

0.1. Колганова А.О., Марчевский И.К. Эффективные алгоритмы вихревых методов при решении сопряженных задач гидродинамики в плоской постановке

Современные модификации бессеточных вихревых методов применяются для решения многих инженерных задач, связанных с моделированием течений несжимаемых сред и оценкой их воздействия на обтекаемые тела, в том числе подвижные или деформируемые.

В [1, 2] указано, что для решения актуальных задач требуется высокая разрешающая способность: для моделирования завихренности необходимо $N \sim 10^5 \dots 10^7$ вихревых частиц, а для моделирования обтекаемых контуров — $M \sim 10^3 \dots 10^5$ отрезков-панелей.

Прямые алгоритмы выполнения основных операций имеют квадратичную вычислительную сложность. В итоге уменьшение вдвое длины отрезков-панелей на контурах приводит к 4-кратному росту числа вихревых частиц, что дает 16-кратное время расчета их взаимного влияния. «Согласованное» двукратное уменьшение шага по времени приводит к тому, что сложность увеличивается в 32 раза.

В докладе представлены оригинальные модификации приближенного быстрого алгоритма [3], разработанные для выполнения основных операций:

- расчет скоростей движения вихревых частиц, обусловленных их взаимным влиянием;
- расчет правой части и решение граничного интегрального уравнения, описывающего генерацию завихренности на профилях;
- восстановление поля скоростей и поля давления;
- реструктуризация вихревого следа;
- контроль проникновения вихревых частиц внутрь профилей.

Для всех операций используется единый подход: построение k -д деревьев в форме линейных массивов (LBVN), их однократная предобработка (обход вверх) и многократный обход вниз.

Для наиболее затратных процедур созданы реализации для CPU и GPU. Для расчета скоростей вихрей реализован оригинальный быстрый алгоритм, позволивший также резко снизить сложность решения ГИУ; для реструктуризации следа использован эвристический метод поиска k ближайших соседей; контроль проникновения частиц выполняется путем вычисления знаковой функции расстояния методом псевдонормалей.

Все разработанные алгоритмы обеспечивают квазилинейную вычислительную сложность (и многократную экономию памяти), что позволило производить моделирование в сопряженных задачах гидродинамики в течение десятков минут физического времени. Приведен пример расчета колебаний Такомского моста и моста Great Belt; полученные зна-

чения критической скорости ветра (скорости флаттера) хорошо согласуются с известными в литературе.

Список литературы

- [1] KUZMINA K., MARCHEVSKY I., SOLDATOVA I., IZMAILOVA Y. On the scope of Lagrangian vortex methods for two-dimensional flow simulations and the POD technique application for data storing and analyzing // Entropy. 2021. V. 23, art. 118. doi: 10.3390/e23010118
- [2] MARCHEVSKY I., SOKOL K., RYATINA E., IZMAILOVA Y. The VM2D open source code for two-dimensional incompressible flow simulation by using fully Lagrangian vortex particle methods // Axioms. 2023, V. 12, art. 248. doi: 10.3390/axioms12030248
- [3] MARCHEVSKY I., RYATINA E., KOLGANOVA A. Fast Barnes–Hut-based algorithm in 2D vortex method of computational hydrodynamics // Computers & Fluids. 2023. V. 266. Art. 106018. doi: 10.1016/j.compfluid.2023.106018