

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](http://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/SRS_methods))

## **Входные условия для LES**

### **Часть 2**

Гарбарук Андрей Викторович ([agarbaruk@mail.ru](mailto:agarbaruk@mail.ru))  
2019 г.

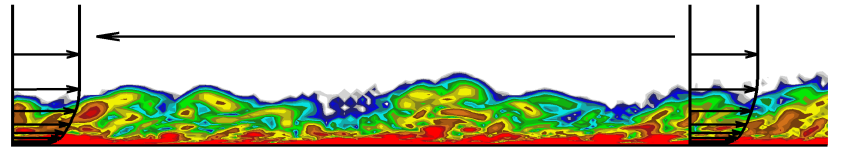
# Содержание

1. Генератор синтетической турбулентности (Synthetic Turbulence Generator - STG)
  - Гидродинамическая версия STG
  - Версия STG для аэроакустики
  - Объемный источник турбулентности

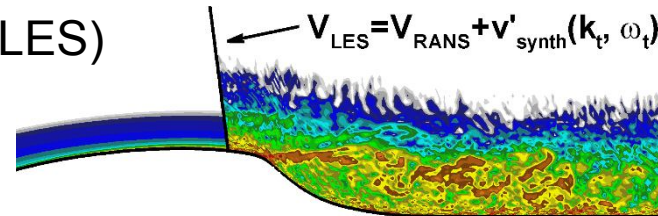
# Создание турбулентного контента

- При решении многих задач при помощи вихреразрешающих подходов необходимо создать разрешенную турбулентность

- На входе в расчетную область



- На RANS-LES интерфейсе (Embedded LES)



- Способы задания турбулентного контента
  - На основе проводимого расчета
    - ✓ Периодические граничные условия
    - ✓ Рециклинг
    - ✓ Вспомогательный расчет
    - ✓ Создание «базы данных» нестационарных пульсаций
  - Синтетическая генерация турбулентности
    - ✓ Создание двумерных «вихрей» и их конвекция через входную границу
    - ✓ Создание турбулентных пульсаций как суперпозиции пространственно-временных Фурье-мод

**Генератор синтетической турбулентности**  
**Synthetic turbulence Generator (STG)**

# Гидродинамическая версия STG

- Поле скорости на входе в LES область определяется как:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{U}(\mathbf{r}) + \mathbf{u}'(\mathbf{r}, t)$$

где  $\mathbf{U}(\mathbf{r})$  - средняя скорость (должна быть известна)

$\mathbf{u}'(\mathbf{r}, t)$  - пульсации, удовлетворяющие известному тензору напряжений Рейнольдса  $R_{ij}(\mathbf{r})$

- Это обеспечивается представлением пульсаций в следующем виде

$$u'_i(\mathbf{r}, t) = a_{ij} v'_j(\mathbf{r}, t)$$

- Величины  $v'_i(\mathbf{r}, t)$  соответствуют однородной изотропной турбулентности  $\langle v'_j \rangle = 0$ ,  $\langle v'_j v'_k \rangle = \delta_{jk}$

- Для получения заданных напряжений Рейнольдса используется разложение Холецкого

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \quad \mathbf{A} = \{a_{ij}\} = \begin{pmatrix} \sqrt{R_{11}} & 0 & 0 \\ R_{21}/a_{11} & \sqrt{R_{22} - a_{21}^2} & 0 \\ R_{31}/a_{11} & (R_{32} - a_{21}a_{31})/a_{22} & \sqrt{R_{33} - a_{31}^2 - a_{32}^2} \end{pmatrix}$$

# Синтетические возмущения

- Возмущения определяются суммой Фурье мод:

$$\mathbf{v}'(\mathbf{r}, t) = \sqrt{6} \sum_{n=1}^N \sqrt{q^n} \left[ \boldsymbol{\sigma}^n \cos \left( k^n \mathbf{d}^n \cdot \mathbf{r} + \varphi^n + s^n \frac{t}{\tau} \right) \right]$$

