ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В АСИММЕТРИЧНОМ ДИФФУЗОРЕ С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНЫХ RANS/LES-МЕТОДОВ РАЗНЫХ КЛАССОВ

А.О. Будникова
ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский, budnikova.ao@phystech.edu

В докладе исследуется отрывное течение в плоском асимметричном диффузоре с углом раскрытия 10° [1] в рамках гибридных RANS/LES-расчетов (рис. 1). Это течение было ранее изучено экспериментально в работе [1] и численно с помощью метода LES с разрешением пристеночных процессов в работе [2]. Благодаря тщательности проведенных измерений и геометрической простоте (течение можно считать статистически двумерным), этот тест приобрел широкую популярность как эталон для проверки возможностей моделей турбулентности. Он обладает богатой физикой: сочетает в себе области присоединенного течения, отрыв с гладкой поверхности, большой диапазон масштабов длины и, как впоследствии было установлено, содержит участки с отрицательным производством кинетической энергии турбулентности. Интерес представляет вопрос, в какой степени глобальная структура этого течения в рамках вихреразрешающего расчета определяется подсеточными масштабами и насколько важно уточнение моделей подсеточных напряжений для его успешного воспроизведения.

В данном докладе сравниваются результаты расчетов двумя гибридными методами разных классов: методом SST-IDDES [3], основанным на буссинесковой модели турбулентности SST, и методом HSM (Hybrid Stress Method) [4], сочетающим заново откалиброванную небуссинескову модель [5] в RANS-подслое и подсеточную модель [6] в LES-области. Основное отличие второго метода от первого состоит в том, что подсеточные напряжения не связаны алгебраически с тензором разрешенных скоростей деформации, что, в принципе, открывает возможности к более точному описанию двунаправленного взаимодействия разрешенных и подсеточных масштабов и анизотропию последних. Базовыми параметрами течения, которые рассматриваются в докладе, являются профили средних скоростей и компонент турбулентных напряжений,

распределения давления и трения, а также координаты точек отрыва и присоединения. Помимо них, рассматриваются более тонкие характеристики, такие, как средние поля производства кинетической энергии турбулентности и потока энергии от разрешенных масштабов к подсеточным и анализируется, как различия в их описании двумя методами влияют на формирование среднего течения.

Для расчетов использовалась программа *zFlare* [7] (ЦАГИ), реализующая метод конечных объемов на блочно-структурированных сетках. Использовалась низкодиссипативная аппроксимация конвективных потоков, основанная на линейной реконструкции 5 порядка вдоль сеточных направлений, и диагонально-неявный метод Рунге–Кутты DIRK22 второго порядка точности для интегрирования по времени. Базовая сетка содержала 8.2 млн ячеек. Один из расчетов также был проведен на «удвоенной» сетке, содержащей 65.3 млн. ячеек.

Помимо физических аспектов, исследовалась численная эффективность выбранных методов. Показано, что метод, основанный на небуссинесковой модели для напряжений Рейнольдса, позволяет получить близкий к эталонному размер отрывной зоны на базовой сетке, в то время как метод SST-IDDES требует «удвоенной» сетки для приближения к этому результату (рис. 2).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10064, https://rscf.ru/project/24-79-10064/.

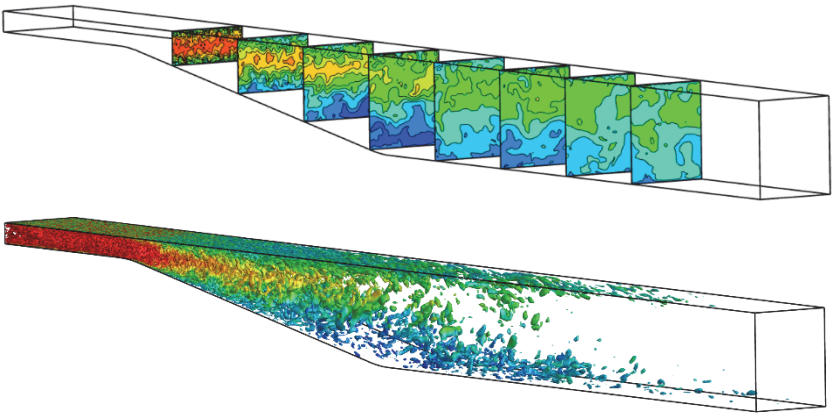

Рис. 1. Изоконтуры мгновенной продольной скорости (сверху) и изоповерхность Q-параметра $Q/Q_{max} = 0.002$ (снизу). Цветом обозначена величина продольной скорости

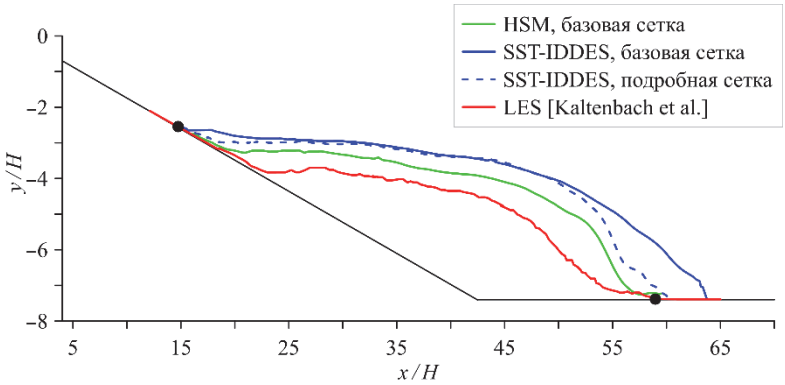

Рис. 2. Граница отрывной области в разных расчетах, точками показаны экспериментальные данные [1]. H — полувысота входного канала диффузора

Литература

1. C.U. Buice, J.K. Eaton. Experimental Investigation of Flow through an Asymmetric Plane Diffuser. CTR Annual Research Briefs, 1995, pp.243–248.
2. H.-J. Kaltenbach, M. Fatica, R. Mittal, T.S. Lund, P. Moin. Study of flow in a planar asymmetric diffuser using large-eddy simulation. J. Fluid Mech., v.390, 1999, pp.151–185.

3. M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, A.K. Travin. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. Int. J. Heat Fluid Flow, v.29(6), 2008, pp.1638–1649.
4. L. Usov, A. Troshin, K. Anisimov, V. Sabelnikov. Calibration of a Near-Wall Differential Reynolds Stress Model Using the Updated Direct Numerical Simulation Data and Its Assessment. Energies, v.16(19):6826, 2023. https://doi.org/10.3390/en16196826
5. S. Jakirlić, R. Maduta. Extending the bounds of 'steady' RANS closures: Toward an instability-sensitive Reynolds stress model. Int. J. Heat Fluid Flow, v.51, 2015, pp.175–194.
6. R. Balabanov, L. Usov, A. Troshin, V. Vlasenko, V. Sabelnikov. A Differential Subgrid Stress Model and Its Assessment in Large Eddy Simulations of Non-Premixed Turbulent Combustion. Appl. Sci, 12(17):8491, 2022. https://doi.org/10.3390/app12178491
7. А.И. Трошин, С.С. Молев, В.В. Власенко, С.В. Михайлов, С. Бахнэ, С.В. Матяш. Моделирование турбулентных течений на основе подхода IDDES с помощью программы zFlare. ВМСС, т.16(2), 2023, С.203–218.