

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)

Входные условия для LES

Часть 1

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

Содержание

1. Встроенный LES

- Мотивация
- Переход от LES к RANS
- Переход от RANS к LES

2. Рециклиг

3. Метод синтетических вихрей (Synthetic Eddy Method - SEM)

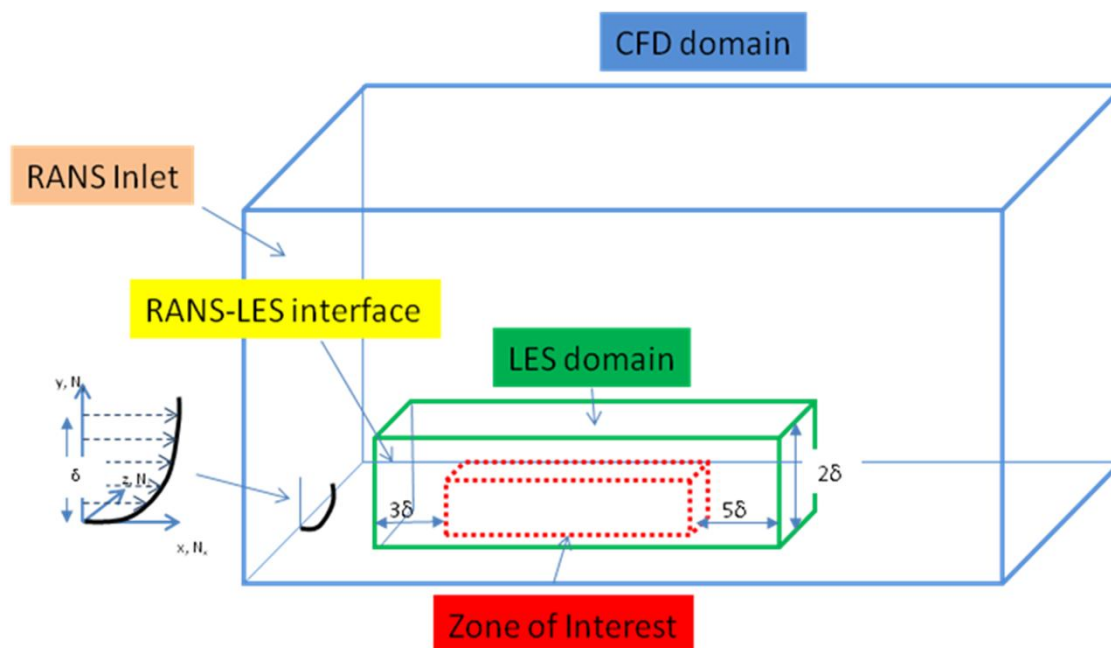
4. Метод вихрей (Vortex Method - VM)

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
- Проблема «серой области» зависит от взаимной ориентации границы между RANS и LES областями и направления потока
 - Параллельно потоку
 - Переход от LES к RANS
 - Переход от RANS к LES



Мотивация

Оценка размера сетки для полного WMLES

- Существуют различные эмпирические оценки

➤ Например, для пограничного слоя
$$N_{wm} = 54.7 \frac{L_z}{L_x} n_x n_y n_z \text{Re}_{Lx}^{2/7} \left[\left(\frac{\text{Re}_{Lx}}{\text{Re}_{x0}} \right)^{5/7} - 1 \right]$$

- Для крылового профиля эта оценка дает около 40 миллиардов!!!

➤ Удлинение $L_z/L_x=12$

➤ Количество точек внутри кубика со стороной, равной толщине ПС

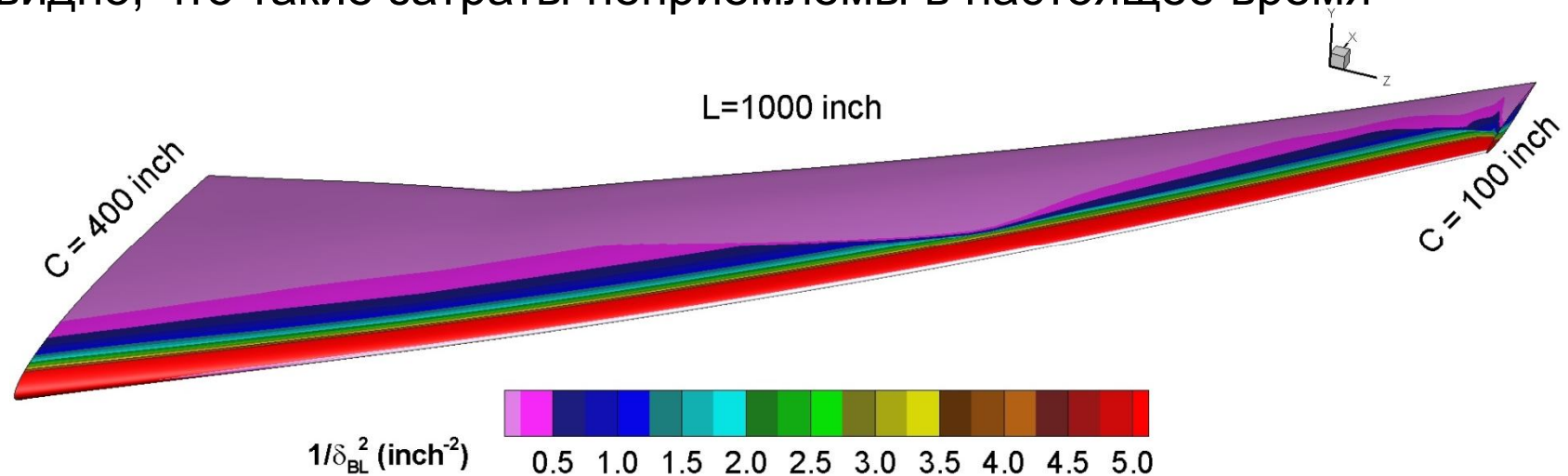
✓ $n_x \cdot n_y \cdot n_z = 10 \cdot 40 \cdot 20 = 8000$

➤ Число Рейнольдса $\text{Re}_{Lx}=5 \cdot 10^7$

➤ Число Рейнольдса перехода $\text{Re}_{x0}=5 \cdot 10^5$

➤ Две стороны

- Очевидно, что такие затраты неприемлемы в настоящее время



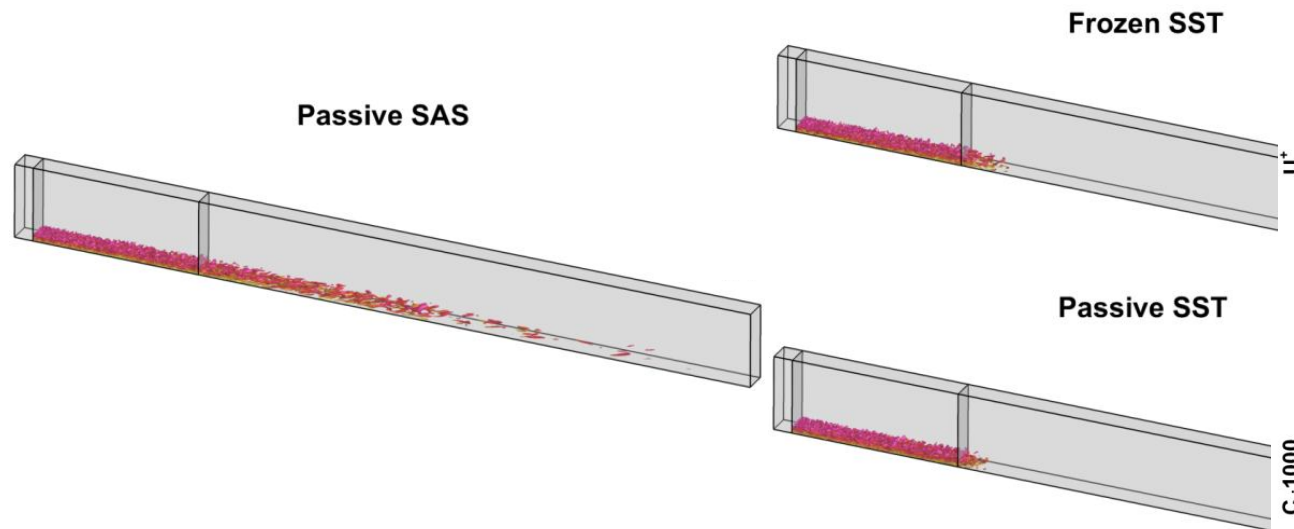
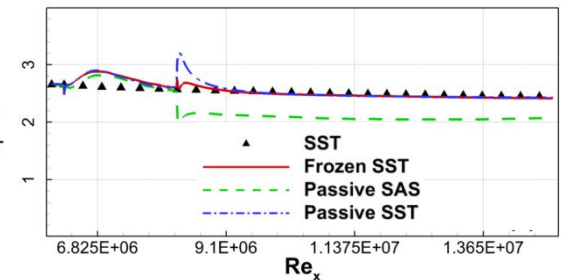
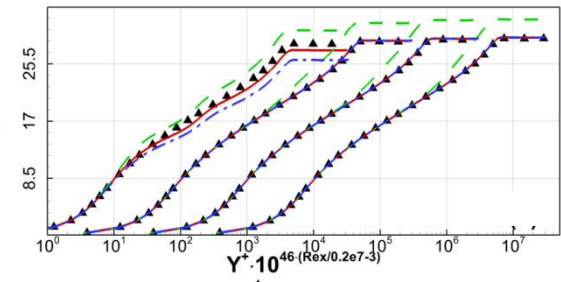
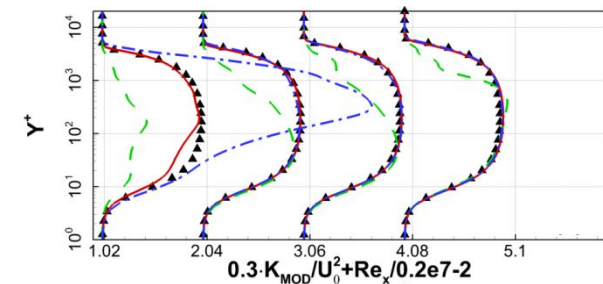
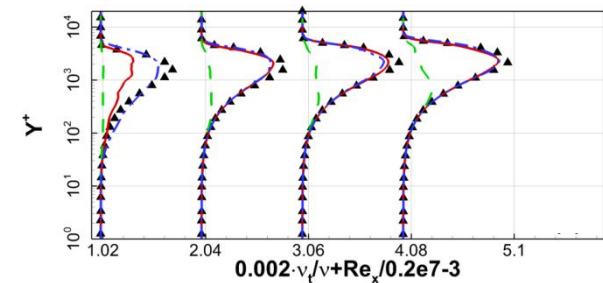
Переход от LES к RANS

Обычно не критичен, поскольку зона наибольшего интереса находится в LES области

- Необходимо решить 2 задачи
 - Восстановить турбулентные характеристики до RANS значений
 - «Избавиться» от разрешенных турбулентных пульсаций
 - ✓ При RANS вязкости и противопоточной схеме пульсации быстро затухнут сами
- Восстановление турбулентных характеристик напрямую из осредненных LES полей связано с разными технологическими проблемами.
 - Очень трудно реализовать при проведении совместного RANS-LES расчета (Embedded LES)
- Обычно используются более технологичные, но менее точные методы
 - «Пассивное» решение уравнений для турбулентных характеристик в LES области
 - ✓ Из-за наличия контента приводит к завышению турбулентной вязкости на входе в RANS область
 - Использование значений из предварительного RANS расчета
 - ✓ Его результаты могут заметно отличаться от средних LES значений на интерфейсе

Пример: пограничный слой при $Re_\theta=10000$

- В данном случае LES и RANS решения хорошо согласуются
 - Использование характеристик из предварительного RANS расчета дает наилучший результат
- Решение «пассивных» уравнений SST также хорошо согласуется с экспериментом
- SAS затягивает область перехода



Переход от RANS к LES

- Во всех вихреразрешающих подходах часть турбулентных структур (или даже все структуры) должны разрешаться
 - DNS
 - LES
 - Гибридные методы

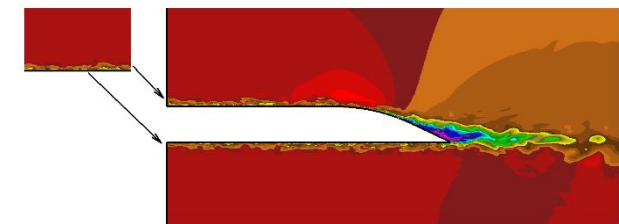
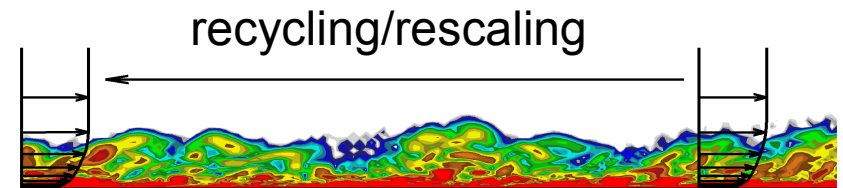
Как появляются турбулентные структуры?