Здесь:  $N$  - количество мод (определяется сеткой)

$q^n(\mathbf{r}, t)$  - безразмерная амплитуда моды (определяется из спектра)

$k^n$  - волновое число, определяется геометрической прогрессией

$$k^n = k_{\min} \cdot (1 + \alpha)^{n-1}, \alpha \cong 0.01$$

$\mathbf{d}^n$  - случайное направление моды

$\boldsymbol{\sigma}^n$  - случайное направление скорости, которое ортогонально направлению моды ( $\boldsymbol{\sigma}^n \cdot \mathbf{d}^n = 0$ )

$\varphi^n$  - случайная фаза моды

$s^n$  - случайная безразмерная частота с гауссовским распределением (среднее значение и стандартное отклонение равны  $2\pi$ )

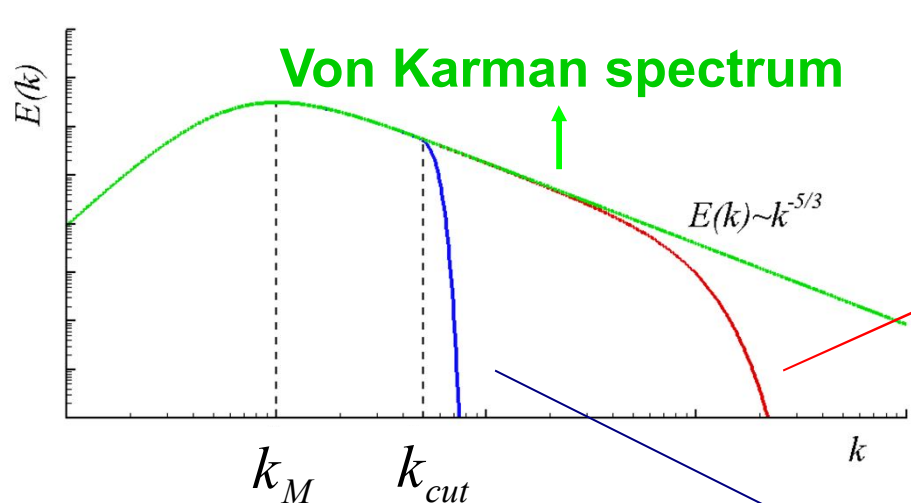
$\tau$  - **глобальный** (единый) масштаб времени

# Амплитуды мод

- Безразмерные амплитуды мод

$$q^n = \frac{E(k^n) \Delta k^n}{\sum_{n=1}^N E(k^n) \Delta k^n}, \quad \sum_{n=1}^N q^n = 1$$

определяются с помощью модифицированного спектра Кармана



$$E(k) = \frac{(k / k_M)^4}{\left[1 + 2.4(k / k_M)^2\right]^{17/6}} f_\eta f_{cut}$$

$f_\eta$  обеспечивает правильное поведение спектра в окрестности колмогоровского масштаба

$f_{cut}$  «обрезает» частоты, которые не разрешаются на сетке (ограничение Найквиста)

$$k_M = k_M(\mathbf{r}, t) = 2\pi / l_M$$

$l_M$  - локальный масштаб длины, соответствующий наиболее энергонесущим вихрям

# Модификация спектра

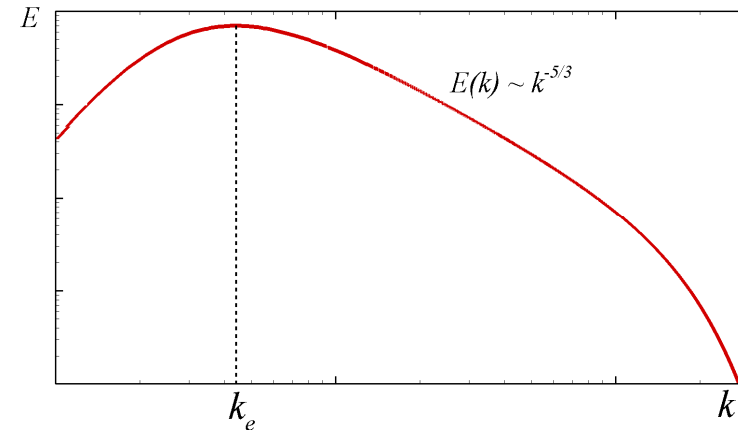
- Учет вязкой диссипации в окрестности колмогоровского масштаба

