

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен»

Курс лекций «Модели физико-химической ГГД и турбулентности.
Вихреразрешающие подходы»
(http://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/SRS_methods)

Лекция 3

Гибридные методы

Гарбарук Андрей Викторович (agarbaruk@mail.ru)
2019 г.

Содержание

1. Что такое гибридные подходы?
 - Почему они появились
 - Нестационарные уравнения Рейнольдса (НЕ гибридный подход)
2. Основные понятия
 - Разделение на RANS и LES подобласти
 - Гибридная схема
 - Серая область
 - LES с пристенным моделированием (WMLES)
 - Встроенный LES (E-LES)
 - Создание турбулентного контента
3. Обзор гибридных методов
 - Методы семейства DES
 - SAS и другие RANS модели с LES свойствами
 - WMLES модели
 - Другие (мало используемые) методы

Что такое гибридные подходы?

LES пристенных течений

- При приближении к стенке размер характерных вихревых структур уменьшается пропорционально расстоянию до стенки
 - Пропорционально должен уменьшаться шаг сетки
 - Для точного воспроизведения профиля скорости в пограничном слое при существенных числах Рейнольдса это ведет к гигантским вычислительным затратам
- В 2000 году Спаларт оценивал затраты на LES самолета без деталей

Необходимое число узлов сетки	Необходимое число шагов по времени	Готовность
$10^{11.5}$	$10^{6.7}$	2045

- Современные оценки еще более пессимистичны
- Единственный выход - использовать LES только в части области
 - В остальной части расчетной области использовать более экономичные методы
 - ✓ RANS (URANS)

Гибридные методы

Методы, объединяющие преимущества RANS и LES

RANS

Высокая точность расчета
пристенных течений при
скромных требованиях к сетке

LES

Высокая точность расчета
отрывных течений



Гибридные методы

Компромисс:

Позволяют получать достаточно точные результаты для
сложных (в первую очередь отрывных) течений при приемлемых
затратах

Вычислительные ресурсы и перспективы практического
применения различных методов моделирования
турбулентных течений
(P. Spalart, 2000)

Метод	Необходимое число узлов сетки	Необходимое число шагов по времени	Готовность
2D Steady RANS	10^5	$10^{3.5}$	1980
3D Steady RANS	10^7	10^3	1985
3D Unsteady RANS	10^7	$10^{3.5}$	1995
DES (гибридный метод)	10^8	10^4	2000
LES	$10^{11.5}$	$10^{6.7}$	2045
DNS	10^{16}	$10^{7.7}$	2080

Условия корректного использования LES (1/2)

1. Достаточно мелкая сетка

- Волновое число, соответствующее шагу сетки Δ , лежит в инерционном интервале
 - Как правило, для этого надо разрешать не менее 80% кинетической энергии
 - ✓ Отношение разрешенной и модельной энергий можно использовать для автоматической адаптации сеток
- Вытянутость ячеек сетки соответствует статистической анизотропии вихрей размера Δ
 - Обычно (за исключением областей с большими градиентами скорости) вихри изотропны

2. Низкодиссипативная расчетная схема

- Схема для LES должна проходить тест «Вырождение однородной изотропной турбулентности»

3. «Правильная» подсеточная модель

- При измельчении сетки подсеточная вязкость удовлетворяет условию $\nu_t \sim \varepsilon^{1/3} \Delta^{4/3}$
 - Константа обычно подбирается так, чтобы в задаче о вырождении однородной изотропной турбулентности спектр удовлетворял закону «-5/3»

Условия корректного использования LES (2/2)

4. Наличие разрешенных турбулентных пульсаций

- В зависимости от рассматриваемой задачи они могут
 - задаваться на входной границе
 - возникать за счет неустойчивости потока
 - ✓ В обоих случаях существует область перестройки пульсаций, в которой точность LES падает