- Во некоторых течениях это происходит за счет естественной неустойчивости (течения с массированным отрывом)
 - Неустойчивость может зависеть от вычислительных параметров
 - ✓ Расчетная сетка
 - ✓ Разностная схема
 - ✓ Глубина сходимости на итерациях на временном шаге
 - ✓ ...
- В других ситуациях турбулентные структуры необходимо создавать искусственно
 - На входе в расчетную область (граничные условия)
 - На границе RANS-LES областей
 - ✓ Встроенный LES (Embedded LES – ELES)

Способы создания турбулентного контента

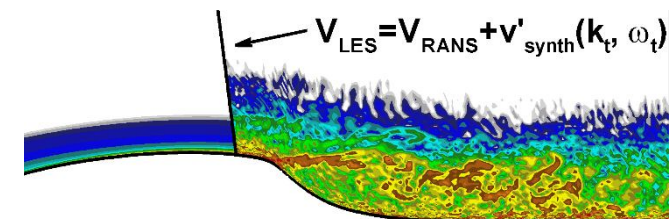
- На основе проводимого расчета

- Периодические граничные условия
 - ✓ Пригодны только для простейших периодических течений
- Рециклинг
 - ✓ Использование решения той же задачи в области вниз по потоку
- Вспомогательный расчет
 - ✓ Параллельное проведение независимого расчета более простой задачи
- Создание «базы данных» нестационарных пульсаций на основе расчета простейших течений



- Синтетическая генерация турбулентности

- Создание двумерных «вихрей» и их конвекция через входную границу
 - ✓ Метод синтетических вихрей (Synthetic Eddy Method - SEM)
 - ✓ Метод вихрей (Vortex Method - VM)
- Создание турбулентных пульсаций как суперпозиции пространственно-временных Фурье-мод



Способы задания пульсаций в расчете

- Входная граница расчетной области
 - ✓ Нестационарные граничные условия
- Встроенный LES (ELES)
 - Задание межблочных нестационарных граничных условий
 - ✓ Требуется явная разбивка на блоки
 - ✓ Возможно влияние возмущений вверх по потоку в RANS область
 - Необходимо использовать перекрывающиеся сетки, что не во всех кодах легко реализуемо
 - ✓ Существенные возмущения давления
 - Не годится для решения задач аэроакустики и аэроупругости
 - Необходимо использовать специальные методы подавления ложного шума
 - Использование нестационарного объемного источника
 - ✓ Более сложная задача
 - Необходимо задать такой объемный источник в уравнениях движения, чтобы получившиеся в ходе решения поля соответствовали «истинной» турбулентности
 - ✓ Потенциально более технологичен, чем граничные условия

Зависимость от расчетного кода

- Расчетные коды могут существенно различаться даже в рамках метода конечных объемов
 - Способ хранения данных
 - ✓ Cell-centred
 - ✓ Vertex based
 - Способ задания граничных условий
 - ✓ Задание значений в узлах
 - ✓ Задание потоков на гранях
 - Тип используемых сеток
 - ✓ Структурированные
 - ✓ Неструктурированные
 - Способ реализации многоблочности
 - ✓ С перекрытием (Chimera type grid)
 - ✓ Стык в стык
 - Возможность наличия «висящих» узлов
- Все эти особенности существенно влияют на реализацию метода
 - Реализация любого метода в новом коде – большая работа
 - Неудачная реализация даже очень хорошего метода может стать причиной плохих результатов

Примеры применения некоторых подходов

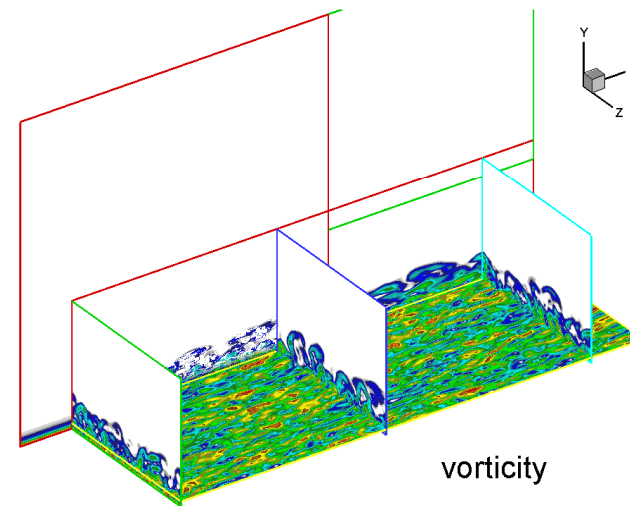
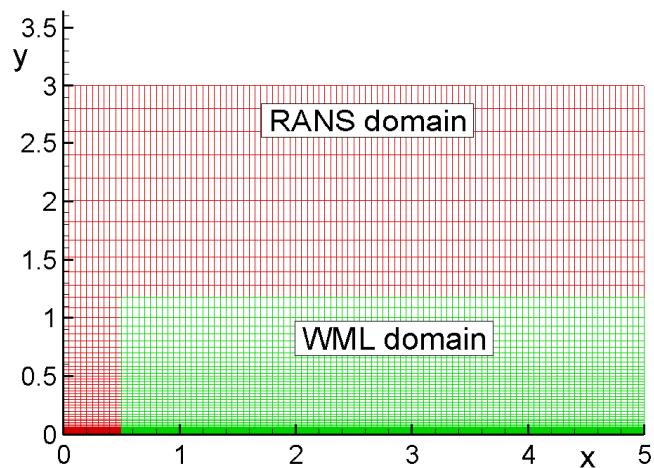
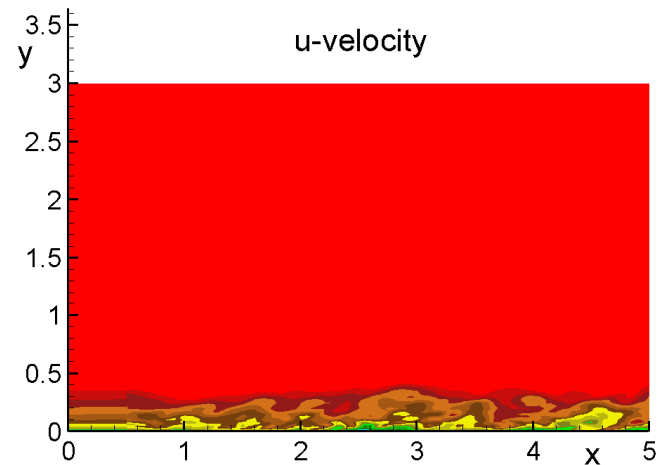
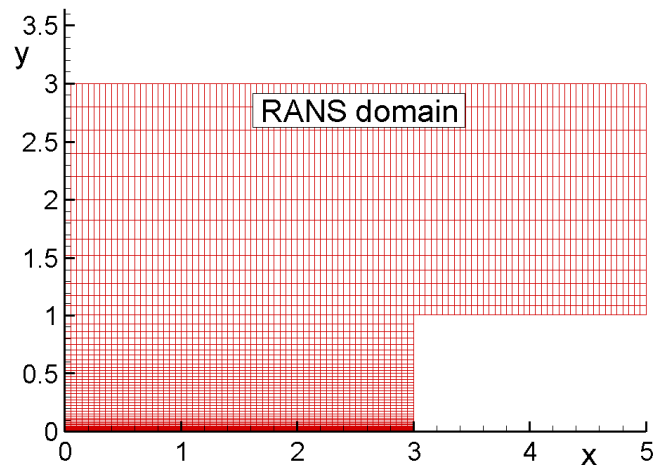
- Рециклиг
- Метод синтетических вихрей
(Synthetic Eddy Method - SEM)
- Метод вихрей
(Vortex Method - VM)
- Генератор синтетической турбулентности
(Synthetic Turbulence Generator - STG)

Рециклинг

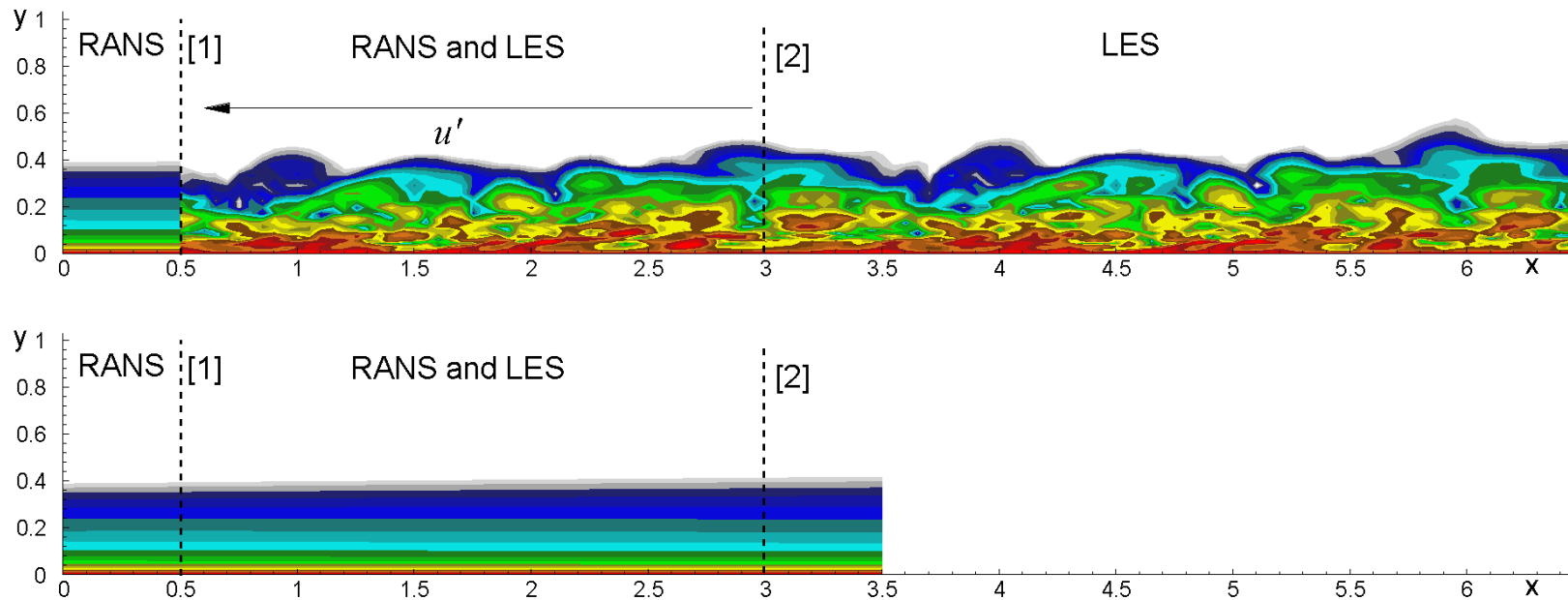
Рециклинг в рамках ELES

NTS код

- Структурированные многоблочные сетки с перекрытием

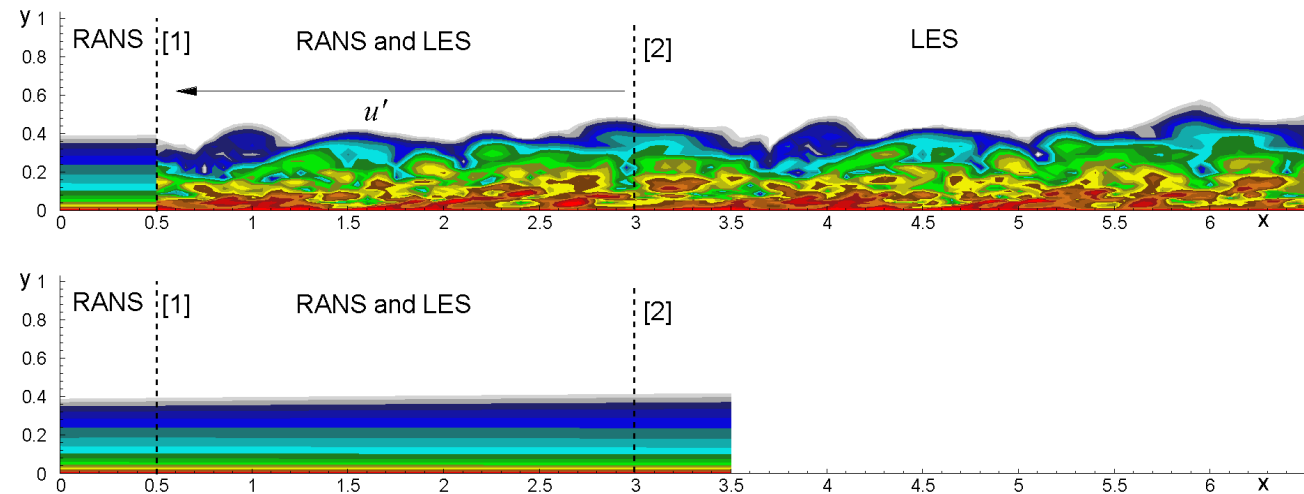


Рециклинг пограничного слоя



- **Задача**
 - Задать нестационарные граничные условия на входе в LES область (сечение 1)
- **Доступные данные**
 - RANS решение в сечении 1
 - LES и RANS решения в сечении 2
 - ✓ На некотором расстоянии от выходной границы RANS области
- **Необходимо учесть**
 - Толщины пограничных слоев в сечениях 1 и 2 отличаются
 - Осредненный по времени LES может не совпадать с RANS