$$f_{\eta} = \exp(-(C_{\eta} \cdot k / k_{\eta})^2)$$

$$k_{\eta} = 2 \cdot \pi / \eta$$

$$\eta = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4}$$

$$C_{\eta} = 12$$

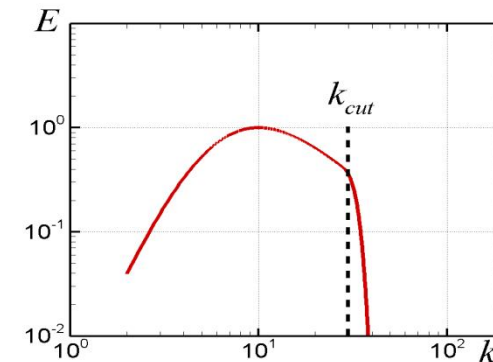
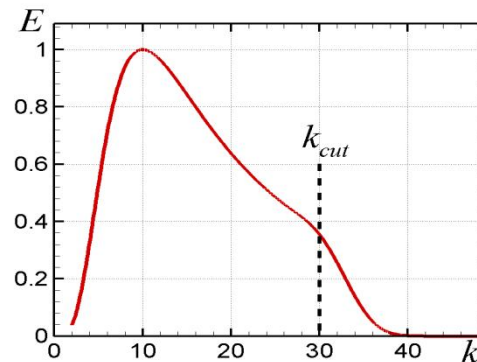


- Ограничение, связанное с разрешением сетки

$$f_{cut} = \exp(-(4 \cdot \max(k - 0.9 \cdot k_{cut}, 0) / k_{cut})^3)$$

$$k_{cut} = 2 \cdot \pi / (2 \cdot l_{cut}) \quad l_{cut} = h_{max} \cdot \min((h_{lim} + 0.1 \cdot d_w) / h_{max}, 1)$$

$$h_{lim} = \max(h_y, h_z, 0.3 \cdot h_{max})$$

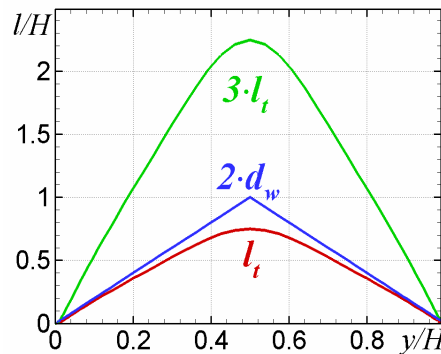


# Пространственный и временной масштабы

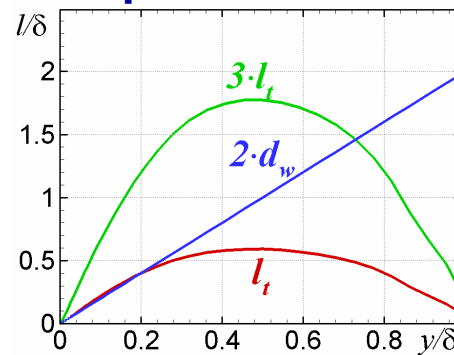
- Линейный масштаб определяется выражением  $l_M = \min\{2d_w, C_l l_t\}, C_l = 3$ 
  - Здесь  $l_t = k^{1/2} / (C_\mu \omega)$  - RANS масштаб турбулентности