Эти условия должны выполняться в LES областях гибридных подходов

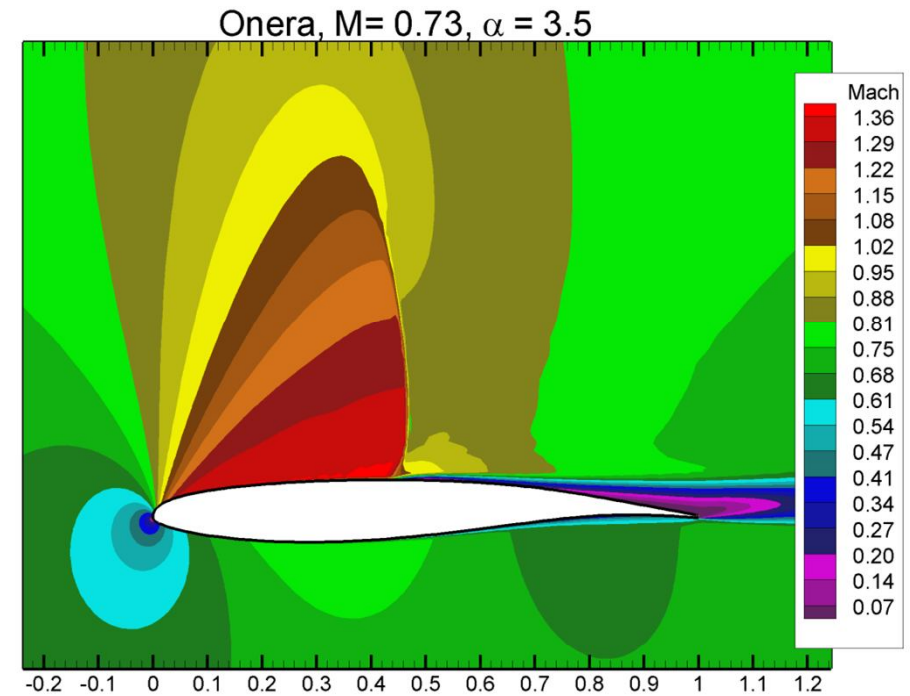
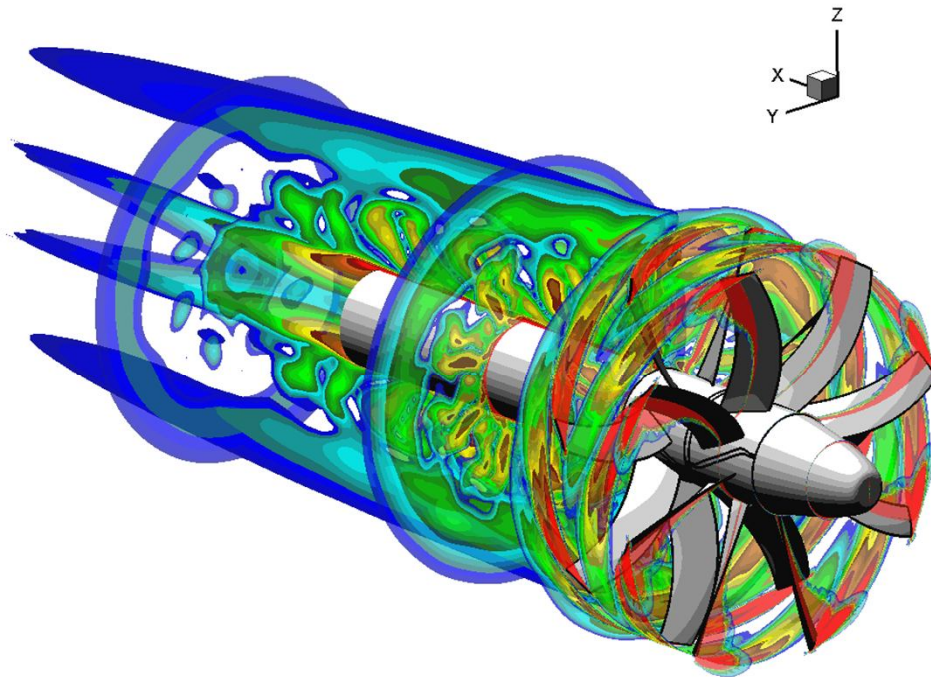
Нестационарные уравнения Рейнольдса

Unsteady RANS (URANS)