Рециклинг пограничного слоя



Значение скорости на входе в LES область рассчитывается по следующим формулам

$$[u_{LES}(y)]_1 = [u_{RANS}(y)]_1 + [u'(y)]_1$$

$$[u'(y)]_1 = [u'(y/\beta(y))]_2 \cdot [\alpha(y)]_1 \quad [u'(y)]_2 = [u_{LES}(y)]_2 - [u_{RANS}(y)]_2$$

- $\beta(y)$ - коэффициент преобразования координаты
 - ✓ сжатие/растяжение профиля
- $\alpha(y)$ - коэффициент нормировки пульсаций
 - ✓ рассчитывается из условия равенства кинетической энергии турбулентности в LES и RANS областях в сечении 1

Особенности метода

- В данном алгоритме под пульсациями понимается величина

$$u'(y) = u_{LES}(y) - u_{RANS}(y)$$

➤ Это означает, что $\langle u'(y) \rangle = \langle u_{LES}(y) \rangle - u_{RANS}(y) \neq 0$

- Нормировка производится независимо

в 3 разных областях

- В каждой из трех подобластей $\alpha(y)$ рассчитывается одинаково по следующим формулам

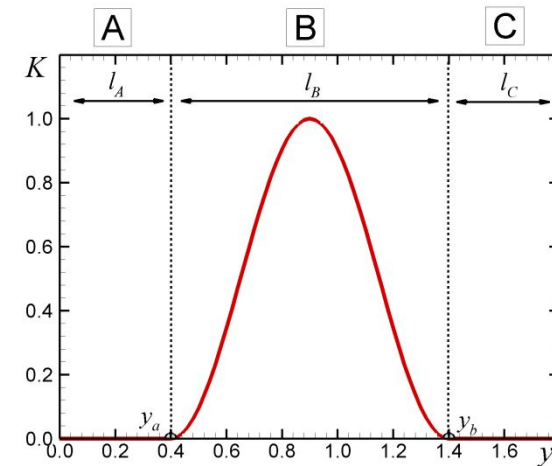
$$\alpha^2 = \max(E_{RANS} - E_{mod}, \varepsilon) / \max(E_{res}, \varepsilon)$$

$$E_{RANS}(y) = \int_{z_0-lz}^{z_0+lz} \int_{y_0}^y K_{RANS}(y, z) \cdot dz \cdot dy$$

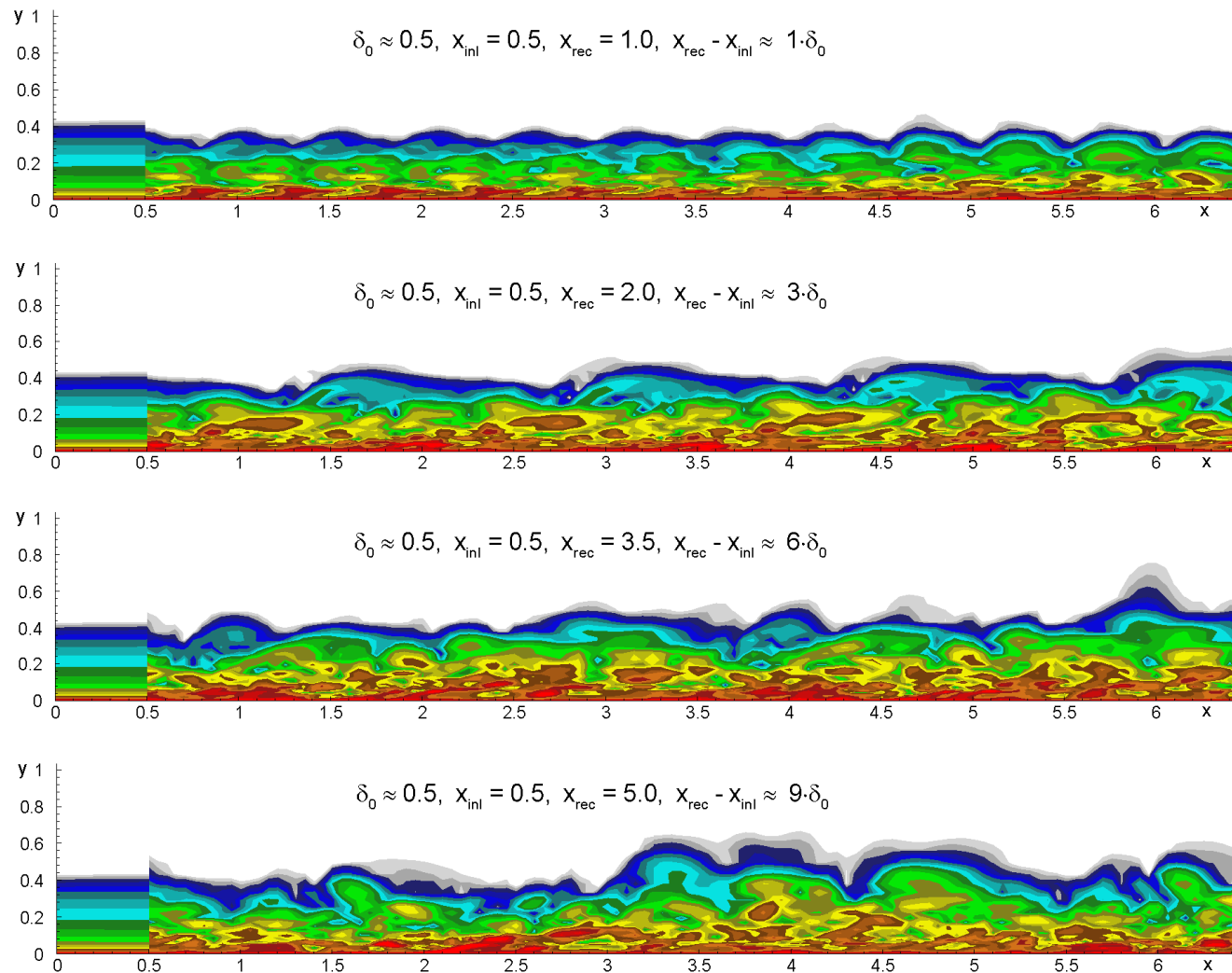
$$\varepsilon = 10^{-4} \cdot E_{RANS}$$

$$E_{LES,mod}(y) = \int_{z_0-lz}^{z_0+lz} \int_{y_0}^y K_{LES,mod}(y, z) \cdot dz \cdot dy$$

$$E_{LES,res}(y) = \int_{z_0-lz}^{z_0+lz} \int_{y_0}^y K_{LES,res}(y, z) \cdot dz \cdot dy$$

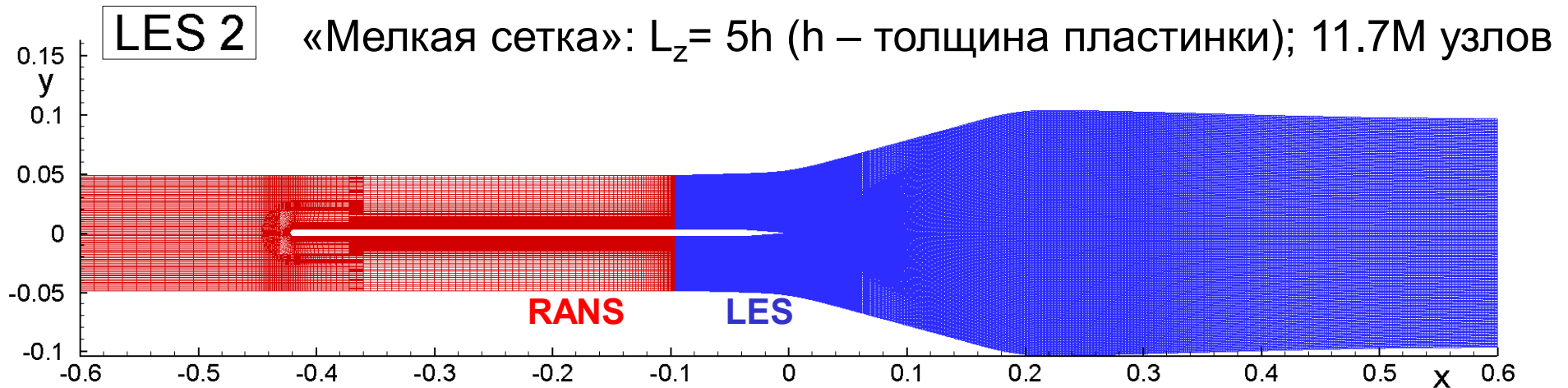
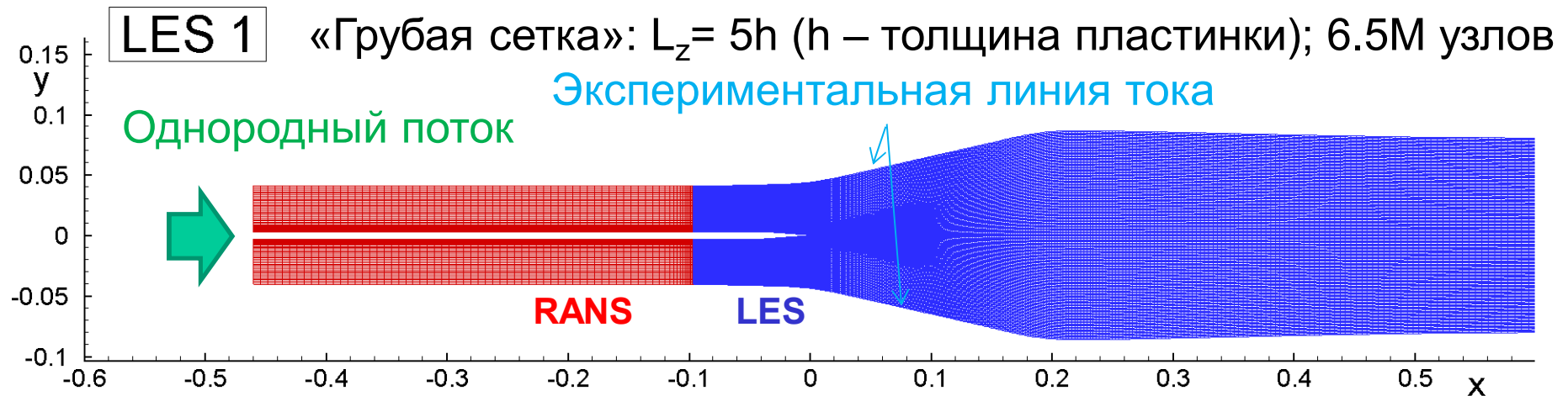


Влияние длины рециклинга

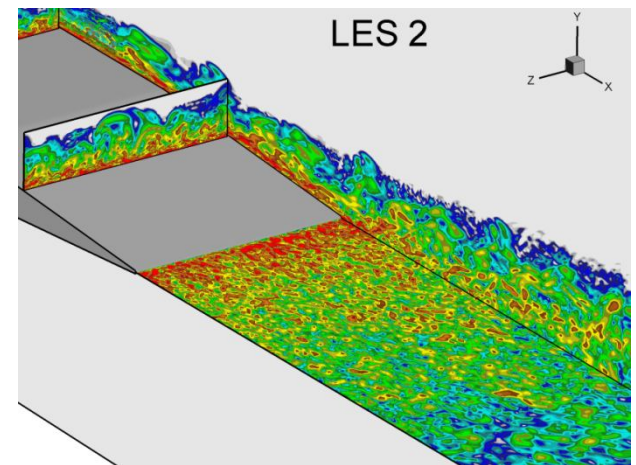
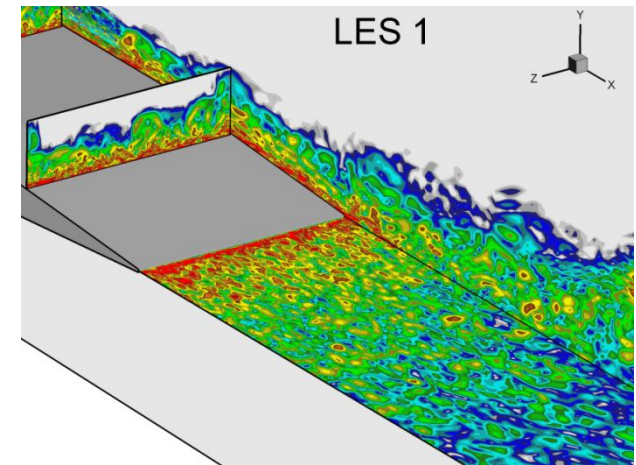
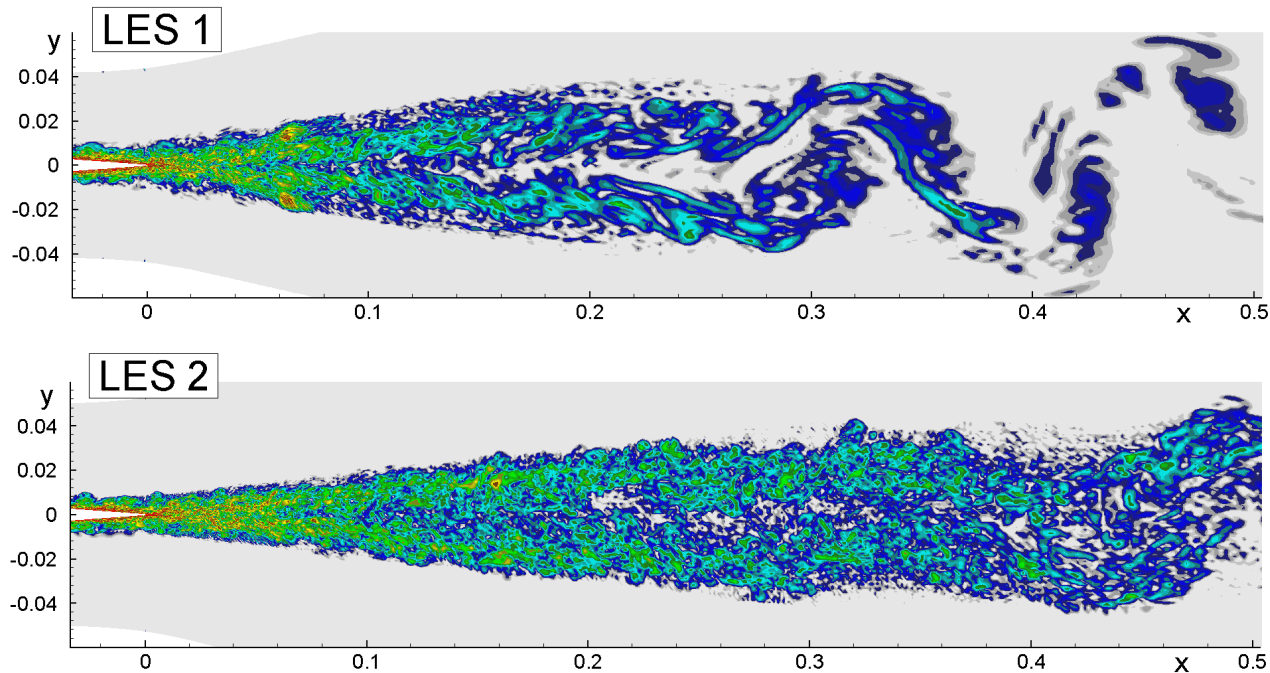


