

УДК 532:519.63

## Применение метода сглаженных частиц для моделирования течения жидкости со свободной поверхностью в условиях микрогравитации

Агафонов Андрей Евгеньевич<sup>1</sup>

agafonov.ae@phystech.edu

Сафронов Андрей Александрович<sup>2(\*)</sup>

a.a.safr@yandex.ru

<sup>1</sup> МФТИ, Долгопрудный, Россия<sup>2</sup> АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия

**Аннотация.** На языке программирования Julia реализован программный комплекс, позволяющий моделировать задачи динамики несжимаемой жидкости и сверхзвукового течения газа с помощью метода сглаженных частиц (МСЧ). Проведена валидация разработанного кода на ряде тестовых задач, включая: обтекание клина сверхзвуковым потоком газа; моделирование динамики жидкости в замкнутом объеме (баке), капиллярные течения. Обсуждаются перспективы использования данного подхода для моделирования физических процессов, происходящих в энергодвигательных установках и системах терморегулирования космических аппаратов.

**Ключевые слова:** космическая энергетика, метод сглаженных частиц, несжимаемая жидкость, обтекание сверхзвуковым потоком газа, капиллярные эффекты

**Введение.** Управление движением жидкости со свободной границей в условиях микрогравитации является актуальной задачей для ракетно-космической техники. В этих условиях форма поверхности жидкости определяется действием сил поверхностного натяжения. Из-за этого небольшое изменение распределения давления в течении может приводить к значительным изменениям положения границы. Актуальной задачей является разработка методов численного моделирования таких течений. При использовании подхода Эйлера при численном решении возникает ряд проблем (быстрое изменение положения границы течения, необходимость постоянной перестройки расчетной сетки и т. д.). Лагранжев МСЧ лишен ряда недостатков классических методов численного моделирования гидродинамических течений.

**Методы и материалы; результаты.** В условиях микрогравитации свободная поверхность жидкости сильно деформируется под воздействием даже незначительных градиентов давления. Это существенно осложняет применение классических эйлеровых методов вычислительной гидродинамики из-за проблем с точным определением положения границы раздела фаз, необходимостью частой перестройки расчетной сетки и другими сложностями.

Альтернативным подходом является МСЧ. Его идея заключается в дискретизации сплошной среды на конечное число взаимодействующих «частиц», каждая из которых является носителем массы, плотности, давления и других физических величин. В рамках МСЧ исходная система уравнений в частных производных сводится к интегрированию системы обыкновенных

дифференциальных уравнений первого порядка для каждой частицы. Восстановление поля физических величин в произвольной точке пространства осуществляется путём интерполяции соответствующих значений с соседних частиц с использованием ядерных функций сглаживания. Радиус сглаживания  $h$  определяет локальность интерполяции [1–3].

Развитие вычислительных технологий способствует применению МСЧ. Архитектура современных графических процессоров позволяет эффективно распараллеливать вычислительный алгоритм МСЧ. Активное использование аналогов МСЧ в индустрии компьютерной графики (кино, видеоигры) стимулировало разработку высокоэффективных алгоритмов для решения одной из наиболее затратных подзадач метода — поиска соседних частиц в заданной окрестности (задача пространственного хеширования). Это существенно снижает порог внедрения МСЧ для решения инженерных задач [4, 5].

**Заключение.** Рассмотрены различные подходы к моделированию жидкости и газа с помощью МСЧ. Показано, что оптимальным для рассматриваемых задач движения жидкости со свободной границей в условиях микрогравитации является метод введения дополнительных сил межчастичного взаимодействия. Приведена формулировка разработанных методов моделирования капиллярных эффектов. Представлены результаты тестовых расчетов.

#### Список источников

- [1] Паршиков А.Н. Численный метод SPH, использующий соотношения распада разрывов, и его применение в механике деформируемых гетерогенных сред. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2013, 202 с.
- [2] Han P., Cong H., Zhou Z., Sun Z., Xi G. An incompressible-compressible multiphase mesh-free particle method for boiling and condensation simulation. *Physics of Fluids*, 2024, vol. 36, art. no. 063346.
- [3] Villodi N., Ramachandran P. Robust solid boundary treatment for compressible smoothed particle hydrodynamics. *Physics of Fluids*, 2024, vol. 36 (8). <https://doi.org/10.1063/5.0220606>
- [4] Stomakhin A., Schroeder C., Chai L., Teran J., Selle A. A Material Point Method for Snow Simulation. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Proceedings)*, 2013.
- [5] Gissler C., Henne A., Band S., Peer A., Teschner M. An Implicit Compressible SPH Solver for Snow Simulation. *ACM Transactions on Graphics*, 2020. <https://doi.org/10.1145/3386569.3392431>