

МЕТОД ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМОГО ГАЗА В СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ

О.В. Васильев

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
Москва, oleg.v.vasilyev@gmail.com*

Эффективное численное моделирование течений жидкости и газа со сложной геометрией, особенно с движущимися элементами или деформируемыми границами, представляет собой довольно сложную задачу. В настоящий момент существует два основных подхода численного моделирования задач сложной геометрии: методы на основе согласованных сеток, отслеживающих границы области [1], и методы погруженных (затопленных) границ [2]. В общепринятом подходе на основе согласованных структурированных и неструктурированных сеток узлы расчётной сетки совпадают с границей области, что позволяет напрямую накладывать граничные условия в узлах сетки. Основной сложностью использования согласованных сеток является дороговизна их построения, контроль качества вычислительных сеток и невозможность применения декартовых сеток. Построение согласованных сеток сильно усложняется для геометрии с движущимися или деформируемыми границами, так как требует непрерывной адаптации или построения новой сетки с интерполяцией решения со старой сетки на новую.

Метод погруженных границ позволяет избежать затрат и сложностей, связанных с построением согласованных сеток, и дает возможность численного моделирования с использованием декартовых сеток посредством изменений уравнений, обеспечивающих выполнение граничных условий без сосредоточения узлов сетки вдоль поверхности. В докладе будет представлен краткий обзор метода характеристических штрафных функций (МХШФ) [3-5], представляющего отдельный подкласс дифференциальных методов погруженных границ, в которых эффект присутствия объектов сложной геометрии достигается посредством введения дополнительных объёмных источников членов в дифференциальные уравнения,

обеспечивающих возможность накладывать общие однородные и неоднородные граничные условия Дирихле, Неймана и Робена. Метод характеристических штрафных функций довольно гибок и применим для решения как параболических, так и гиперболических систем уравнений, при этом, МХШФ даёт возможность контролировать ошибку численного решения пенализированных уравнений через штрафные параметры.

Применимость метода характеристических штрафных функций, общность формулировки и возможность накладывать произвольные граничные условия на стационарных и подвижных границах, по функциональности, гибкости и простоте применения близкая к определению аналитических граничных условий, продемонстрированы на примерах сверхзвуковых/дозвуковых вязких/невязких течений со сложной геометрией. В докладе также продемонстрирована эффективность метода характеристических штрафных функций при совместном использовании с сеточной адаптацией, позволяющей локальное разрешение сложной геометрии с заданной точностью без чрезмерного разрешения вдали от границ, включая моделирование обтекания объектов с движущимися и деформируемыми границами.

Публикация подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение от 25.04.2022 № 075-15-2022-330).

Литература

1. J.F. Thompson. Boundary fitted coordinate systems for numerical solution of partial differential equations. A review J.F. Thompson, Z.U.A. Warsi, C.W. Mastin. *J. Comput. Phys.*, vol.47, 1982, pp.1–108.
2. C.S. Peskin. The immersed boundary method. *Acta Numerica*, 2002., pp.479–517.
3. E. Brown-Dymkoski, N. Kasimov, O.V. Vasilyev. A Characteristic Based Volume Penalization Method for General Evolution Problems Applied to Compressible Viscous Flows. *J. Comput. Phys.*, vol.262, pp.344–357.

4. E. Brown-Dymkoski, N. Kasimov, O.V. Vasilyev. Characteristic-Based Volume Penalization Method for Arbitrary Mach Flows Around Solid Obstacles. Direct and Large-Eddy Simulation IX, Proceedings of the Ninth International ERCOFTAC Workshop on Direct and Large-Eddy Simulations, Edts. J. Frohlich, H. Kuerten, B.J. Geurts, and V. Armenio, Springer, 2015, pp.109–115.
5. N. Kasimov, E. Brown-Dymkoski, G. De Stefano, O.V. Vasilyev. Galilean-Invariant Characteristic-Based Volume Penalization Method for Supersonic Flows with Moving Boundaries. Fluids., vol.6, no.8, 2021, URL: <https://doi.org/10.3390/fluids6080293>.