- При малых длинах видны соответствующие периодические структуры
- Длина рециклинга должна быть заметно больше самых крупных вихрей

Применение рециклинга: ближний след



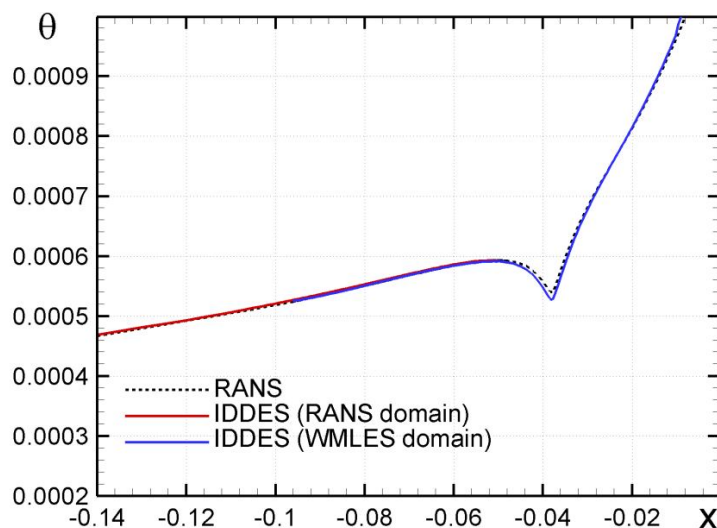
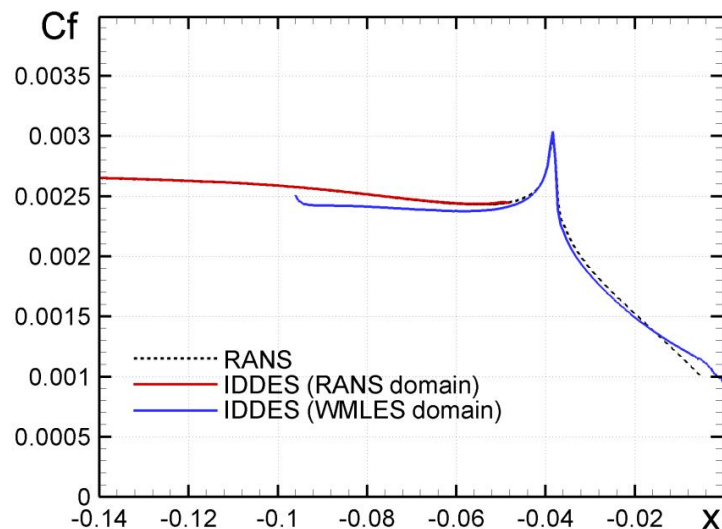
Применение рециклинга: ближний след



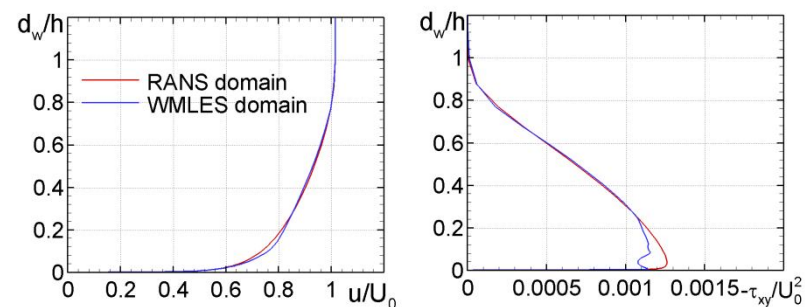
Картина течения: поля завихренности

- Мелкая сетка обеспечивает лучшее разрешение мелкомасштабной турбулентности
 - Это ведет к более позднему появлению крупных когерентных структур

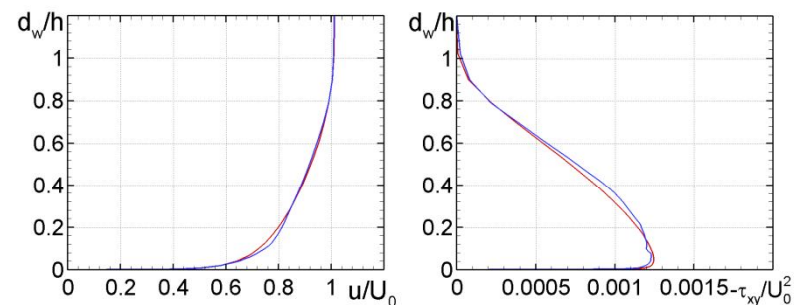
Применение рециклинга: ближний след



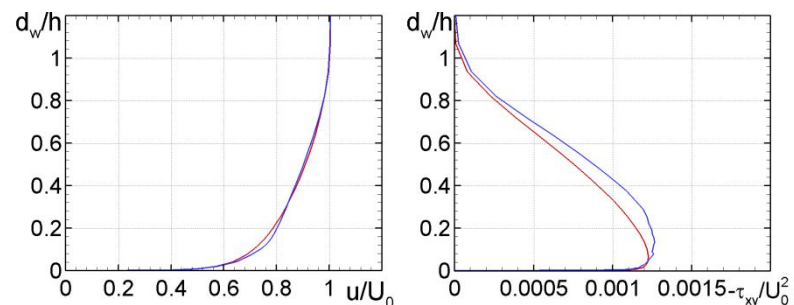
Зависимость коэффициента трения и
толщины потери импульса вдоль пластины



$x = -0.096$



$x = -0.078$

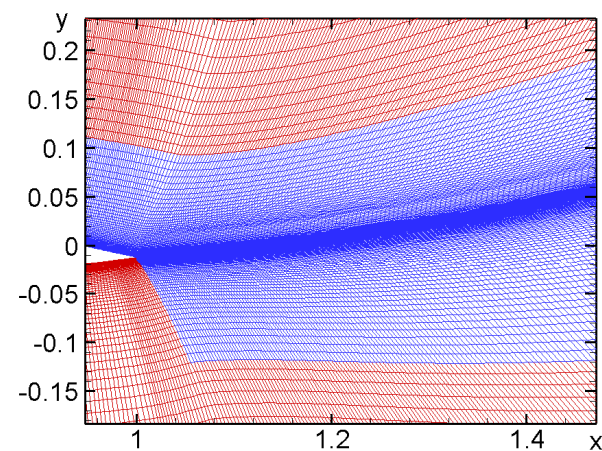
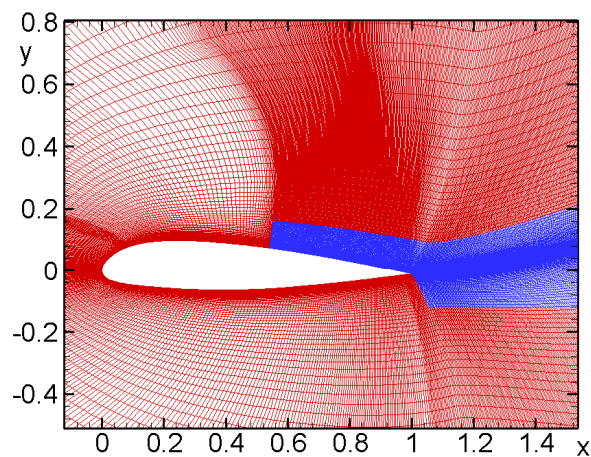
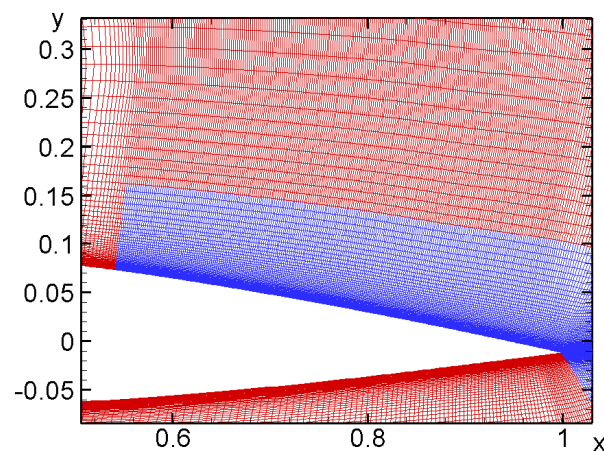
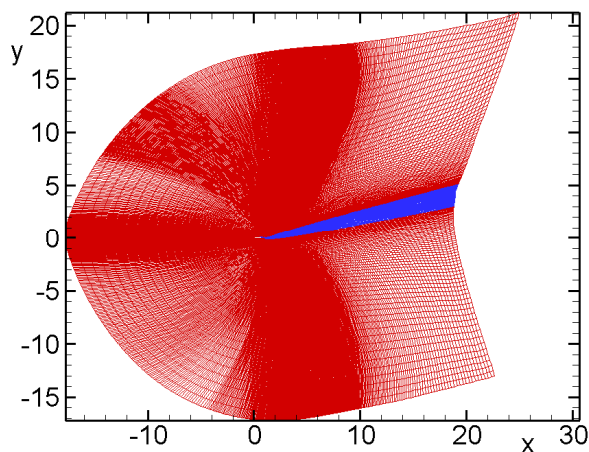


$x = -0.06$

Профили скорости в
перекрывающейся области

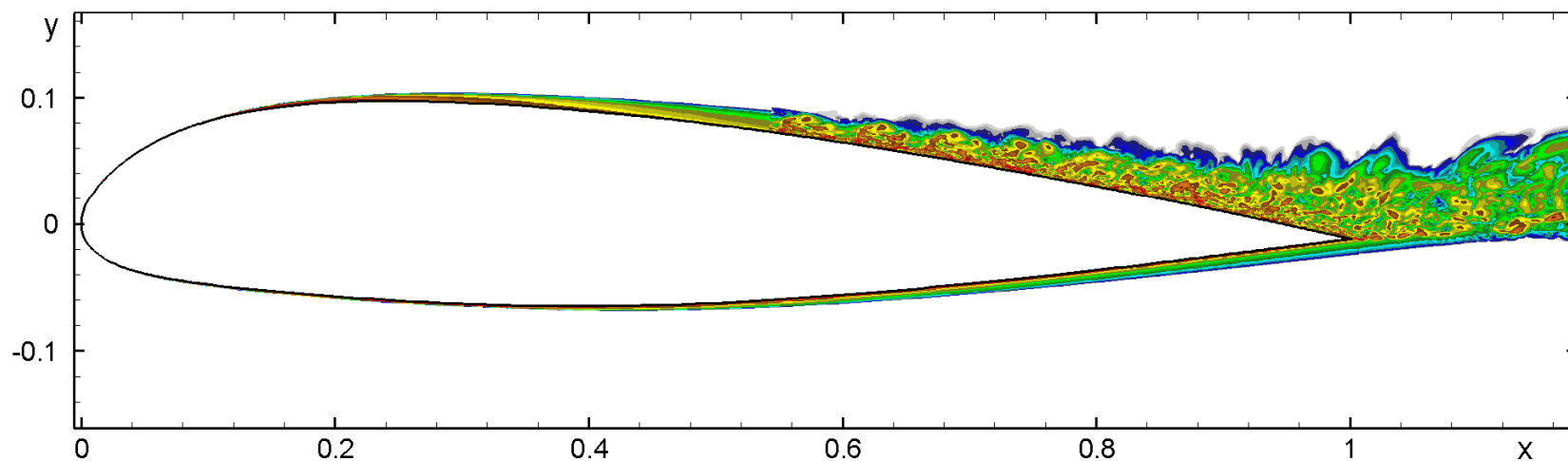
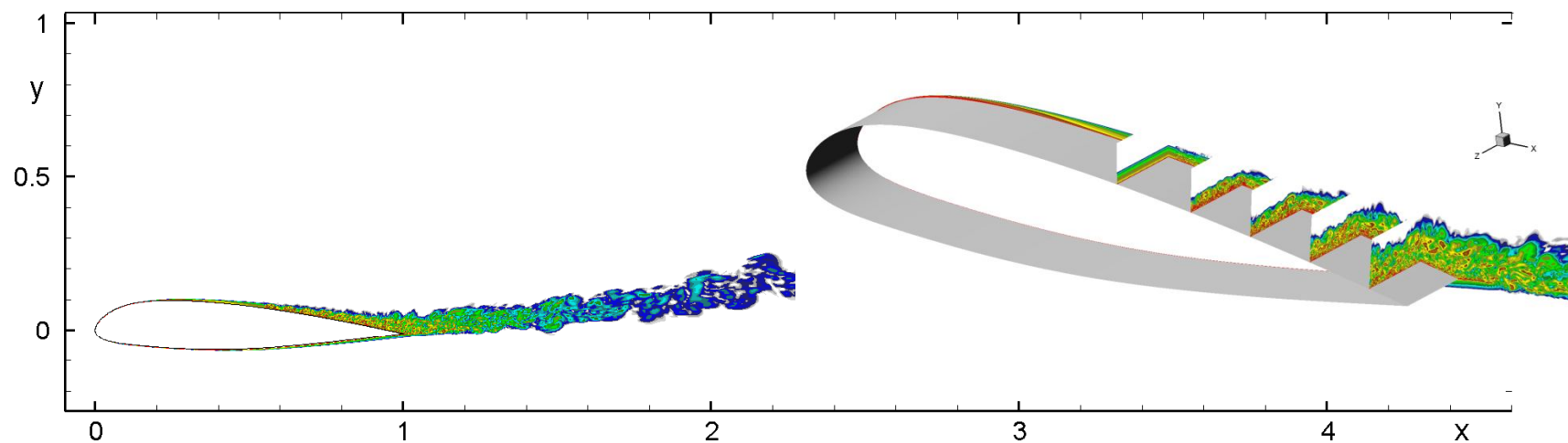
Применение рециклинга: ONERA A-airfoil