- Метод решения нестационарных уравнений Рейнольдса **НЕ ЯВЛЯЕТСЯ** гибридным методом и вихреразрешающим подходом
 - Используется та же модель турбулентности, что и для стационарных уравнений Рейнольдса
 - Зачастую можно получить нестационарное решение «с вихрями»
- Уравнения Рейнольдса получены из уравнений Навье-Стокса с использованием процедуры осреднения по времени $\bar{a}(t) = \frac{1}{2T} \int_{t-T}^{t+T} a(\tau) \cdot d\tau$
 - Для выполнения условий Рейнольдса период осреднения T должен быть намного больше максимального периода турбулентных пульсаций
 - Не всегда возможно подобрать такой период T , чтобы выполнялись условия Рейнольдса
- Применение нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS) не всегда обосновано
 - Тем не менее, этот подход широко распространен
 - ✓ Даже при невозможности «разделить» нестационарность и турбулентность: обтекание плохо обтекаемых тел

Примеры правомерного применения URANS

- Автоколебания скачка при трансзвуковом обтекании профиля (buffet)
- Обтекание турбовинтового двигателя



Пример сомнительного применения URANS

- Обтекание вращающегося профиля NACA0012

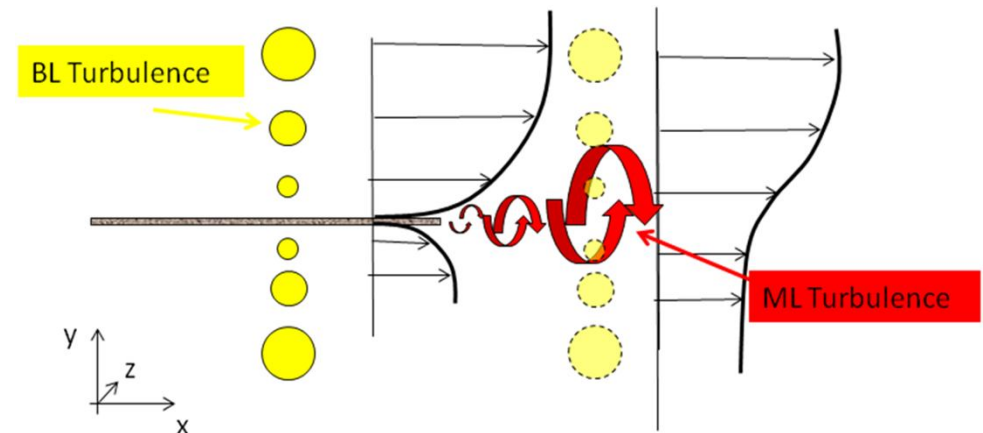


Основные понятия,
касающиеся гибридных подходов

Типы пристенных течений

С точки зрения применимости гибридных методов турбулентные течения можно разделить на следующие категории

- Неустойчивые течения
 - Обтекание плохообтекаемых тел
 - Даже в случае URANS получается нестационарное решение
 - ✓ Не требуются нестационарные граничные условия
 - ✓ Развитие «новой» турбулентности в отрывной зоне
- Устойчивые течения
 - Присоединенный пограничный слой
 - Самопроизвольное развитие разрешенных турбулентных структур невозможно
- Слабо неустойчивые течения
 - Слой смешения
 - Естественное развитие турбулентных структур возможно, но происходит очень медленно



В каждой категории течений есть специфические проблемы, которые надо решать в рамках гибридных методов

Способы разделения на RANS и LES области

При выделении LES подобласти необходимо обеспечить

- Достаточно подробную сетку, удовлетворяющую LES критериям
- Турбулентные пульсации на входной границе
 - Иногда в этом нет необходимости, поскольку пульсации возникают внутри LES области за счет внутренней неустойчивости

Способы разбиения на подобласти

- Вручную (зональные методы) – в каждой подобласти явно предписывается использование RANS или LES
 - Позволяют контролировать разделение на подобласти
 - Требуется подробная информация о структуре течения
 - ✓ В случае сложных течений их применение сильно затруднено
- Автоматически (глобальные методы) – весь расчет проводится с рамках единого гибридного подхода, функционирующего в разных режимах
 - Требуется формализация критерия
 - ✓ По расчетной сетке
 - соотношение шага сетки и расстояния до стенки (DES)
 - ✓ По решению
 - По наличию или отсутствию вихревых структур (SAS)
 - Лучшие из гибридных методов опираются на оба подхода
 - ✓ Все равно нет гарантии достаточно мелкой сетки в LES подобласти

