

СРАВНЕНИЕ ПРОТИВОПОТОЧНЫХ И СИММЕТРИЧНЫХ WENO-СХЕМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ БАЗОВЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ

С. Бахнэ, А.И. Трошин

*Центральный аэрогидродинамический институт, 140180, Жуковский,
bakhne@phystech.edu*

Как известно, при использовании гибридных RANS/LES-методов в задачах обтекания твердых поверхностей важен вопрос выбора численной схемы. Противопоточные схемы, которые обычно применяются вблизи стенки, обладают высоким уровнем диссипации, непригодным для LES. Центральные-разностные (CD) схемы, привлекательные с точки зрения описания малых масштабов течения, обладают недостаточным запасом устойчивости при использовании их в пристенной части пограничного слоя. Одним из подходов в данной ситуации является использование гибридных разностных схем, которые с помощью эмпирической переходной функции переключаются между противопоточной и центральной-разностной аппроксимациями. Типичным примером такой схемы является [1]. Отметим, что переходная функция в [1] достаточно сложна и включает в себя зависящую от течения константу. Другим подходом может быть применение модифицированных схем семейства WENO, которые, если позволяют гладкость решения, выбирают комбинации элементарных шаблонов из соображений оптимизации диссипативно-дисперсионных свойств. Согласно [2], самыми многообещающими схемами такого типа являются WENO-ZM [3] и WENO-SYMBOO [4].

WENO-ZM относится к классу противопоточных схем, то есть, использует несимметричный шаблон. В WENO-ZM, по сравнению с классической схемой WENO, выбраны индикаторы гладкости и весовые коэффициенты элементарных шаблонов, что позволяет улучшить поведение численного решения в окрестности особых точек (гладких экстремумов и точек перегиба). Схема WENO-SYMBOO добавляет в набор элементарных шаблонов симметричный шаблон, однако включает

его с относительно малым весом, что обеспечивает устойчивость счета в пограничных слоях и вблизи разрывов решения. Кроме того, все весовые коэффициенты WENO-SYMBOO откалиброваны так, чтобы сдвинуть отличный от нуля уровень диссипации вправо по спектру волновых чисел, в область, где дисперсионные ошибки схемы превышают 10%.

Основная цель данной работы — выяснить, насколько схемы WENO-ZM и WENO-SYMBOO могут составить конкуренцию гибридной схеме, комбинирующей классическую схему WENO5 и CD-схему 2 порядка точности с помощью переходной функции [1] в рамках LES. Для сравнения также рассмотрены классическая WENO-схема и CD-схемы различных порядков точности.

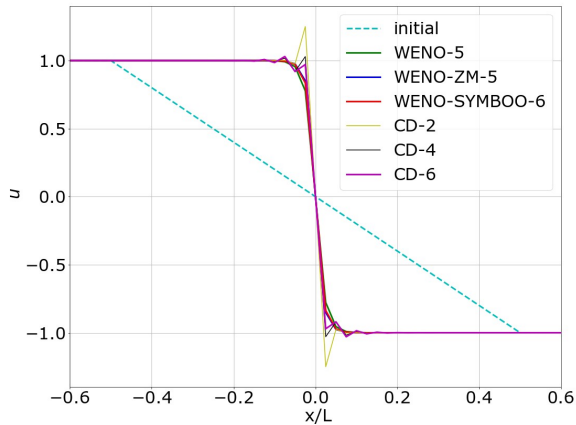


Рис. 1. Уравнение Бюргерса, стационарное решение

На первом этапе работы были проведены одномерные расчеты по модельным уравнениям переноса, Хопфа и Бюргерса. Был установлен численный порядок сходимости по набору вложенных сеток, который совпал для всех схем с теоретическим. Показательным примером в данной серии является решение уравнения Бюргерса в стационарном пределе с кусочно-линейным начальным распределением (рис. 1). Видно, что все центрально-разностные схемы породили существенные осцилляции решения, амплитуда которых тем выше, чем ниже порядок схемы. В противоположность им, все WENO-схемы дали монотонное решение, причем наименее размытым численной вязкостью оказалось решение по схеме WENO-ZM.