WMLES зона охватывает зону отрыва и след



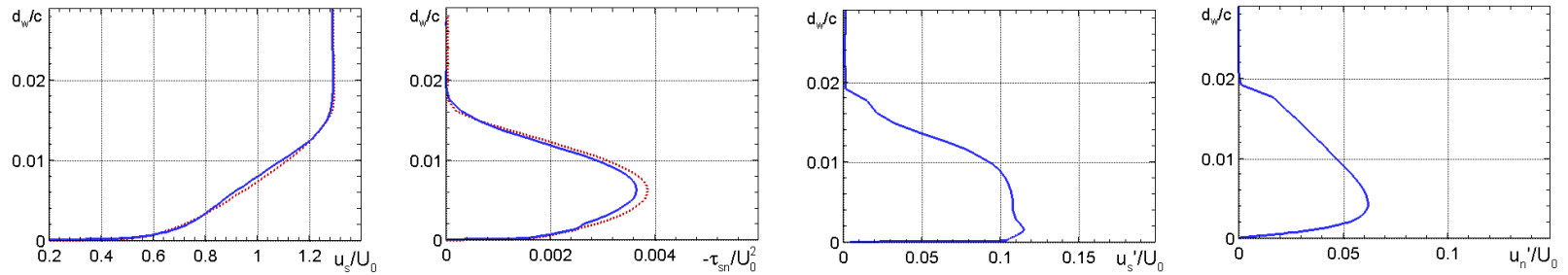
Сетка и разделение на RANS и WMLES зоны

Применение рециклинга: ONERA A-airfoil

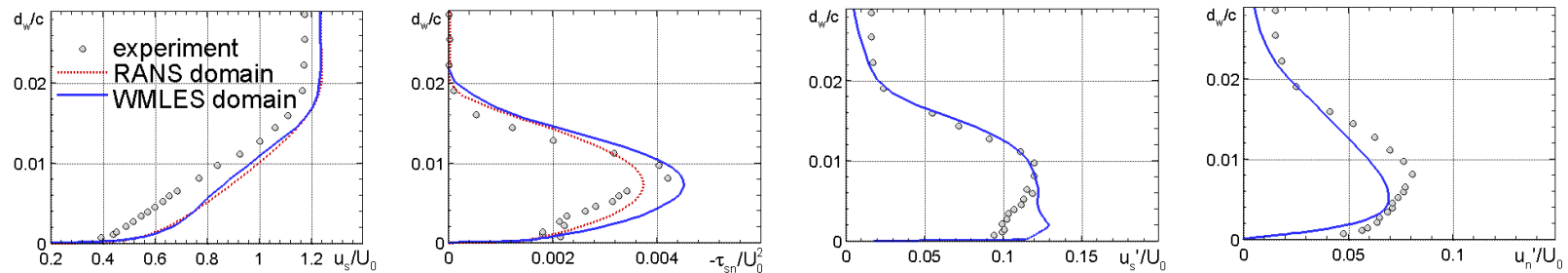


Общая картина течения

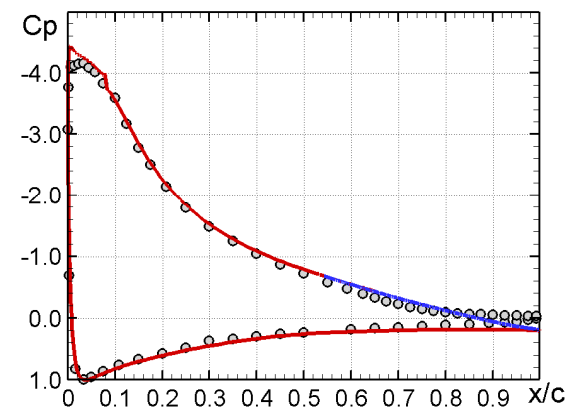
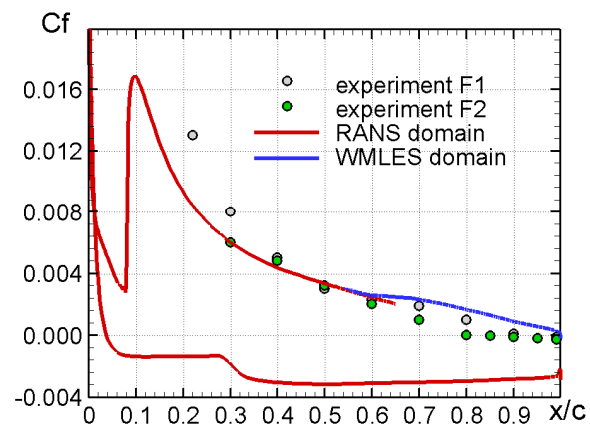
Применение рециклинга: ONERA A-airfoil



$x/c = 0.54$

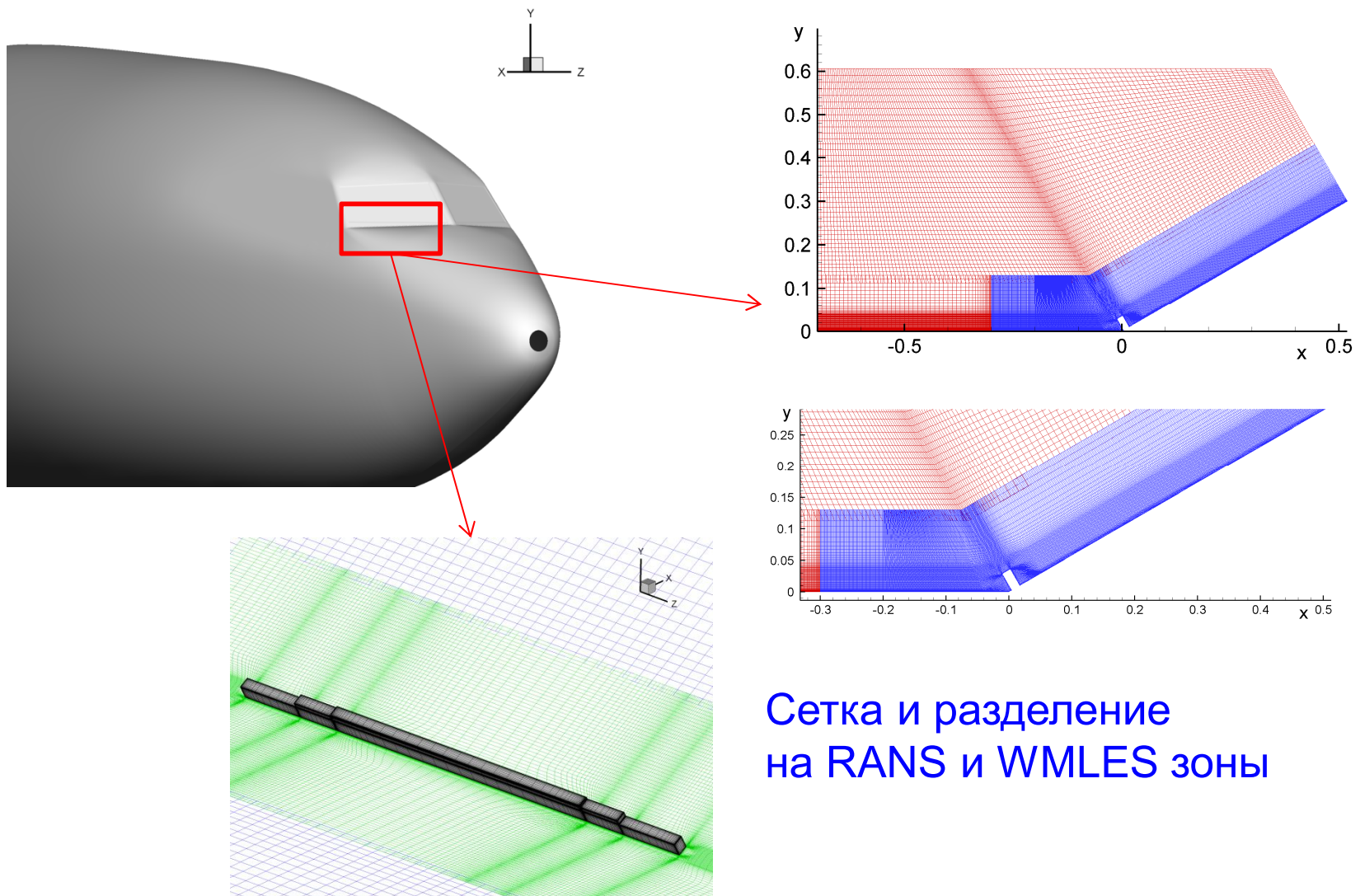


$x/c = 0.6$



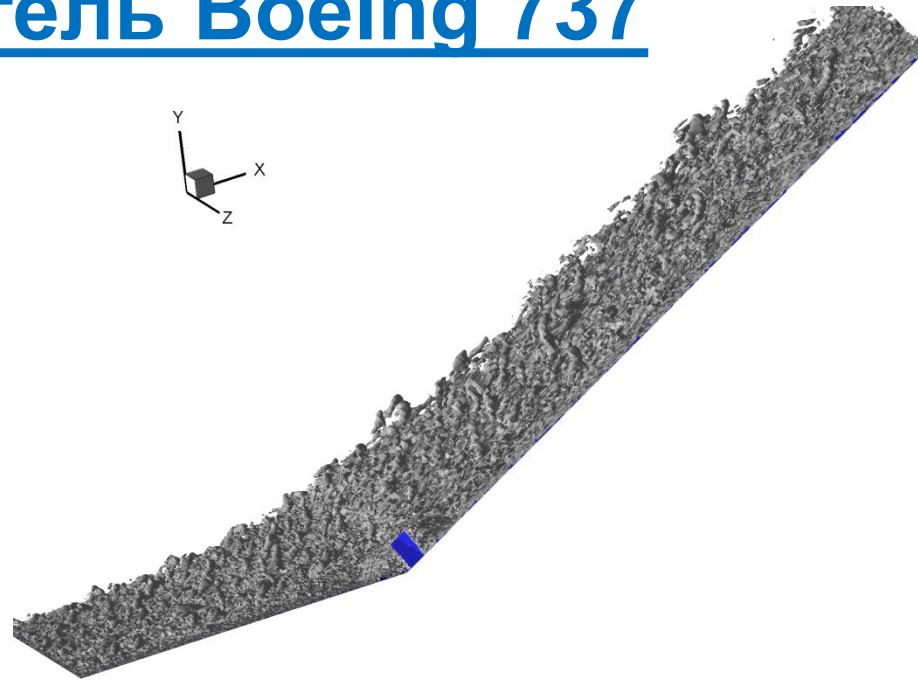
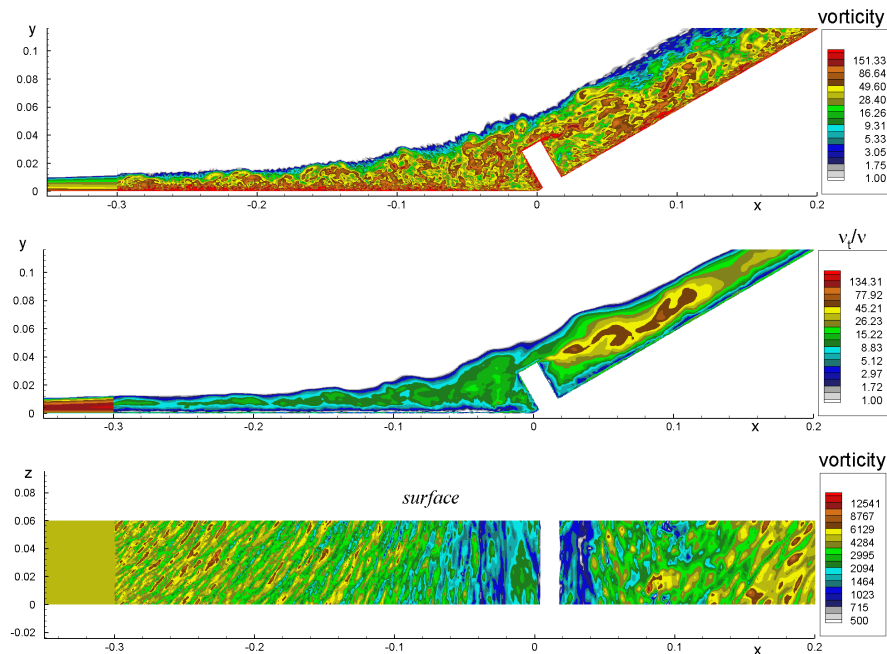
Сравнение с экспериментом