## Примеры масштабов для канонических сдвиговых течений

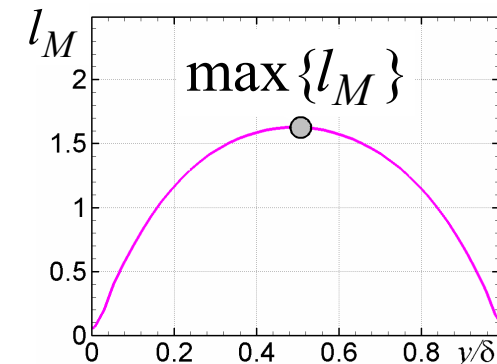
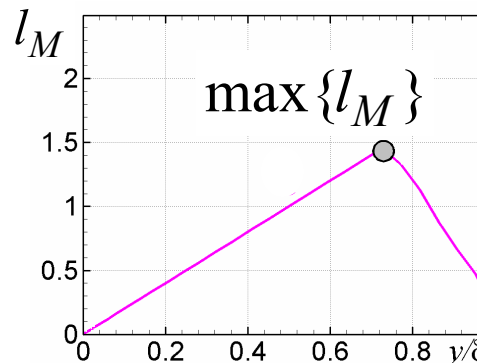
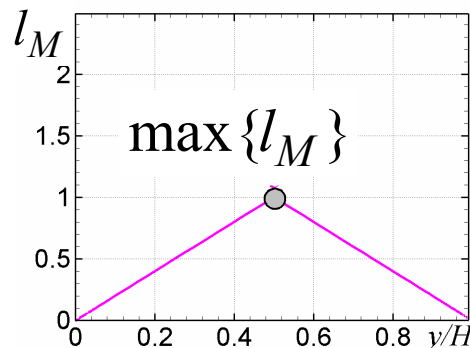
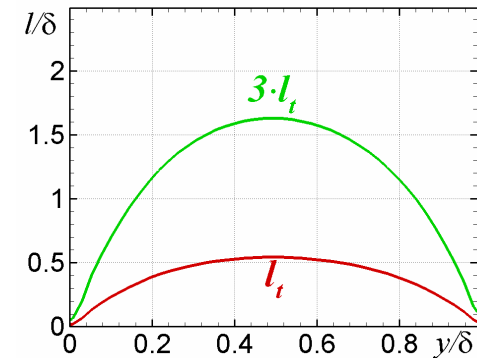
**Течение в канале**



**Пограничный слой**



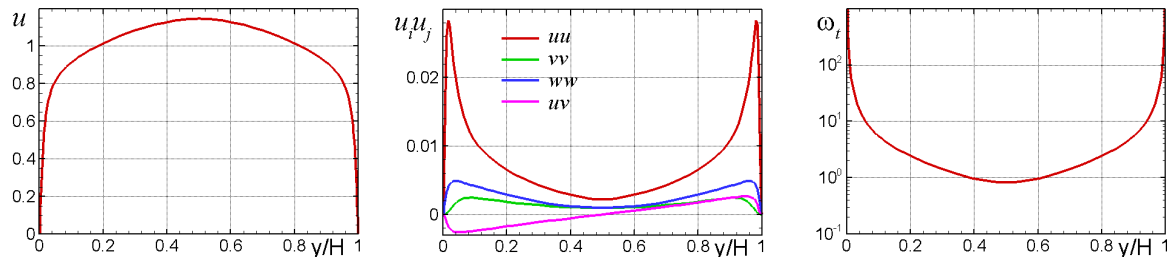
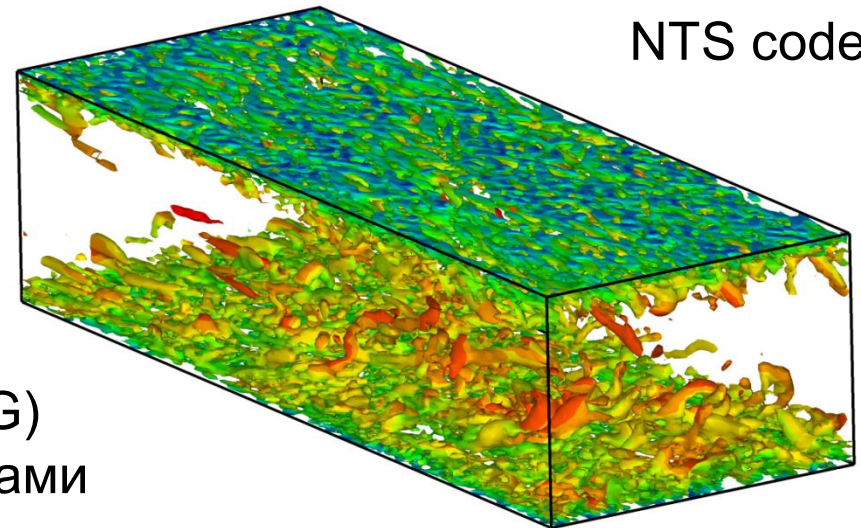
**Слой смешения**