На втором этапе были проведены LES-расчеты распада изотропной турбулентности. Использовалась программа *zFlare* (ЦАГИ). На многоблочной структурированной сетке решалась полная сжимаемая система уравнений LES с подсеточной моделью на базе SST, взятой из метода DDES. В качестве временной аппроксимации использовался явный метод Хойна 3-го порядка. Расчеты проводились в кубической расчетной области с периодическими граничными условиями. Для основных расчетов использовалась сетка с 64^3 ячейками. Было установлено, что схемы WENO-ZM и WENO-SYMBOO уступают по качеству воспроизведения энергетического спектра гибридной схеме [1]. Основное отличие пришлось на коротковолновую область спектра, где наблюдалась излишняя диссипативность новых схем. Даже при полном отключении подсеточной модели спектр не содержал развитого инерционного интервала. Таким образом, схемы [3] и [4] рекомендуется применять вILES-постановке.

Заключительный этап был посвящен расчету развития турбулентного временного слоя смешения. Использовалась прямоугольная расчетная область с $128 \times 128 \times 256$ ячейками. Изучалось развитие и характеристики турбулентного сдвигового слоя. Для каждой схемы задавался оптимальный для нее коэффициент подсеточной модели C_{DES} , определенный на предыдущем этапе. На рис. 2 показаны поля продольной компоненты скорости в конечный момент времени по двум численным схемам.

В этом тесте гибридная схема [1] снова оказалась предпочтительной по сравнению с WENO-схемами [3] и [4], разрешив более мелкомасштабные структуры течения. Это сопровождалось более быстрым выходом скорости нарастания толщины слоя смешения на автомодельный режим и более протяженным инерционным интервалом продольного энергетического спектра, вычисленного по центральной плоскости в слое смешения. Заметим, что в этом тесте, как и в задаче о затухании изотропной турбулентности, гибридная схема дала решение, близкое к CD-схеме 2-го порядка точности.

Данная работа позволяет сделать вывод, что, по крайней мере, в расчетах с дозвуковыми LES-областями схемы WENO-ZM и WENO-SYMBOO не могут конкурировать по диссипативным свойствам с гибридной схемой на основе [1].

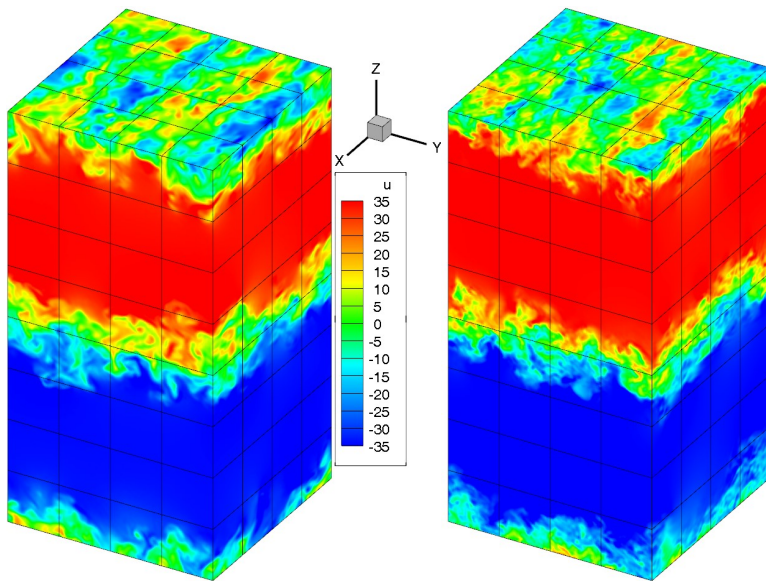


Рис. 2. Поле продольной компоненты скорости при использовании WENO-SYMBOO — слева и гибридной схемы [1] — справа

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №. 21-71-10105, <https://rscf.ru/en/project/21-71-10105/>

Литература

1. Guseva E.K., Garbaruk A.V., Strelets M.K. An automatic hybrid numerical scheme for global RANS-LES approaches. *J. Phys.: Conference Series* 929, 2017.
2. Li H., Luo Y., Zhang S. Assessment of upwind/symmetric WENO schemes for direct numerical simulation of screech tone in supersonic jet. *J. Sci. Comput.*, 87(1):1-39, 2021.
3. Zhao S., Lardjane N., Fedioun I. Comparison of improved finite-difference WENO schemes for the implicit large eddy simulation of turbulent non-reacting and reacting high-speed shear flows. *Comput. Fluids* 95:74-87, 2014.
4. Nathan J., Datta V. A bandwidth and order optimized WENO interpolation scheme for compressible turbulent flows. *AIAA paper* 2011-366.