

РАЗРАБОТКА WMLES МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ С ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫМ ПЕРЕХОДОМ

А.А. Матюшенко¹, А.В. Гарбарук¹, Е.К. Гусева²,
Ф.Р. Менгер², А.С. Стабников¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, aleksei@matiushenko.ru

²ANSYS Germany GmbH

Применение метода моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES) для расчета пристеночных течений ограничено необходимостью использования чрезвычайно мелких сеток в непосредственной близости от стенки. Поэтому на практике зачастую используется метод LES с пристеночным моделированием (Wall Modeled LES – WMLES), позволяющий существенно сократить размер вычислительных сеток по сравнению с LES, что приводит к кардинальному уменьшению вычислительных затрат.

В тоже время, большинство практических приложений задач внешней аэродинамики не являются полностью турбулентными, а содержат области ламинарного течения и участки ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП). Для расчета таких течений в рамках WMLES необходимо тем или иным образом создавать разрешенные турбулентные пульсации на входе в LES область, т.е. в области ЛТП, что существенно усложняет технологию расчета. Этого можно избежать в том случае, когда ЛТП является отрывным (отрыв ламинарного пограничного слоя с последующим присоединением турбулентного потока), поскольку неустойчивость Кельвина-Гельмгольца в оторвавшемся слое смешения приведет к развитию разрешенных турбулентных возмущений. Это открывает возможность расчета таких течений с использованием единой WMLES модели во всей области, однако при этом необходимо обеспечить «правильное» ее функционирование во всем течении, включающем ламинарный участок, переходную область и турбулентный поток. Настоящая работа посвящена разработке именно такой WMLES модели.

Поскольку модель «активна» во всем потоке, для правильного описания отрывного ЛТП она должна предсказывать нулевую

турбулентную вязкость в области ламинарного течения и на переходном участке, а после появления разрешенных турбулентных пульсаций (в турбулентной области) удовлетворять требованиям к традиционным WMLES моделям.

Предлагаемая модель базируется на недавно предложенной авторами настоящей работы алгебраической WMLES модели aWM- σ [1], в которой турбулентная вязкость рассчитывается путем взвешивания RANS и LES вязкостей $\nu_t = f_{sw}\nu_{t,RANS} + (1 - f_{sw})\nu_{t,LES}$. Весовая функция f_{sw} построена таким образом, чтобы «переключить» модель в RANS режим в пристеночной части потока, где расчетная сетка недостаточно подробно для LES расчета, и определяется выражением $f_{sw} = e^{-\left(\frac{C_{w1}d_w}{h_{max}}\right)^{C_{w2}}}$ (h_{max} — максимальная длина ребра ячейки, d_w — расстояние до ближайшей стенки, $C_{w1}=2.45$ и $C_{w2}=2.0$ — эмпирические константы, значения которых были подобраны при решении задачи об установившемся турбулентном течении в плоском канале). В LES подобласти для вычисления $\nu_{t,LES}$ используется подсеточная модель σ [2], а в RANS подобласти применяется модель Прандтля $\nu_{t,RANS} = f_{wd}(0.41d_w)^2S$, где S — инвариант тензора скоростей деформации, а функция f_{wd} необходима для описания профиля скорости в буферной области между вязким подслоем и логарифмическим участком. Эффективность этой модели при расчете установившегося течения в канале продемонстрирована на рис. 1 ниже.

Причиной выбора модели aWM- σ в качестве основы для разрабатываемой модели является то, что эта модель обеспечивает нулевую турбулентную вязкость в LES подобласти вплоть до возникновения разрешенных турбулентных структур за счет использования подсеточной σ модели в этой подобласти. Таким образом, для описания течений с ЛТП необходимо модифицировать модель aWM- σ таким образом, чтобы она предсказывала нулевую турбулентную вязкость в RANS подобласти вверх по потоку от положения ЛТП. Для этого необходим локальный безразмерный критерий, позволяющий однозначно определить, находится ли точка в ламинарном пограничном слое вверх по потоку от ЛТП или в турбулентном пограничном слое вниз по потоку от него. К сожалению, такого критерия сформулировать не удалось.

Наиболее эффективным оказался безразмерный критерий $\bar{D}_\sigma = \min\left(\frac{25D_\sigma}{\sqrt{0.5(S^2 + \Omega^2)}}, 1\right)$ (Ω - модуль тензора завихренности), осно-

ванный на использовании оператора σ модели D_σ [2], который позволяет однозначно определить наличие турбулентного контента в LES подобласти, однако в RANS подобласти он недостаточно эффективен. Для передачи информации о наличии турбулентного контента из LES подобласти в RANS подобласть был использован прием, применявшийся в модели ЛТП γ - Re_θ [5], заключающийся в использовании дополнительного уравнения переноса, в котором значительный вклад вносит диффузионное слагаемое.