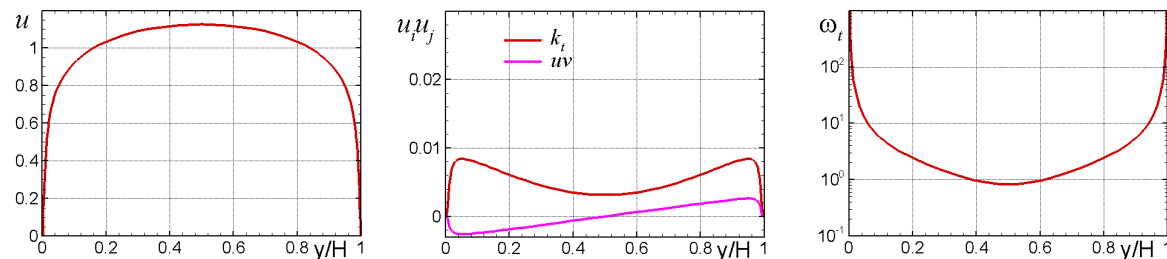
- Масштаб времени является глобальным  $\tau = C_\tau \max\{l_M\} / U_b$ ,  $C_\tau = 2$ 
  - Это обеспечивает анизотропию вихрей
  - Данный подход не является полностью локальным

# Применение STG: течение в канале

- Течение рассматривается при двух числах Рейнольдса
  - $Re_\tau = 400$        $Re_H = 1.4 \cdot 10^4$
  - $Re_\tau = 18000$        $Re_H = 1.0 \cdot 10^6$
- Профили (входные данные для STG) могут быть получены двумя способами
  - Осредненный периодический LES