Применение рециклинга: стеклоочиститель Boeing 737



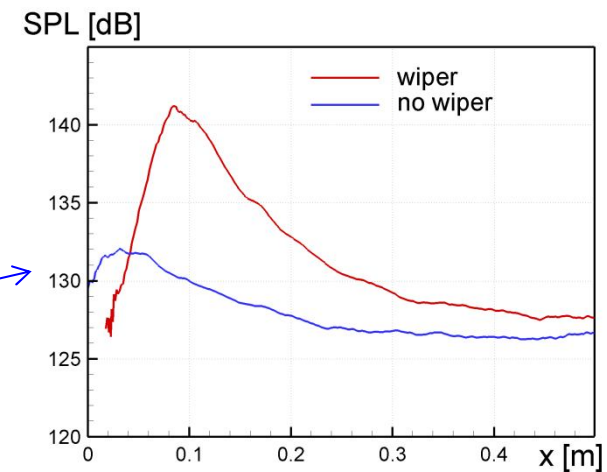
Сетка и разделение
на RANS и WMLES зоны

Применение рециклинга: стеклоочиститель Boeing 737



Общая картина течения

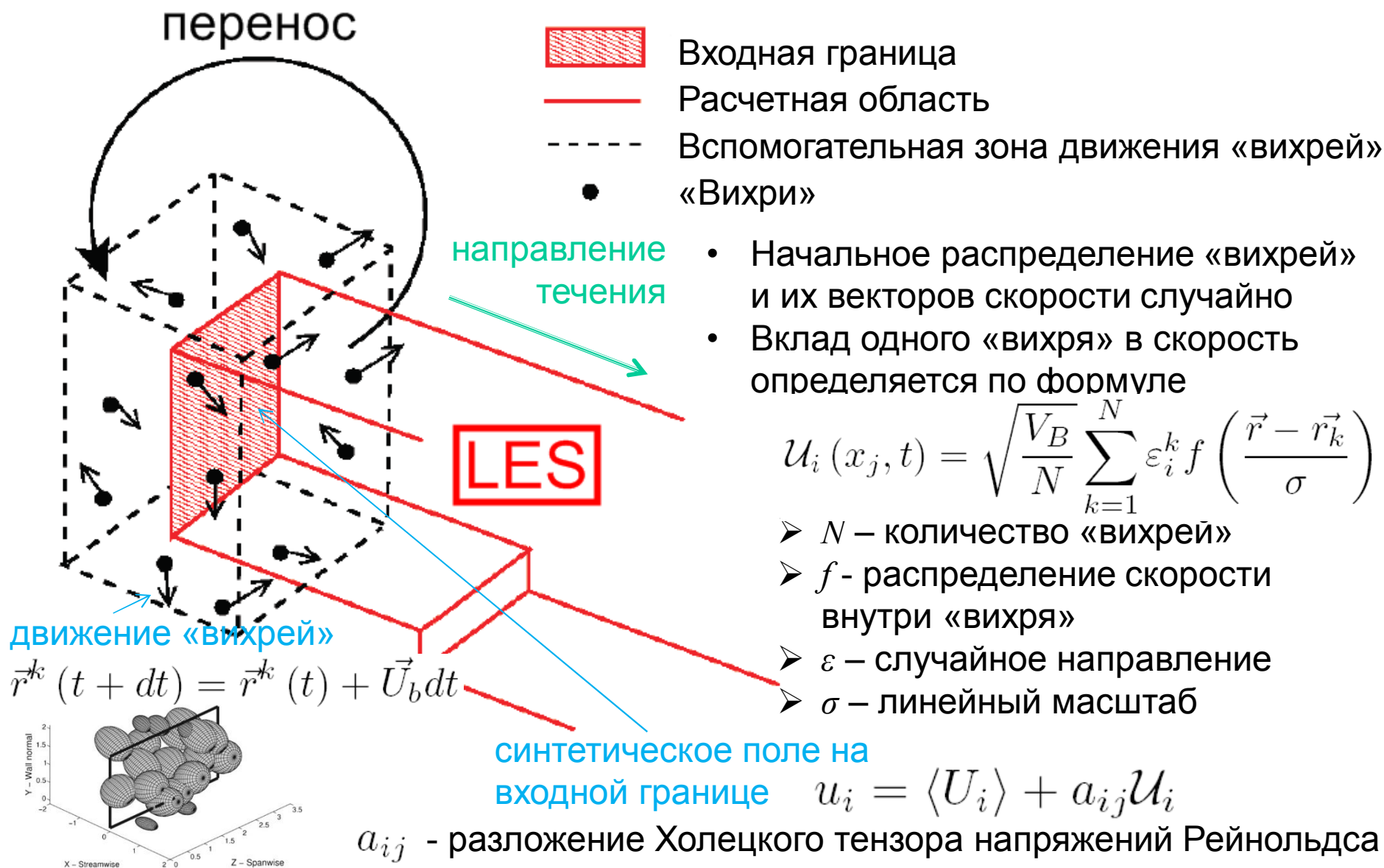
Влияние стеклоочистителя на
уровень шума на стекле



Метод синтетических вихрей Synthetic Eddy Method (SEM)

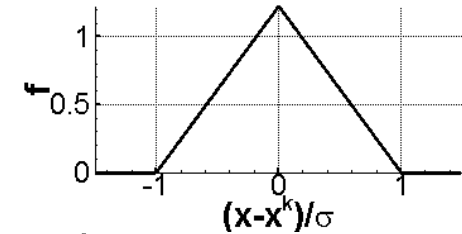
Метод синтетических вихрей

Synthetic Eddy Method (SEM)



Линейный масштаб

- Распределение скорости внутри «вихря» описывается кусочно-линейной функцией $f\left(\frac{\vec{r} - \vec{r}_k}{\sigma}\right)$
- Размер «вихрей» зависит только от линейного масштаба σ
 - Линейный масштаб определяется из RANS



- ✓ В оригинальном методе (Jarrin) для $k-\omega$ модели SST

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k_t}}{C_\mu \omega_t}, \Delta \right), \kappa \delta \right)$$

- Недостатки такого определения:

- ✓ Вихри изотропны во всех направлениях
- ✓ В логарифмической области размер вихря больше расстояния до

стенки, поскольку $\frac{\sqrt{k_t}}{C_\mu \omega_t} \approx 2d_w$

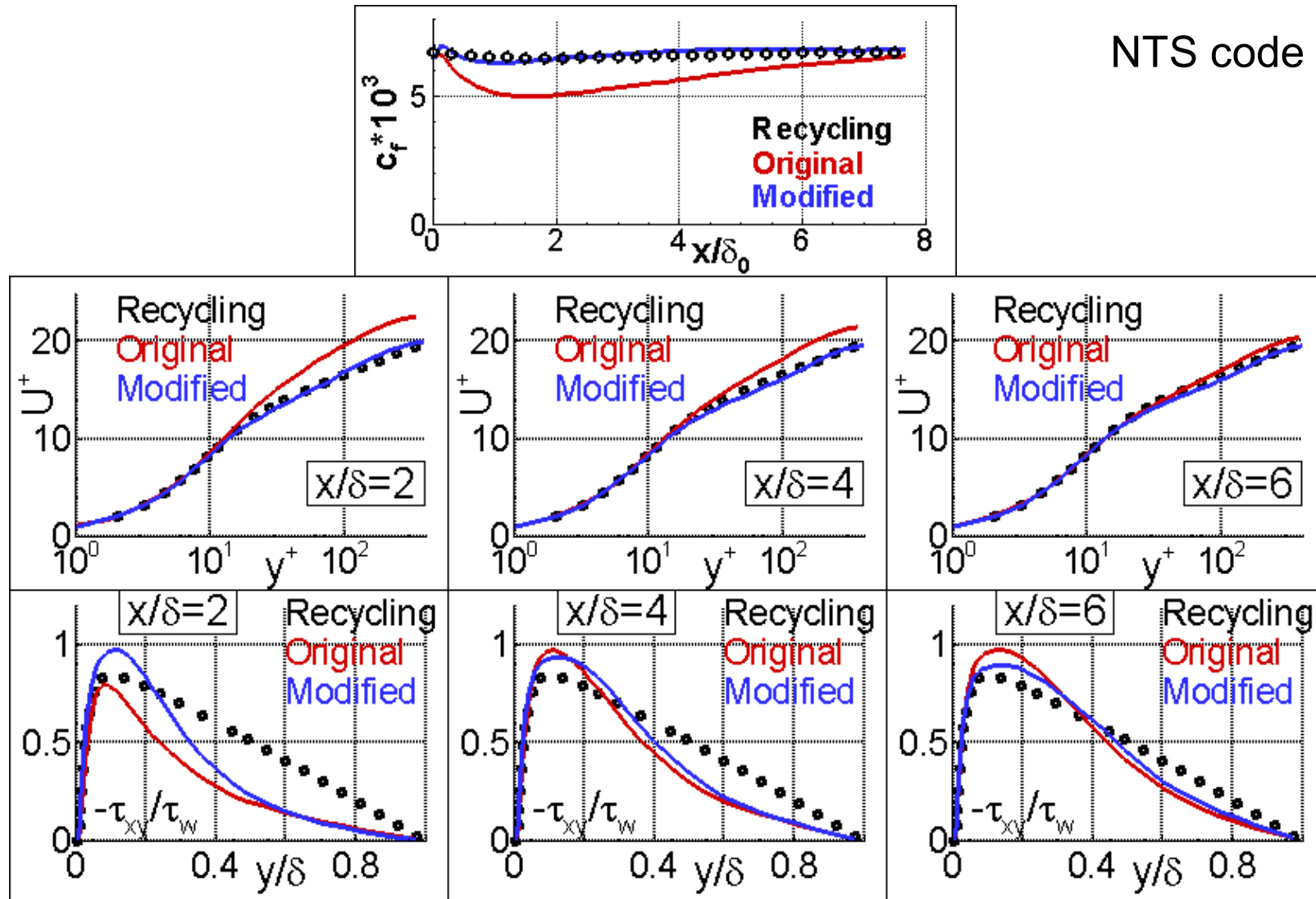
- Модифицированный (анизотропный) масштаб позволяет избежать этого

$$\sigma_r = \sigma_y = \sigma_z = \min \left(\max \left(C_{L_t} \frac{\sqrt{k_t}}{C_\mu \omega_t}, \Delta \right), \kappa \delta \right) \quad C_{L_t} < 1$$