Турбулентная вязкость в итоговой модели, aWM- σ - D_σ , вычисляется по формуле $\nu_t = \nu_{t,RANS} f_{sw} I_{LT} + \nu_{t,LES} (1 - f_{sw})$, где $I_{LT} = \tanh((\min(10 \cdot \phi, 10))^2)$, а для определения величины ϕ используется следующее уравнение переноса

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(10 (\nu_t + \nu) \frac{\partial \rho \phi}{\partial x_i} \right) + S \cdot F \left(\phi, \tilde{D}_\sigma, \frac{d_w}{h_{max}}, \frac{\nu_t}{\nu} \right).$$

Для тестирования предложенной модели aWM- σ - D_σ были рассмотрены три задачи. Первая из них представляет собой периодическое полностью турбулентное течение в плоском канале при разных числах Рейнольдса (рис. 1). Видно, что результаты, полученные с использованием модифицированной модели, совпадают с результатами оригинальной модели aWM- σ и хорошо согласуются с экспериментальной корреляцией.

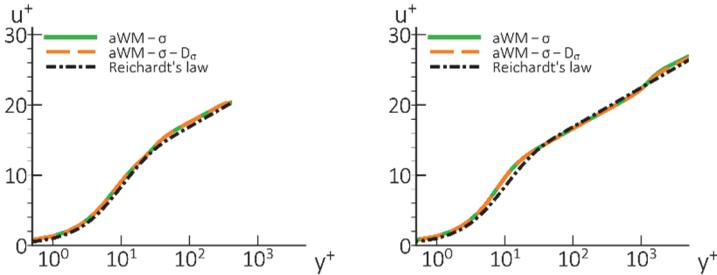


Рис. 1. Сравнение профилей скорости для периодического течения в плоском канале при $Re_\tau=395$ (слева) и $Re_\tau=18000$ (справа), полученных с использованием моделей aWM- σ и aWM- σ - D_σ , с эмпирической корреляцией

Кроме того, было рассмотрено два течения с отрывным ЛТП, на которые ориентирована разработанная модель, а именно течение в пограничном слое при наличии градиента давления [3] и обтекание профиля Erp1er-387 [4] при числах Рейнольдса

$Re_c=(1-3)\cdot 10^5$ и нулевом угле атаки. Видно, что для обоих течений результаты, полученные с использованием модели aWM- σ - D_σ , хорошо согласуются с референсными данными, а модель aWM- σ существенно искажает решение на ламинарном участке, что приводит к смещению ЛТП вниз по потоку (см. рис. 2).

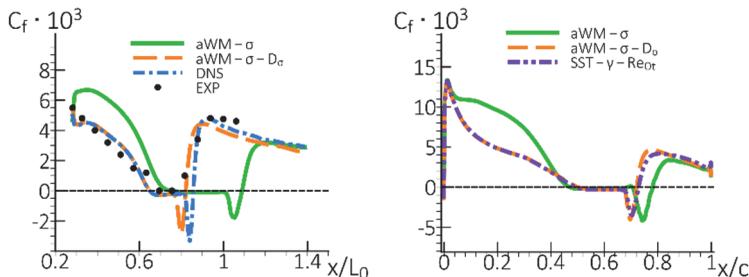


Рис. 2. Сравнение коэффициента трения в пограничном слое с градиентом давления (слева) и на крыловом профиле Eppler-387 (справа), рассчитанного с использованием моделей aWM- σ и aWM- σ - D_σ , с результатами эксперимента, DNS и модели ЛТП [5]

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбПУ (соглашение № 075-15-2022-311 от 20.04.2022 г.) с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра СПбПУ «Политехнический».

Литература

1. Menter, F. et al. A Family of Wall-Modeled Large Eddy Simulation Formulations // 14th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements. 2023, Barcelona, Spain.
2. Nicoud, F., Toda, H.B., Cabrit, O., Bose, S., Lee, J. Using singular values to build a subgrid-scale model for large eddy simulations. Physics of Fluids, 2011, V. 23.
3. Volino R.J., Hultgren L.S. Measurements in Separated and Transitional Boundary Layers Under Low-Pressure Turbine Airfoil Conditions // Journal of Turbomachinery, 2001, V. 123. pp. 189–197.

4. Mcghee W., Betty S., Millard B.F. Experimental Results for the Eppler 387 airfoil at Low Reynolds Numbers in the Langley Low-Turbulence Pressure Tunnel, Technical Memorandum (TM) October 1988. 234 p.
5. Langtry, R.B., Menter, F.R., Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes // AIAA Journal, 2009, V. 47, N. 12.