

Программный комплекс CSPH&VD³
с автоматической балансировкой вычислительной нагрузки
для параллельного гидродинамического моделирования веществ
в экстремальных состояниях методом сглаженных частиц с использованием
решения задачи Римана на межчастичных контактах

Егорова М.С.[@], Дьячков С.А., Мурзов С.А., Григорьев С.Ю.,
Паршиков А.Н., Жаховский В.В.
[@]egorova.maria.serg@gmail.com
ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова

Использование бессеточного лагранжевого метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) является оптимальным способом моделирования гидродинамических задач, где происходит образование кумулятивных струй, капель, пузырей, вращательных и сдвиговых течений сжимаемых сред, так как методы частиц не требуют отслеживания контактных поверхностей и свободных границ. Использование формулировки SPH с решением задачи Римана (CSPH, контактный SPH) расширяет возможности стандартного метода SPH, позволяя корректно воспроизводить эффекты сжатия-растяжения частиц. Простота формулировки метода способствует прозрачной программной реализации, а ограниченная область межчастичного взаимодействия идеально подходит для эффективной параллелизации кода с декомпозицией по пространству.

Применение известных алгоритмов параллелизации, основанных на статической декомпозиции расчетной области, приводит к плохой балансировке вычислительных ресурсов, так как эти алгоритмы не учитывают пространственное перераспределение вещества в рассматриваемых задачах. Для решения этой проблемы мы разработали высокоэффективный программный комплекс CSPH&VD³ (Voronoi dynamical domain decomposition), который использует динамическую декомпозицию моделируемых образцов между вычислительными процессами с помощью ячеек диаграммы Вороного.

Предлагаемый алгоритм определяет разбиение моделируемого образца на ячейки Вороного, каждая из которых обрабатывается соответствующим вычислительным элементом (CU – computational unit). В ходе моделирования для каждого CU нагрузка измеряется как отношение времени расчета взаимодействия между частицами к полному времени работы на шаг интегрирования (включая время на коммуникации между CU). Алгоритм задает движение центров ячеек Вороного, соответствующих менее загруженным CU, в сторону более загруженных, что приводит к перераспределению частиц между ними и выравниванию нагрузки. Таким образом, уменьшается время ожидания межпроцессорных коммуникаций и, в итоге, уменьшается время всего моделирования.

На примере течения вещества с сильными изменениями формы и пространственными неоднородностями плотности продемонстрирована гораздо более высокая эффективность использования ресурсов по сравнению со статической декомпозицией. Мы также приводим тесты, показывающие сходимость алгоритма VD³ для систем с начальным дисбалансом с количеством частиц до 10^8 , распределенных между 10^3 CU, а также практически идеальное сильное масштабирование.

С помощью CSPH&VD³ становится возможным получить решение многих фундаментальных и прикладных задач гидродинамики сплошных сред со свободными границами и разрывами сплошности, а также движением веществ с высокой плотностью энергии.