

## ГИБРИДНЫЙ RANS/LES-МЕТОД HSM НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ПЕРЕНОСА НАПРЯЖЕНИЙ РЕЙНОЛЬДСА

Р.А. Балабанов, А.О. Будникова, **А.И. Трошин**, Л.А. Усов  
ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский, *aleksey.troshin@tsagi.ru*

В настоящее время активно развиваются гибридные RANS/LES-методы. Они считаются одним из перспективных направлений вычислительной аэродинамики. В частности, по сравнению с подходом RANS, гибридные методы открывают возможности к более точному описанию влияния крупномасштабных турбулентных пульсаций на среднее течение и к воспроизведению связанных с этим нестационарных процессов.

Наибольшую популярность сегодня приобрели RANS/LES-методы, сформулированные на основе буссинесковских моделей турбулентности SA и SST [1]. Из-за того, что в этих методах область действия полуэмпирических замыкающих соотношений ограничена подсеточной турбулентностью и узкими пристеночными слоями, возможные ошибки, порождаемые ими, оказывают меньшее негативное влияние на структуру течения, чем в случае подхода RANS. Тем не менее, уточнение замыкающих соотношений представляет интерес с точки зрения описания таких физических явлений, как сильная анизотропия напряжений Рейнольдса вблизи стенки и события обратного переноса энергии от подсеточных пульсаций к разрешенным в области развитой турбулентности. Это может быть достигнуто отказом от гипотезы Буссинеска и решением дифференциальных уравнений для переноса турбулентных напряжений в рамках гибридного RANS/LES-расчета (подход DRSM). Развитию таких методов и посвящена данная работа.

На первом этапе была доработана DRSM-модель Jakirlić & Maduta [2] с целью использования как модель для RANS-подслоя гибридного расчета. В ней были оставлены наиболее значимые члены и проведена перекалибровка коэффициентов с использованием данных DNS о развитом турбулентном течении в канале [3]. Перекалиброванная и упрощенная модель позволила снизить норму ошибки решения по сравнению с исходной моделью в 2.6 раза. Профили средней скорости и продольных напряжений

Рейнольдса по двум моделям в канале при числе Рейнольдса  $Re_\tau \approx 2000$  показаны на рис. 1.

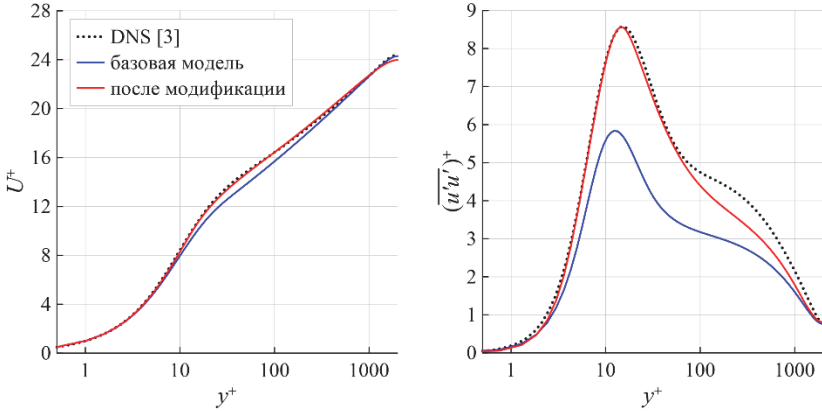


Рис. 1. Профили средней скорости (слева) и продольных напряжений Рейнольдса (справа) по исходной и модифицированной моделям Jakirlić & Maduta

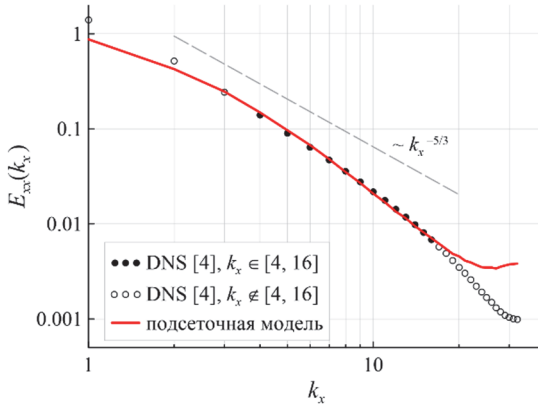


Рис. 2. Продольный энергетический спектр в задаче об изотропной турбулентности. Расчет по дифференциальной модели подсеточных напряжений

На втором этапе была сформулирована и априорно откалибрована дифференциальная модель подсеточных напряжений. Использовалась база данных по изотропной турбулентности университета Джонса Хопкинса [4]. Скорость диссипации аппроксимировалась по алгебраической формуле. Оригинальным элементом

модели является зависимость диффузионного члена уравнений от тензора разрешенных градиентов скорости.

В апостериорных тестах подсеточная модель показала способность воспроизводить события обратного переноса энергии от подсеточных пульсаций к разрешенным. При этом был получен продольный энергетический спектр, соответствующий спектру отфильтрованных коробчатым фильтром данных DNS, см. рис. 2.

Расчет проводился на сетке, содержащей  $64^3$  ячеек, с низкодиссипативным численным методом на основе линейной реконструкции Uprwind5 для конвективных потоков. При сравнении спектров области волновых чисел  $k < 4$  и  $k > 16$  были исключены из рассмотрения: первая — из-за возможного влияния форсинга в DNS-расчете, вторая — из-за искажений коротких волн (4 ячейки и менее), вызываемых численным методом.

На третьем этапе разработанные модели были гибридизированы с помощью переходной функции, заимствованной из метода IDDES [1]. Помимо алгебраического переключения между RANS- и LES-моделями в зависимости от характеристик сетки, в метод были включены оригинальные элементы. Во-первых, градиенты скорости, по которым вычисляются источники в уравнениях модели турбулентности в RANS-подслое, осредняются по времени. Тесты показывают, что этот прием значительно ослабляет проблему нестыковки логарифмических профилей скорости на RANS/LES-границе. Во-вторых, в RANS-подслое используется дополнительное диффузионное слагаемое в уравнениях импульса, которое воздействует только на пульсации скорости, но не на среднее течение. Это слагаемое снижает турбулентный перенос, вызываемый разрешенными движениями в RANS-подслое, так что суммарный турбулентный перенос, состоящий из вклада RANS-модели и разрешенных движений, приближается к эталонным данным.

Сформулированный гибридный метод обозначен HSM (Hybrid Stress Method — метод гибридных напряжений). Метод успешно протестирован в задачах о развитом турбулентном течении в канале и о взаимодействии скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем на пластине.

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

## Литература

1. 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, 2008, pp.1638–1649.
2. 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.
3. M. Lee, R.D. Moser. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $Re_\tau \approx 5200$ . *J. Fluid Mech.*, v.774, 2015, pp.395–415.
4. <https://turbulence.pha.jhu.edu/>