффициент коагуляции $\xi = 4.7$.

Скорость осаждения и амплитуда давления



Расчёты проводились на суперкомпьютере Уфимского государственного авиационного технического университета.
Использовалось:

- четыре двухsocketных вычислительных узла;
- процессоры Intel Quad Xeon 5300 (4 ядра);
- 8 ГБ оперативной памяти на узел;
- среда передачи данных — Infiniband.



Показано, что известный из экспериментальных работ процесс осаждения дисперсной фазы под воздействием волн давления, может быть описан в рамках модели конкуренции силы тяжести и силы межфазного взаимодействия при коагуляции частиц дисперсной среды.

Даже в рамках чрезвычайно простой модели оказалось возможно получить хорошее соответствие с результатами экспериментов.

Дальнейшая работа должна предусматривать развитие модели путём включения в систему уравнений кинетического соотношения, описывающего процессы коагуляции и диссоциации дисперсных частиц. Также необходимо учесть, что после коагуляции частицы становятся несферическими.