$$\sigma_x = \max_{\vec{r} \in \text{inlet}} \sigma_r$$

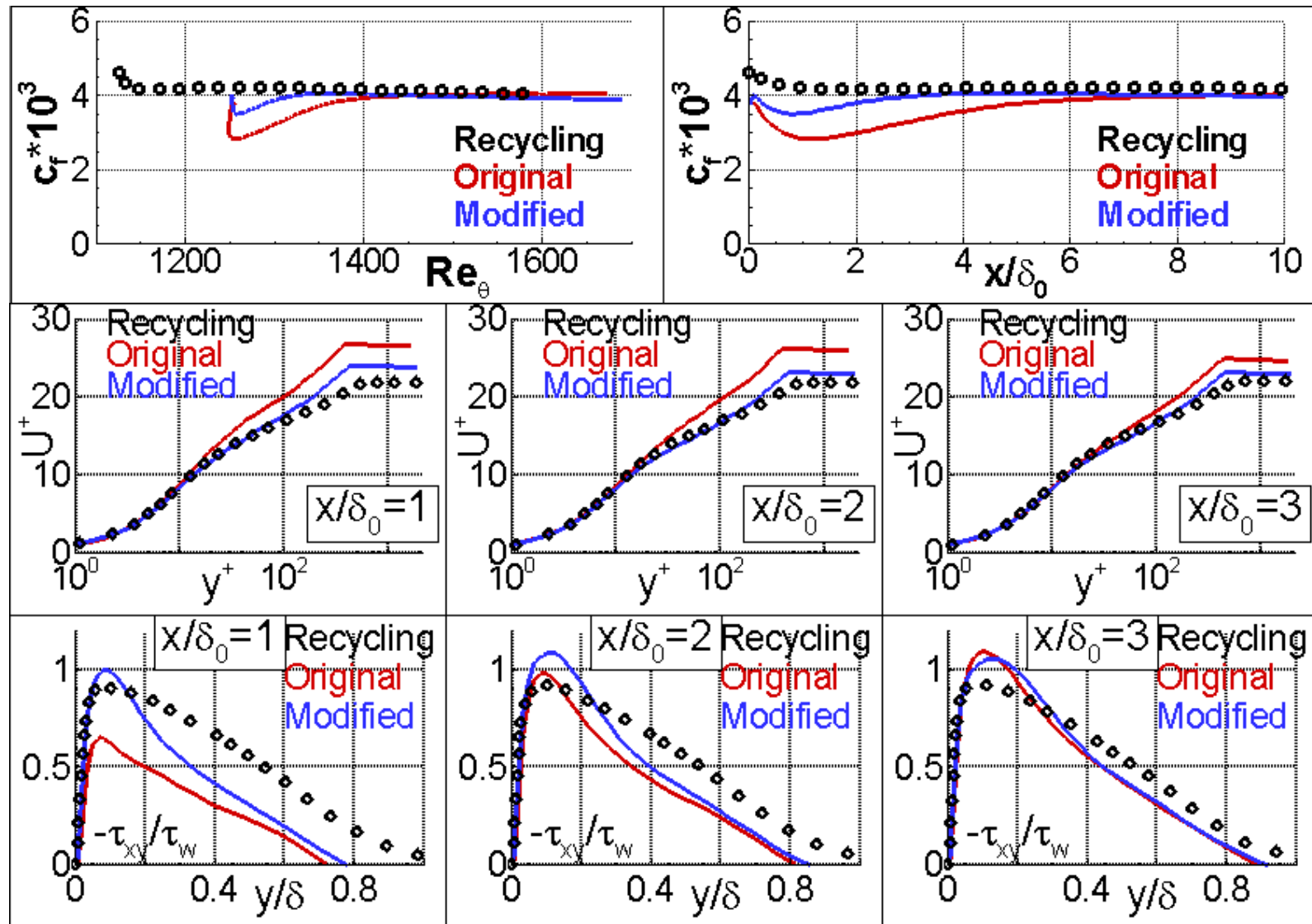
Применение SEM: течение в канале

NTS code



Коэффициент трения, профили скорости и турбулентных напряжений в различных сечениях

Применение SEM: пограничный слой



Коэффициент трения, профили скорости и турбулентных напряжений в различных сечениях

Метод вихрей Vortex Method (VM)

- Основной метод пакета FLUENT

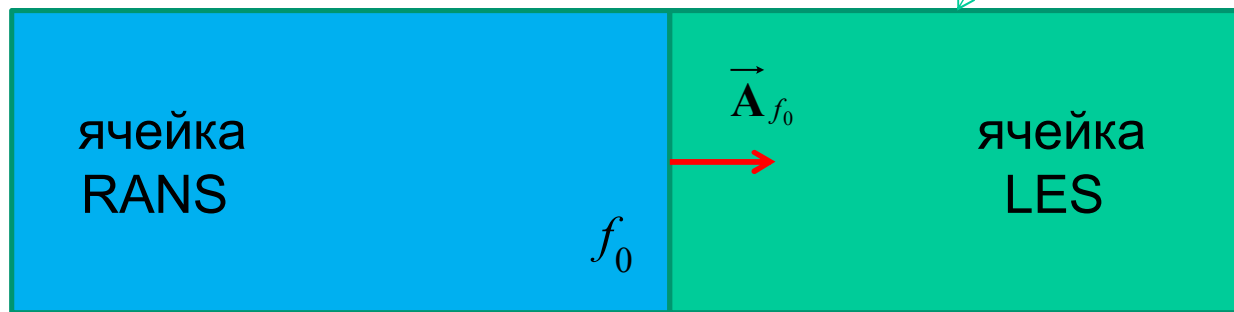
Метод вихрей

Vortex Method (VM)

- На границе между RANS и LES подобластями (в первой LES ячейке) в уравнения движения добавляется объемный источник

$$\vec{S}_{F,c_0} = \left(\langle \vec{u} \rangle_{f_0} \cdot \vec{A}_{f_0} \right) \vec{u}'_{f_0} + \left(\vec{u}'_{f_0} \cdot \vec{A}_{f_0} \right) \langle \vec{u} \rangle_{f_0} + \left(\vec{u}'_{f_0} \cdot \vec{A}_{f_0} \right) \vec{u}'_{f_0}$$

- f_0 - общая для LES и RANS грань ячейки
- $\vec{A}_{f_0}$ - вектор площади,
- $\langle \vec{u} \rangle_{f_0}$ - скорости из RANS подобласти
- $\vec{u}'_{f_0}$ - вектор пульсаций скорости



Метод вихрей

Vortex Method (VM)

- Пульсации скорости в перпендикулярной потоку плоскости ($\vec{z}$ – нормаль к плоскости) определяются суперпозицией N «вихревых точек»

$$\vec{u}'_t(\vec{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \Gamma_i(\vec{r}, t) \eta(|\vec{r} - \vec{r}_i|) \frac{(\vec{r} - \vec{r}_i) \times \vec{z}}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^2}$$

- $\vec{r}_i$ – положение i -й «вихревой точки»
 - ✓ Случайно распределено по поверхности интерфейса площадью S
 - ✓ Обновляется по истечении характерного временного масштаба $\tau = k/\varepsilon$ (k, ε получены из RANS расчета)

- Компоненты вектора пульсации скорости в направлении течения

$$u'_n(\vec{r}, t) = - \frac{\vec{u}'_t(\vec{r}, t) \cdot \nabla \langle u_n \rangle}{|\nabla \langle u_n \rangle|}$$

- Упрощенное влияние двумерного вихря на поле средней скорости
- $\langle u_n \rangle$ – средняя скорость в направлении течения (из RANS)
 - ✓ Если $\nabla \langle u_n \rangle = 0$, то эта величина выбирается случайной

Метод вихрей

Vortex Method (VM)

- Циркуляция скорости ищется в следующем виде

$$\Gamma_i(\vec{\mathbf{r}}, t) = 4 \sqrt{\frac{\pi S k(\vec{\mathbf{r}}, t)}{3N(2\ln(3) - 3\ln(2))}}$$

- Знак циркуляции меняется случайным образом по истечении характерного временного масштаба $\tau = k/\varepsilon$

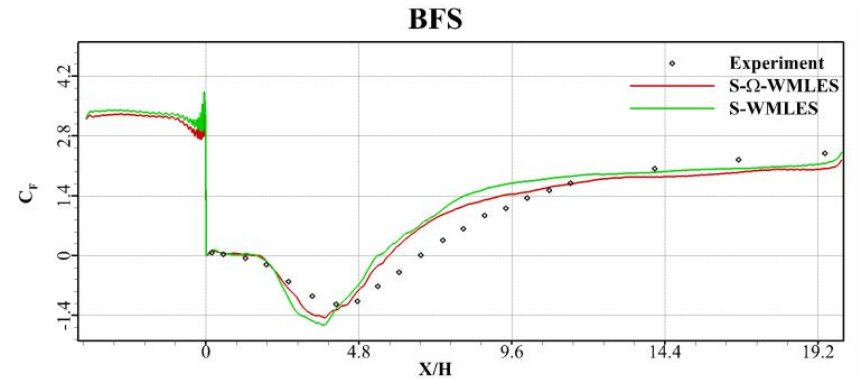
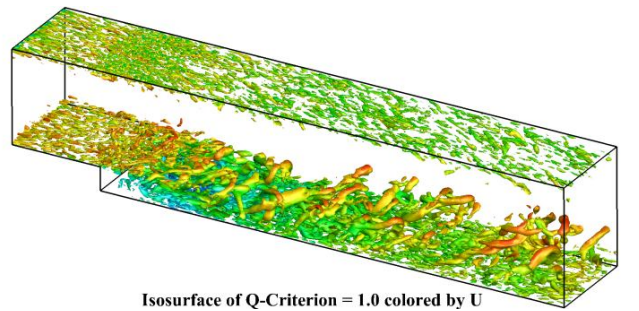
- Функция η , определяет форму вихревой точки

$$\eta(|\vec{\mathbf{r}}|) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \left(2 \exp\left(-\frac{|\vec{\mathbf{r}}|}{2\sigma^2}\right) - 1 \right) \cdot 2 \exp\left(-\frac{|\vec{\mathbf{r}}|}{2\sigma^2}\right)$$

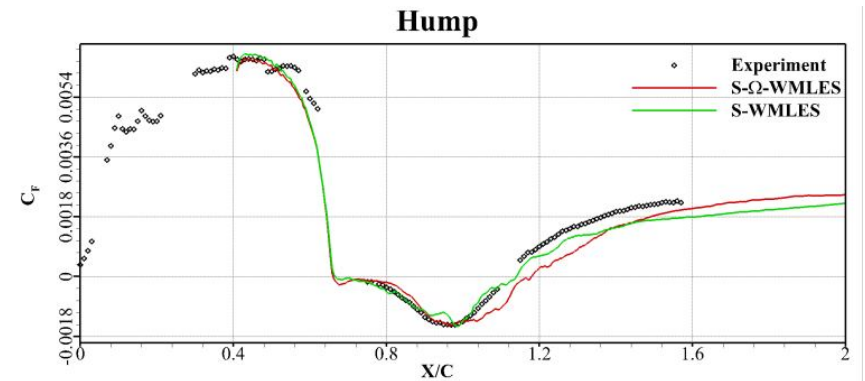
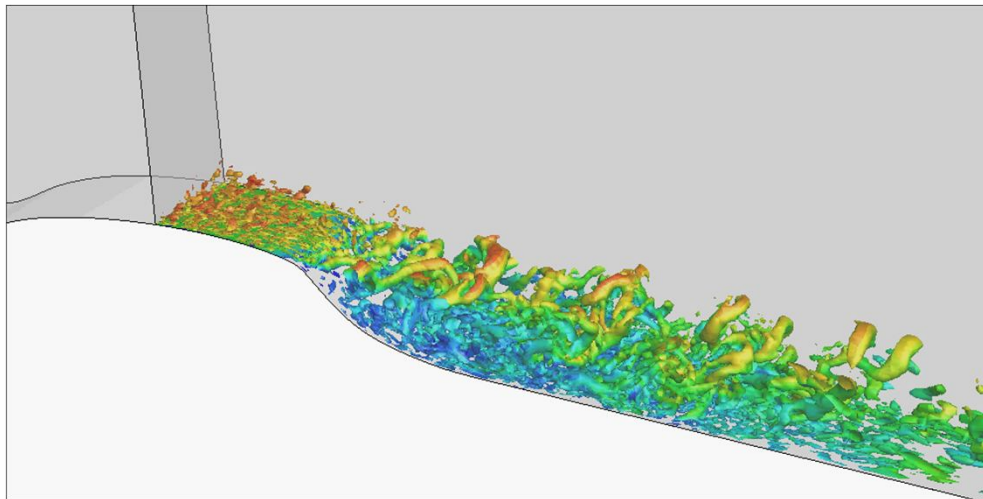
- Модифицированная функция Гаусса
- Здесь $\sigma = \max(\Delta, 0.5 C_\mu^{3/4} k^{3/2}/\varepsilon)$ – размер вихря
 - ✓ Ограничен локальным сеточным масштабом