Гибридные схемы

- Важно использовать подходящую схему
 - В RANS используются устойчивые противопоточные схемы
 - ✓ Эти схемы слишком диссипативны для LES
 - LES необходимо проводить с использованием низкодиссипативных схем
 - ✓ Они могут оказаться неустойчивыми в областях больших градиентов в RANS



- Необходимо использовать различные схемы в различных областях
 - В случае зональных методов задаются разные схемы для разных областей
 - В автоматических методах необходимо автоматическое переключение схем
 - ✓ «Взвешенные схемы»
 - ✓ Центральные-разностные схемы с ограничителями
 - В пакете FLUENT – BCD (bounded central differenced)

Серая область

- Какие уравнения решаются на границе RANS и LES областей?
 - В RANS подобласти используются уравнения Рейнольдса
 - ✓ получены осреднением по времени
 - В LES области используются отфильтрованные уравнения
 - ✓ получены осреднением по пространству (фильтрация)
 - Формально эти уравнения имеют одинаковый вид, но их смысл на границе RANS и LES областей неочевиден
- Хорошо ли разрешаются крупные вихри около границы областей?
 - В RANS области все турбулентные пульсации моделируются
 - В LES области большая часть пульсаций разрешается
 - В окрестности границы происходит взаимное влияние областей
 - ✓ В LES области разрешенные турбулентные пульсации подавляются за счет соседства со стационарной RANS областью
 - ✓ Конвективный перенос приводит к «сносу» RANS решения в LES область и наоборот
- В окрестности границы областей возникает проблемная область
 - Спаларт назвал ее «серая область» (grey area)

Проблема серой области

- Обеспечение «хорошего» решения в серой области - это основная проблема гибридных методов
 - Из-за разнообразия течений не существует универсального решения
 - ✓ Попытка решения проблемы «серой области» приводит к развитию гибридных подходов
- Проблема «серой области» может быть решена разными способами, например:
 - Можно поместить границу в малочувствительную область (DES)
 - ✓ Окрестность внешней границы пограничного слоя, в которой градиенты скорости сравнительно малы
 - Можно воспользоваться естественной неустойчивостью низкодиссипативных схем на больших градиентах (WMLES, IDDES)
 - ✓ «Серая область» расположена внутри пограничного слоя
 - Можно ввести искусственные пульсации на границе RANS-LES областей (RANS-LES interface, forcing)
 - ✓ Необходимо создать такие же пульсации, как в «истинной» турбулентности
 -

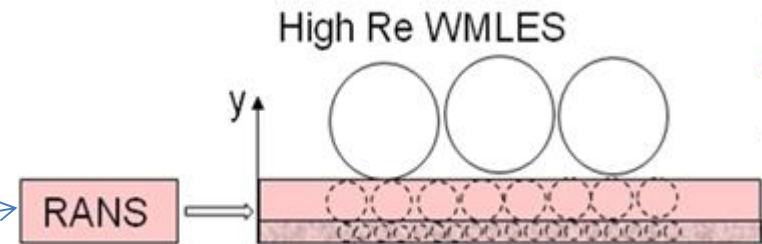
Пристенные течения

- Наиболее существенные затраты при проведении разрешенного до стенки LES приходятся на внутреннюю область пограничного слоя
 - Требуется сетка с характерными шагами $\Delta_x^+ = 40, \Delta_z^+ = 20$
 - Большинство RANS моделей турбулентности хорошо описывают эту область
- Естественное решение – использовать LES только начиная с некоторого расстояния от стенки
 - Метод DES (DDES) – весь пограничный слой находится в RANS подобласти
 - Методы, в которых LES область захватывает часть пограничного слоя называются WMLES (LES с пристенным моделированием)
 - ✓ Пристенные функции
 - ✓ Гибридный RANS-LES подход
 - Граница областей (серая область) расположена параллельно стенке внутри пограничного слоя