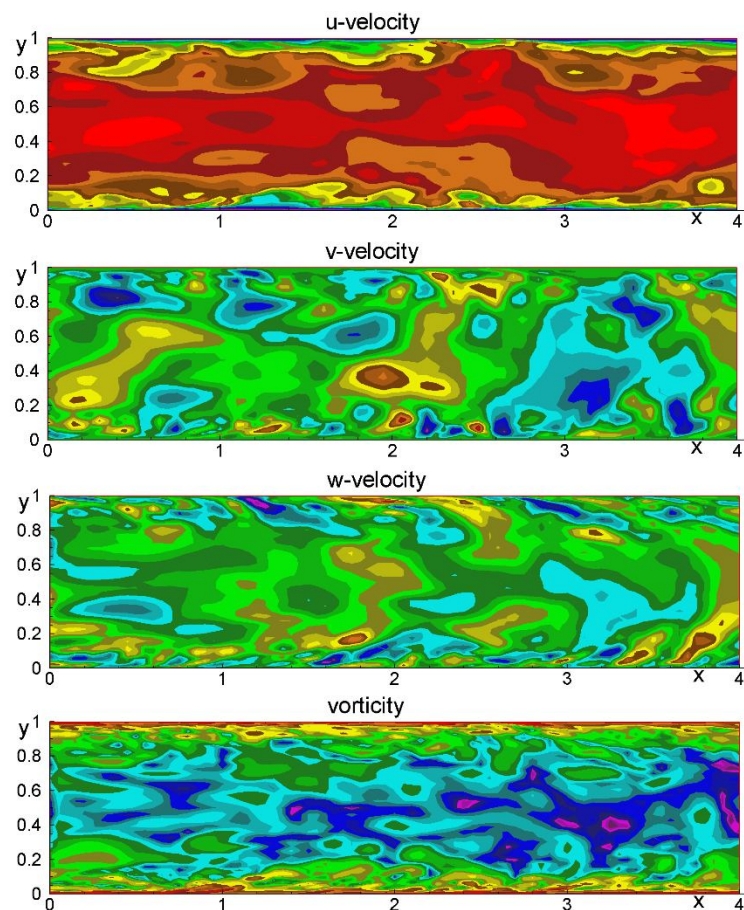


## ➤ RANS

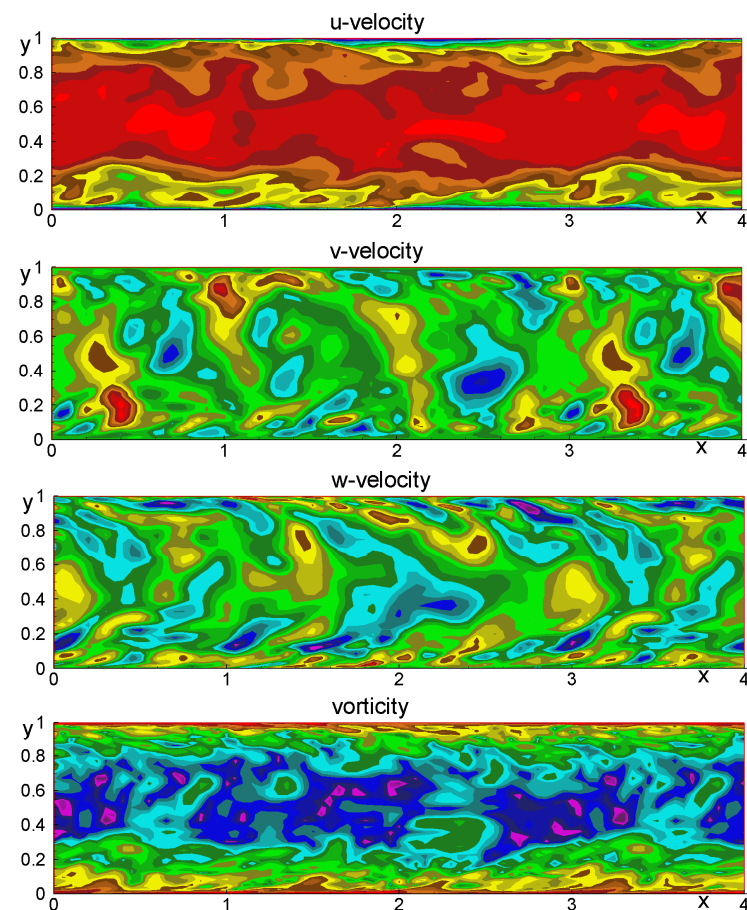


# Применение STG: течение в канале

$$\text{Re}_\tau = 400$$



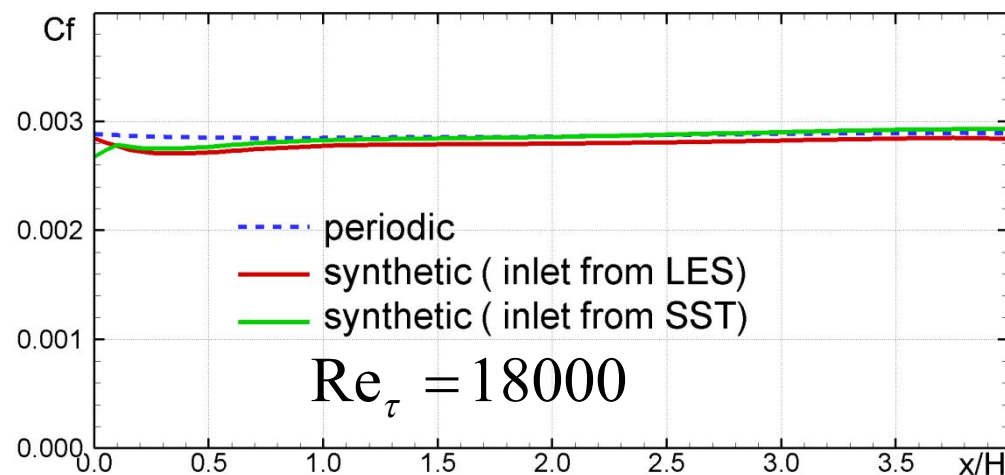