Применение метода вихрей

- Канал с внезапным расширением

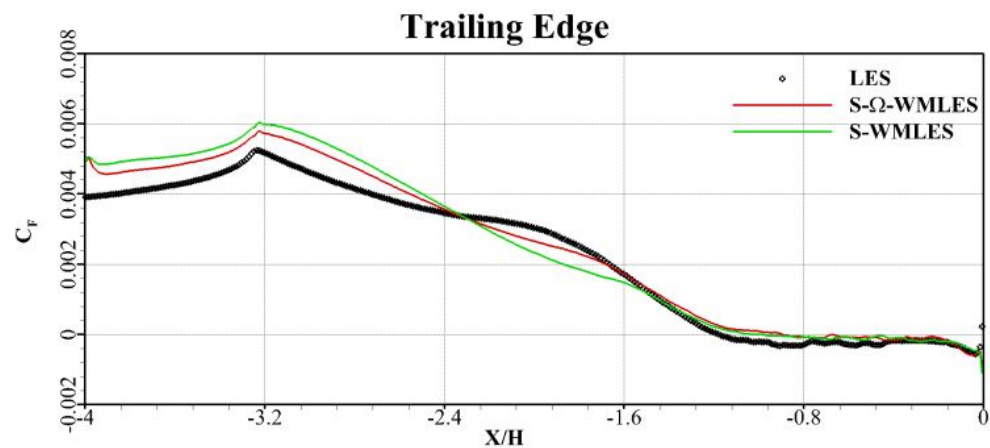
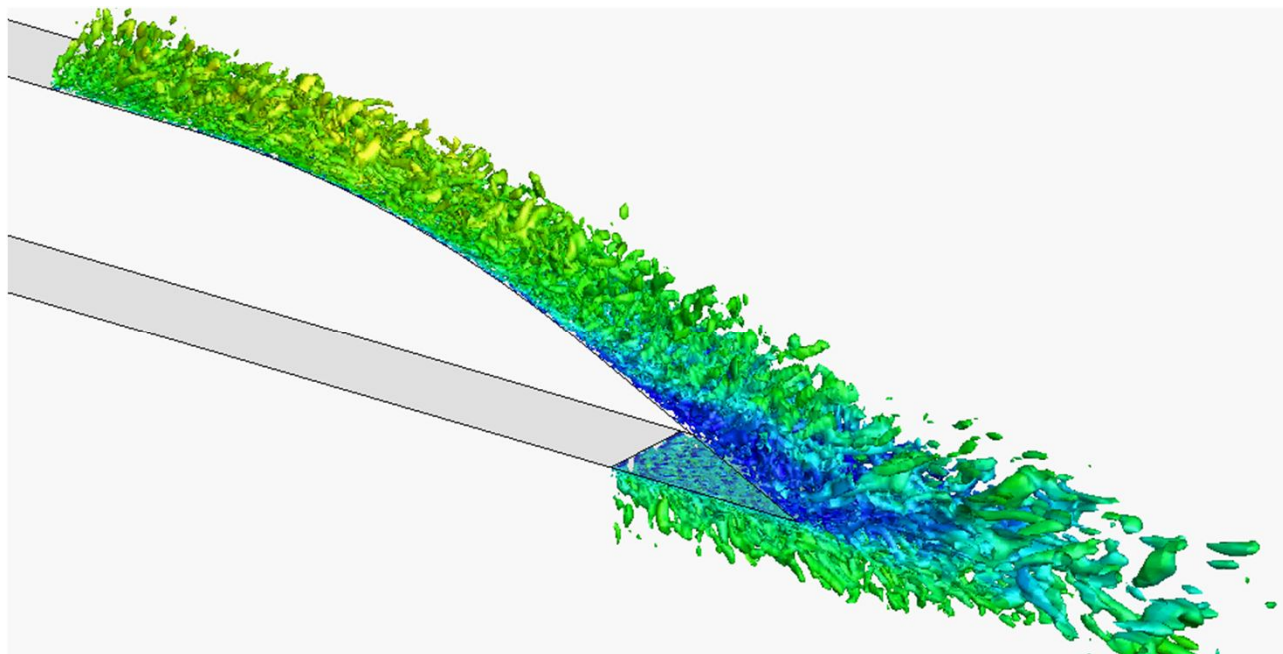


- Обтекание выпуклости



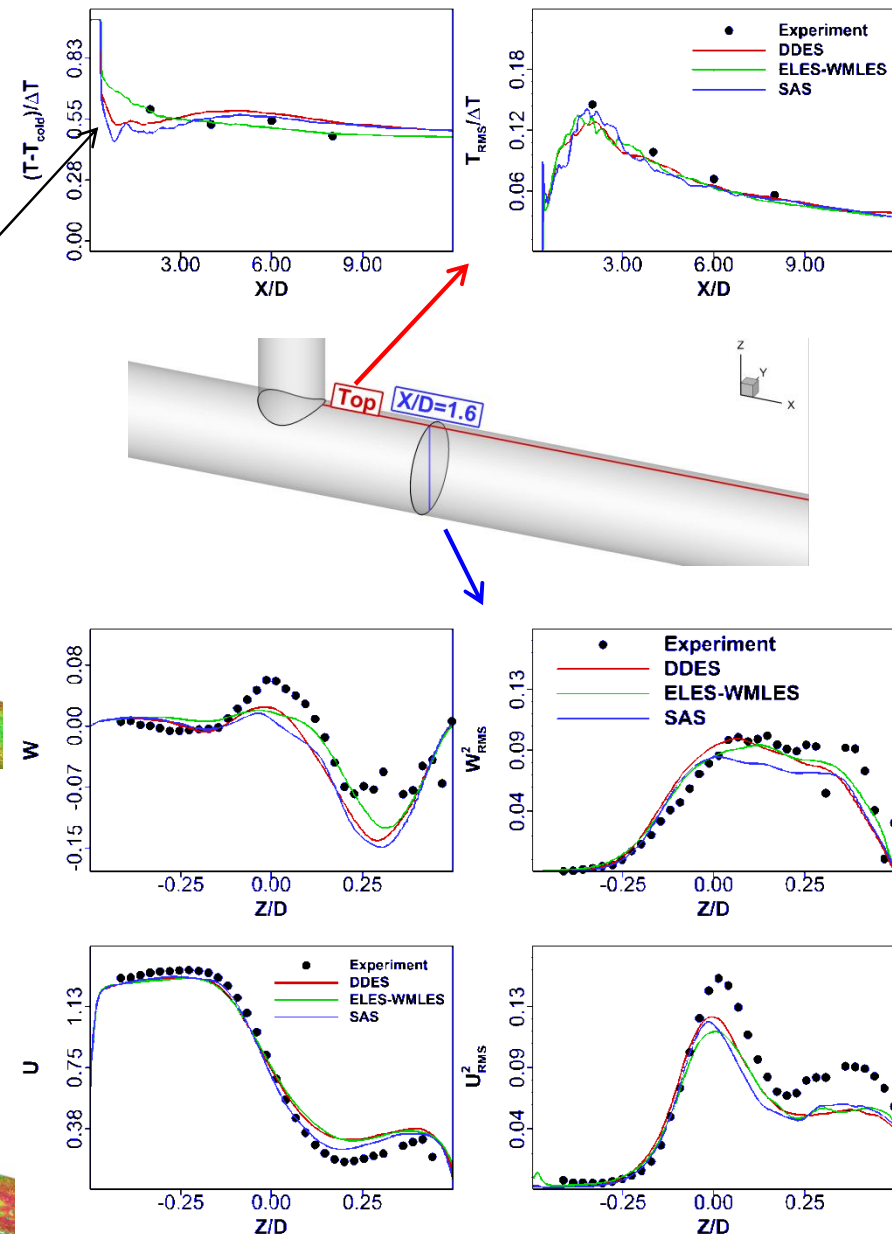
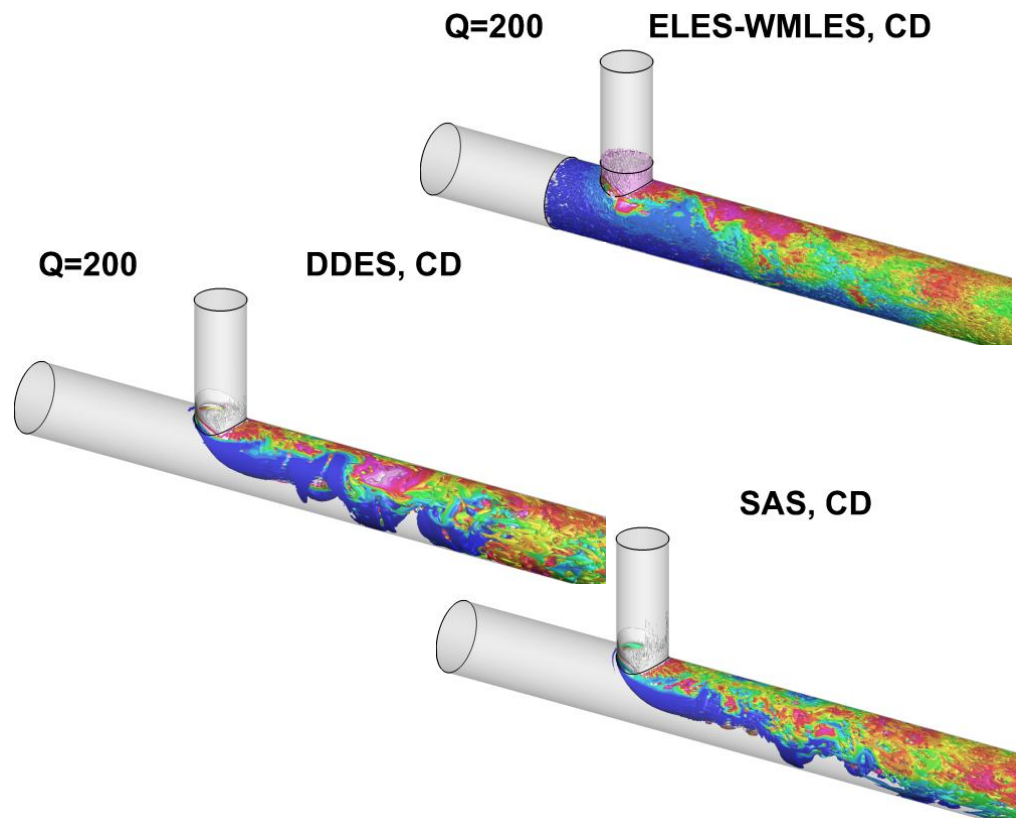
Применение метода вихрей

- Задняя кромка гидрокрыла

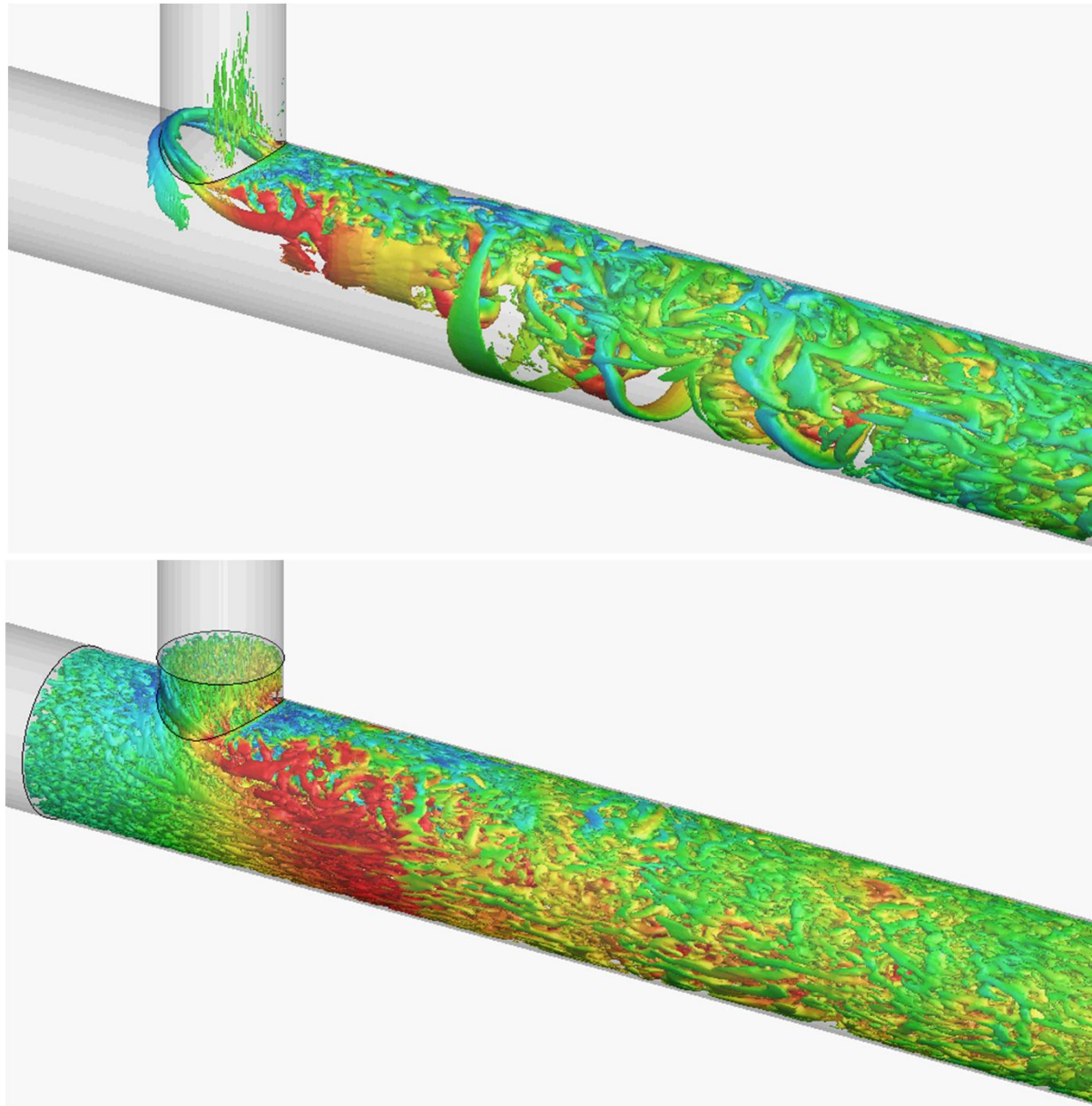


Т-образное соединение труб

- Только WMLES проводился с VM
 - В остальных расчетах турбулентность возникает из-за естественной неустойчивости
- Преимущества ELES проявляются только в непосредственной окрестности соединения



Т-образное соединение труб



Резюме

- Трудность проведения полного WMLES реальных течений приводит к необходимости применения Embedded LES
 - В большинстве случаев этот подход невозможен без создания турбулентных пульсаций на входной границе в LES область
 - ✓ Аналогичную проблему часто приходится решать при проведении обычных LES расчетов
- Создание турбулентного контента - крайне сложная задача
 - Необходимо, чтобы «искусственные» структуры как можно быстрее перестроились в «настоящие»
- К настоящему времени созданы различные методы создания контента, обеспечивающие высокую точность