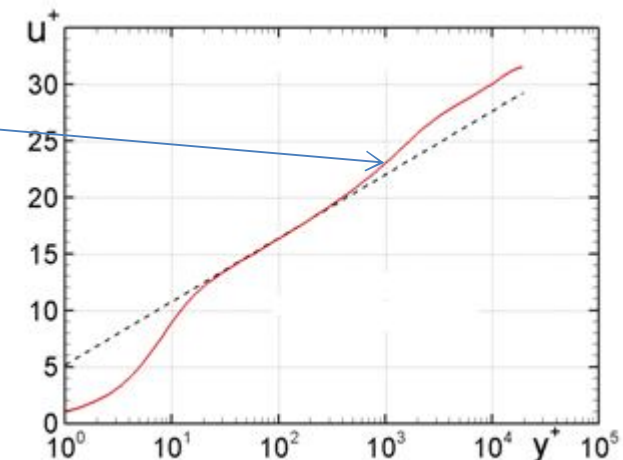
Метод моделирования крупных вихрей с пристенным моделированием Wall Modelled Large Eddy Simulation (WMLES)

- Расчетная сетка позволяет разрешить турбулентные вихри начиная с некоторого размера

- Размер вихря уменьшается при приближении к стенке
 - В пристенной области все вихри моделируются (RANS)



- Серая область попадает внутрь пограничного слоя
 - В ней недостаточны касательные напряжения (Modeled Stress Depletion – MSD)
 - ✓ При неблагоприятном градиенте давления это может привести к отрыву (Grid Induced Separation – GIS)
- В WMLES моделях требуются специальные меры для предотвращения MSD

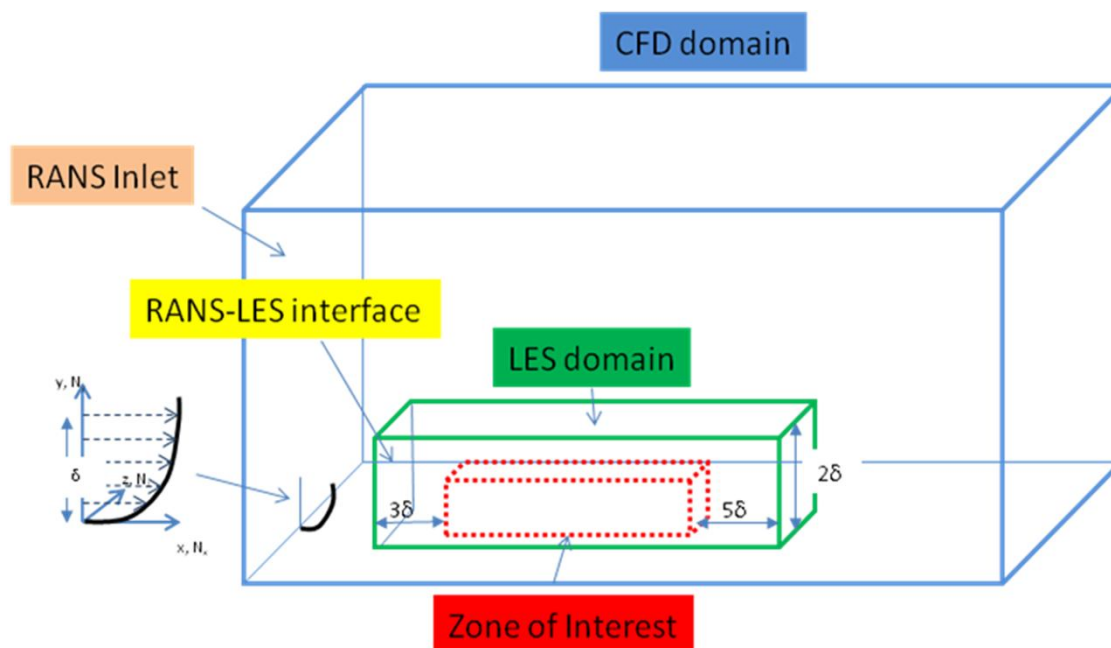


Встроенный LES

Embedded LES (E-LES)

В этом методе вокруг **интересующей зоны** течения строится **LES область**, которая встроена в **область RANS**

- В LES области может использоваться как разрешенный до стенки LES, так и WMLES
- Граница между RANS и LES областями может быть по разному ориентирована
 - Параллельно потоку
 - Переход от LES к RANS
 - Переход от RANS к LES
 - ✓ Наиболее важная и сложная задача