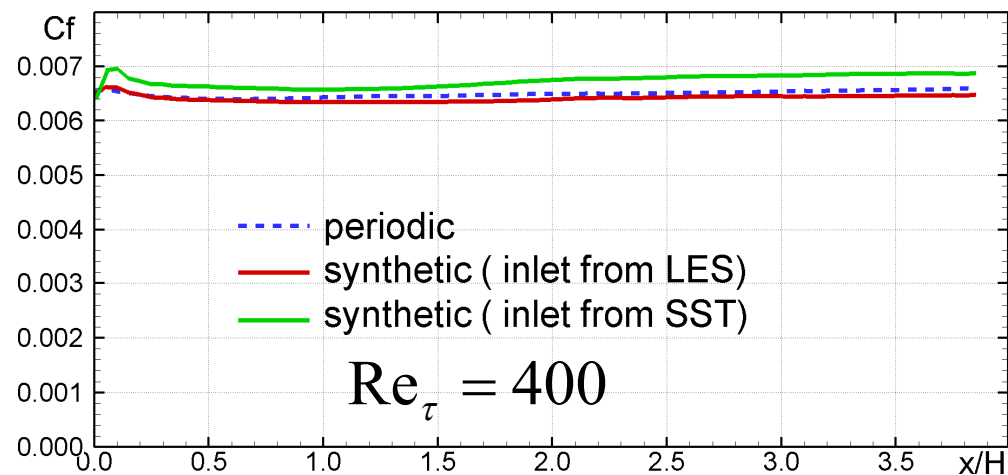
Synthetic (inlet from LES)



Periodic LES

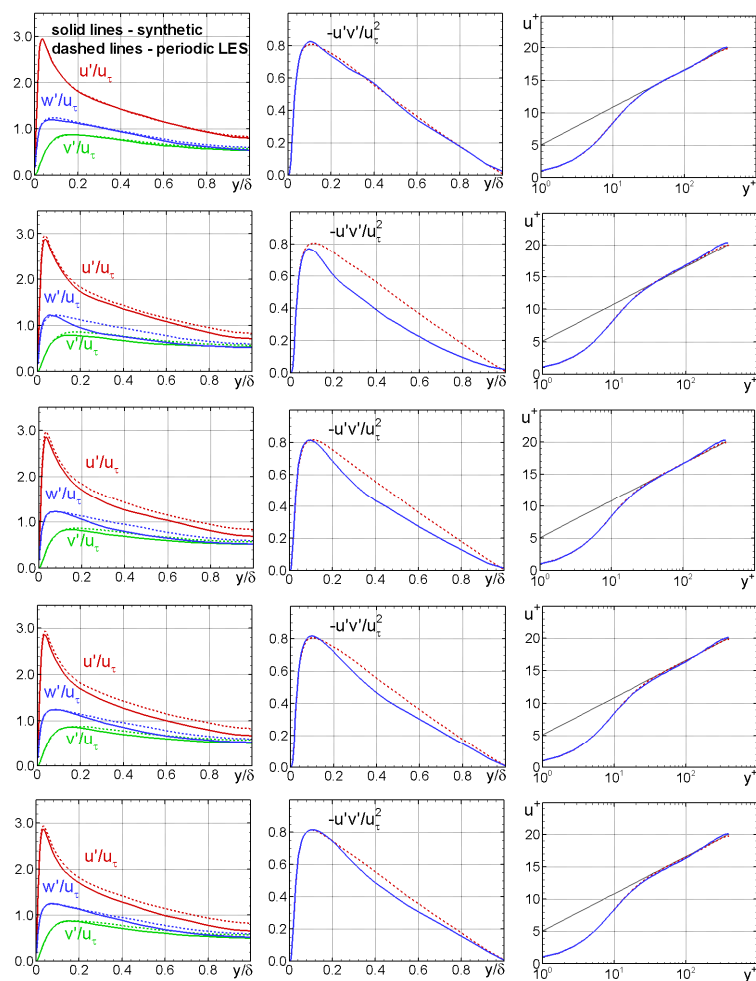
Сравнение полей, полученных при различном способе задания входных профилей

