ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ СОЛВЕРОВ ПАКЕТА OPENFOAM НА ЗАДАЧЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ДВОЙНОГО КЛИНА

А.Е. Кувшинников

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва

kuvsh90@yandex.ru

Моделирование сверхзвуковых течений играет ключевую роль в современной аэрокосмической промышленности, проектировании высокоскоростных летательных аппаратов и разработке новых технологий. OpenFOAM [1], как открытая платформа для численного моделирования, предоставляет широкий набор солверов для решения задач газовой динамики. Однако выбор оптимального солвера для конкретной задачи не всегда очевиден. Всё больше универсальных вычислительных комплексов предлагают широкий набор встроенных численных методов и возможность интеграции новых. Параллельно растет и число самих методов, однако их разработчики не всегда анализируют точность на разных типах задач. Сейчас точность обычно оценивают, сравнивая результат с референтным решением (точным аналитическим, проверенным численным или экспериментальными данными). Зачастую такое сравнение проводится лишь для одного фиксированного набора параметров задачи.

Предлагаемый обобщенным вычислительным экспериментом [2] подход основан на сравнении целых классов задач, охватывающих различные вариации параметров. Результаты такого анализа дадут пользователю необходимую информацию о точности, применимости, эффективности и надежности методов для конкретной задачи.

По аналогии с прошлыми работами [3, 4], была взята задача сверхзвукового обтекания двойного клина. Данная задача имеет аналитическое решение [5–7]. Для сравнительного анализа использовались 4 солвера: rhoCentralFoam, sonicFoam, pisoCentralFoam и QGDFoam. Два первых солвера входят в стандартный набор и доступны сразу после установки программного комплекса. Исходный код оставшихся есть в открытом доступе [8, 9]. Пользуясь методикой обобщенного вычислительного эксперимента [2], исследовалось влияние параметров на точность решения. Этими параметрами являются число Маха M набегающего потока, углы двойного клина α, β и используемый солвер. Рассчитано отклонение от известного точного решения в сеточном аналоге нормы L2 для давления, скорости, плотности и температуры. Пример численного решения представлен на рис. 1.

В ходе вычислительного эксперимента получены многомерные массивы данных, размерность которых определяется числом ключевых параметров. Визуализация этих данных выполнена с помощью поверхностей ошибок. Показано, что использование OpenFOAM позволяет эффективно моделировать сложные течения газа с наличием ударных волн, даны рекомендации при выборе солвера.

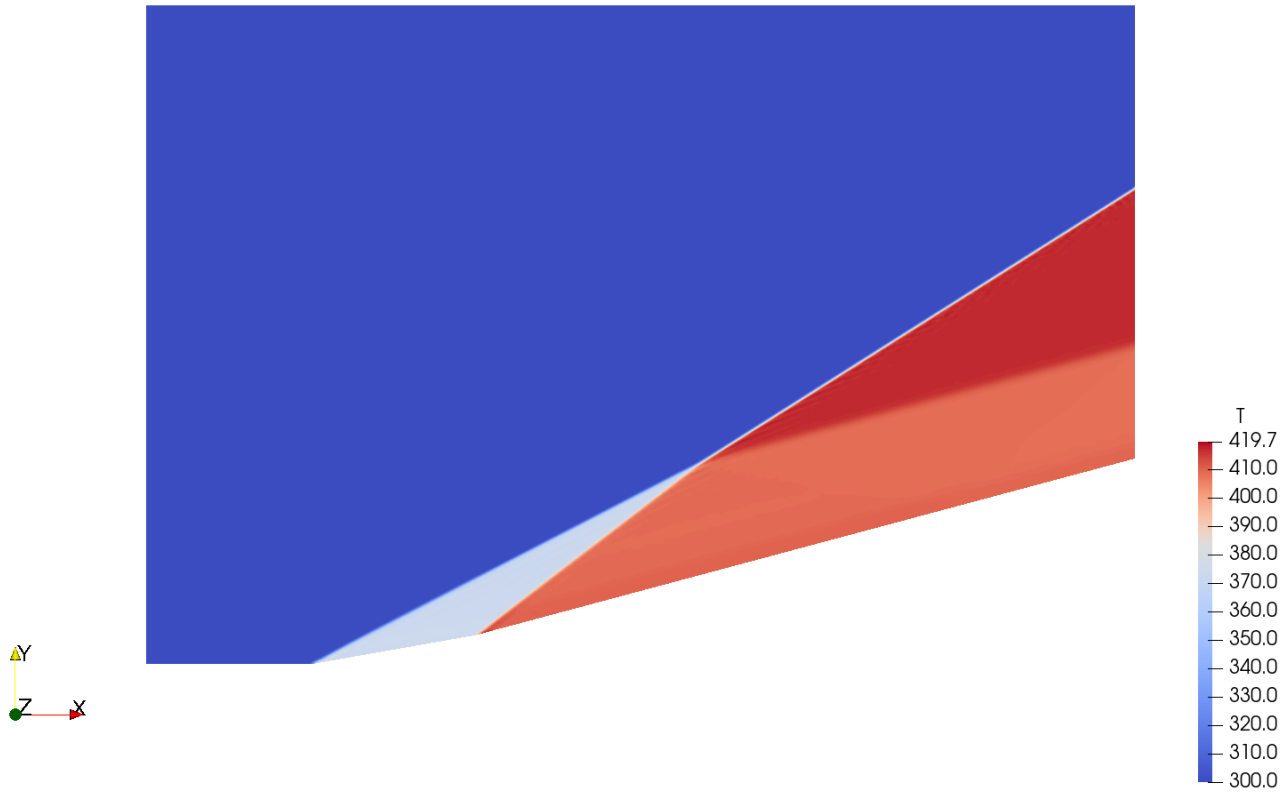

Рис. 1. Распределение температуры при α=10°, β=25° и числе Маха *M*=3 для солвера rhoCentralFoam.

Список литературы:

1. OpenFOAM Foundation. URL: https://openfoam.org (дата обращения 30.03.2025).
2. Bondarev A.E. On visualization problems in a generalized computational experiment // Scientific Visualization. 2019. Vol. 11. Issue 2. Pp. 156–162.
3. Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E. Analysis and Visualization of the Computational Experiments Results on the Comparative Assessment of OpenFOAM Solvers Accuracy for a Rarefaction Wave Problem // Scientific Visualization. 2021. Vol. 13. Issue 3. Pp. 34–46.
4. Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E. Comparative Evaluation of the Accuracy of Numerical Methods on Reference Solutions // Scientific Visualization. 2023. Vol. 15. Issue 3. Pp. 58–71. https://doi.org/10.26583/sv.15.3.07
5. Арутюнян Г.М. Отраженные ударные волны / Г.М. Арутюнян, Л.В. Карчевский. – М.: Машгиз, 1973. 376 с.
6. Anderson J.D. Modern Compressible Flow: With Historical Perspective. – McGraw-Hill Education, 2021. 778 p.
7. Ben-Dor G. Shock Wave Reflection Phenomena. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 342 p.
8. United collection of hybrid Central solvers – one-phase, two-phase and multicomponent versions. URL: https://github.com/unicfdlab/hybridCentralSolvers (дата обращения 30.03.2025).
9. OpenFOAM framework for simulation of fluid flows using regularized (QGD/QHD) equations. URL: https://github.com/unicfdlab/QGDsolver (дата обращения 30.03.2025).