Переход от RANS к LES

- Необходимо перевести RANS решение в LES решение:
 - В RANS области все напряжения моделируются
 - В LES области существенная часть напряжений разрешается
- Необходимо создать турбулентные пульсации на RANS-LES интерфейсе
 - Среднее по времени LES решение на RANS-LES интерфейсе должно соответствовать RANS решению:
 - ✓ Поля скорости и давления
 - ✓ Поля полных турбулентных напряжений
- Для создания турбулентных пульсаций на RANS-LES интерфейсе существует две группы методов:
 - Добавление турбулентных пульсаций к полю скорости, полученному из RANS решения
 - Использование нестационарного объемного источника в уравнениях движения

Существующие гибридные методы

Можно выделить следующие гибридные методы

- Методы семейства DES (Detached Eddy Simulation)
 - DES97
 - DDES (Delayed DES)
 - IDDES (Improved Delayed DES)
 - X-LES (eXtra-LES)
- «Расширенные» URANS модели (с возможностью разрешения крупных вихрей)
 - Scale Adaptive Simulation (SAS)
 - Turbulence Resolving RANS (TRRANS)
- Алгебраические WMLES модели
- Прочие гибридные методы (мало используются, поскольку обладают теми или иными существенными недостатками)
 - Partically Averaged Navier-Stokes (PANS)
 - Semi-Deterministic Method (SDM) или Organized Eddy Simulation (OES)
 - Very Large Eddy Simulation (VLES)
 - ...

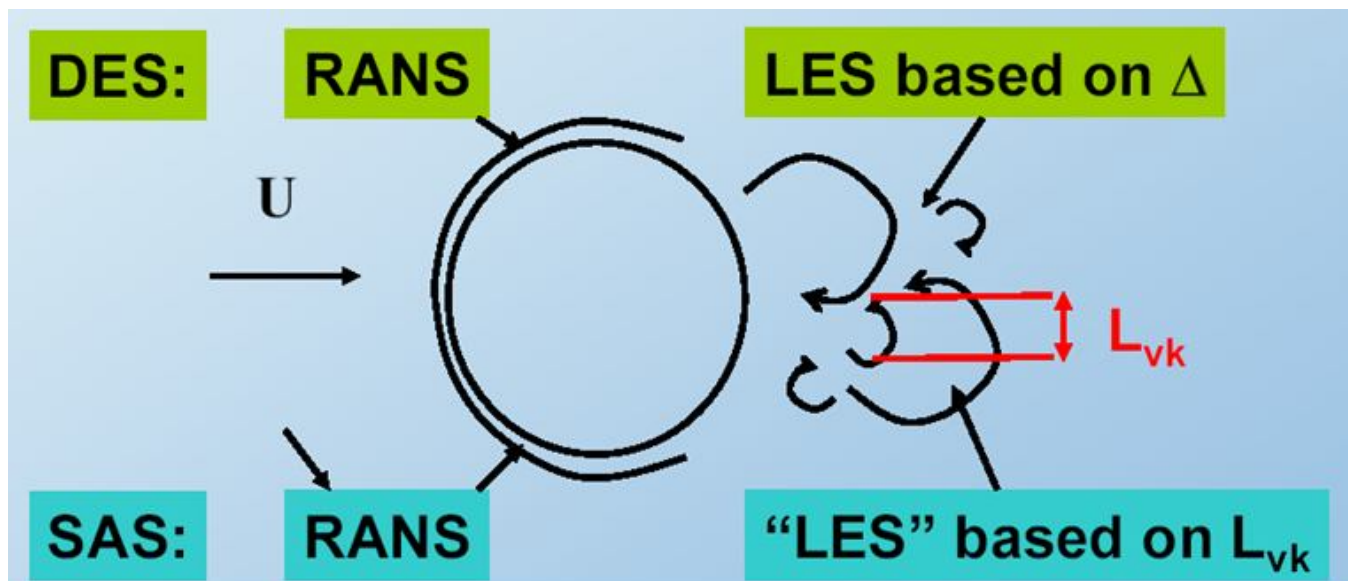
Метод моделирования отсоединенных вихрей

Detached Eddy Simulation (DES)

- Используется одна и также базовая RANS модель в RANS и LES модах
 - LES включается только в областях течения, где шаг сетки Δ достаточен для разрешения турбулентности ($\Delta \ll L_{turb}$)
 - RANS работает в остальной области течения ($\Delta > L_{turb}$)
- Для течений с обширной отрывной зоной это означает следующее
 - Область присоединенного пограничного слоя считается по RANS подходу, который обеспечивает хорошую точность в подобной ситуации
 - Отрывная область, с относительно крупными вихрями, рассчитывается в LES моде

Метод адаптивных масштабов Scale Adaptive Simulation (SAS)

- SAS основан на k - ω модели Ментера SST
- В уравнение для ω добавлен дополнительный источник
 - По замыслу, он активируется в том случае, когда в потоке имеются разрешенные пульсации
 - ✓ Характерный размер пульсаций – масштаб Кармана (von Karman) L_{vk}
 - Приводит к уменьшению турбулентной вязкости
 - ✓ Обеспечивает разрешение минимальных возможных масштабов



LES модели с пристенным моделированием

Wall Modelling LES (WMLES)

LES модели, пригодные для расчета пограничных слоев на сетках, недостаточных для разрешенного до стенки LES, называют WMLES.

Пример алгебраической WMLES модели на основе модели Смагоринского

$$\nu_t = (C_S \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \quad C_S = 0.2$$

- Для расчета пристенных течений модель необходимо модифицировать: изменить константу (C_S) или источник (S) (динамические модели, WALE)

- Другой возможный путь - изменить линейный масштаб

$$\Delta = \min \{ \max [C_w d_w, C_w h_{\max}, h_{wn}], h_{\max} \} \quad C_w = 0.15$$

- Такая модификация модели Смагоринского не требует изменения константы C_S в пограничном слое

- Для использования на более грубых сетках необходимо использовать сочетание с RANS моделью Прандтля

$$\nu_t = f_{Damp} \cdot (\min(\kappa \cdot d_w, C_S \Delta))^2 S \quad \kappa = 0.41$$

- $f_{Damp} = 1.0 - \exp\left(-\left(y^+ / 25\right)^3\right)$ - функция Piomelly (аналог функции van Driest)

- Получилась гибридная WMLES модель

- В пристенном слое RANS на основе модели Прандтля

- В остальной части пограничного слоя LES на базе модели Смагоринского

Другие гибридные подходы

Во всех этих подходах уравнения движения формально не отличаются от уравнений Рейнольдса, а замыкающая модель получается из соответствующей модели RANS модификацией констант и функций

- Модель перестает обеспечивать правильное поведение в погр. слое
- Partially Averaged Navier-Stokes (PANS) или Partially Integrated Transport Model (PITM)
 - Количество (%) разрешаемых пульсаций задается до начала расчета
 - ✓ Критерий задания количества разрешаемых пульсаций не очевиден.
- Semi-Deterministic Method (SDM) или Organized Eddy Simulation (OES)
 - Энергетический спектр разбивается на дискретную (когерентную) часть, соответствующую явно выраженным пикам, и непрерывную (некогерентную) часть, соответствующую хаотическому движению.
 - ✓ В моделях значение константы C_μ , уменьшено с 0.09 до 0.02÷0.05
- Very Large Eddy Simulation (VLES)
 - Демпфирование напряжений Рейнольдса (или турбулентной вязкости) в тех областях, где шаг сетки близок к колмогоровскому масштабу длины.
 - ✓ Обеспечение предельных свойств (DNS и RANS) не гарантирует перехода в LES в промежуточных режимах
 - ✓ При высоких числах Рейнольдса DNS не активируется даже на самых мелких сетках (измельчение шага сетки не оказывает влияния)

Резюме

- Гибрид RANS и LES наследует лучшие свойства каждого из методов
 - Гибридные методы обеспечивают разумный компромисс между точностью и вычислительными затратами

Однако

- Совместное использование столь разных подходов порождает целый спектр проблем
 - Эти проблемы по разному решаются в разных методах
- Использование гибридных методов требует как представления о структуре потока в решаемой задаче, так и понимания особенностей методов
 - Нет универсального рецепта выбора и применения гибридных методов