# Применение STG: течение в канале



Распределение коэффициента трения вдоль канала

# Применение STG: течение в канале



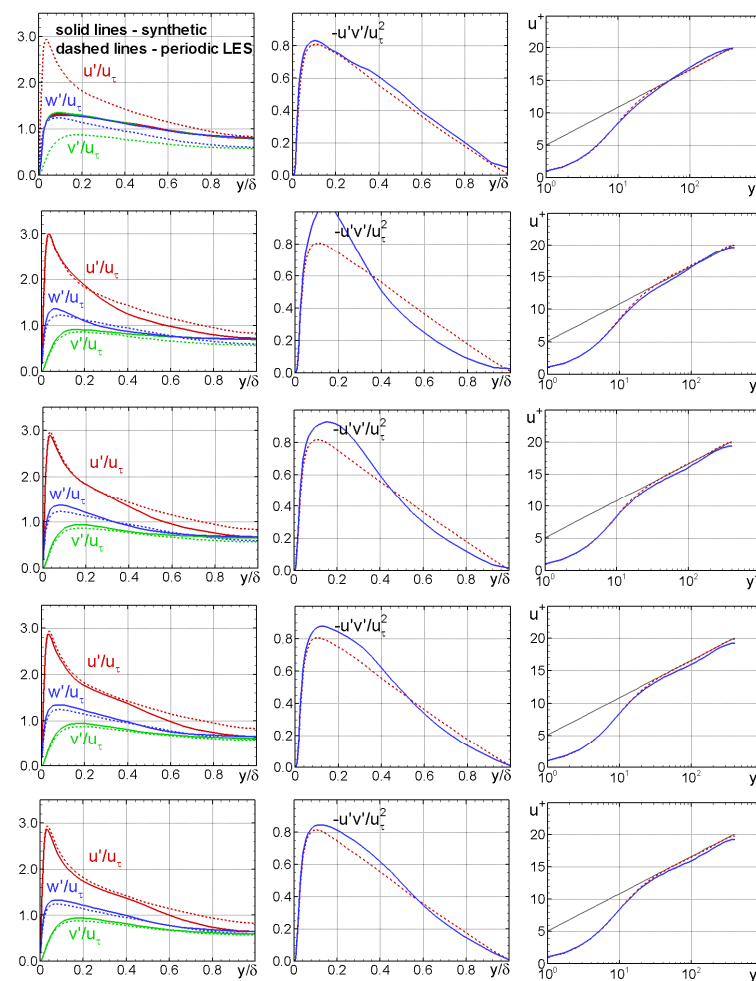
$x/H = 0.0$

$x/H = 1.0$

$x/H = 2.0$

$x/H = 3.0$

$x/H = 4.0$



$x/H = 0.0$

$x/H = 1.0$

$x/H = 2.0$

$x/H = 3.0$

$x/H = 4.0$

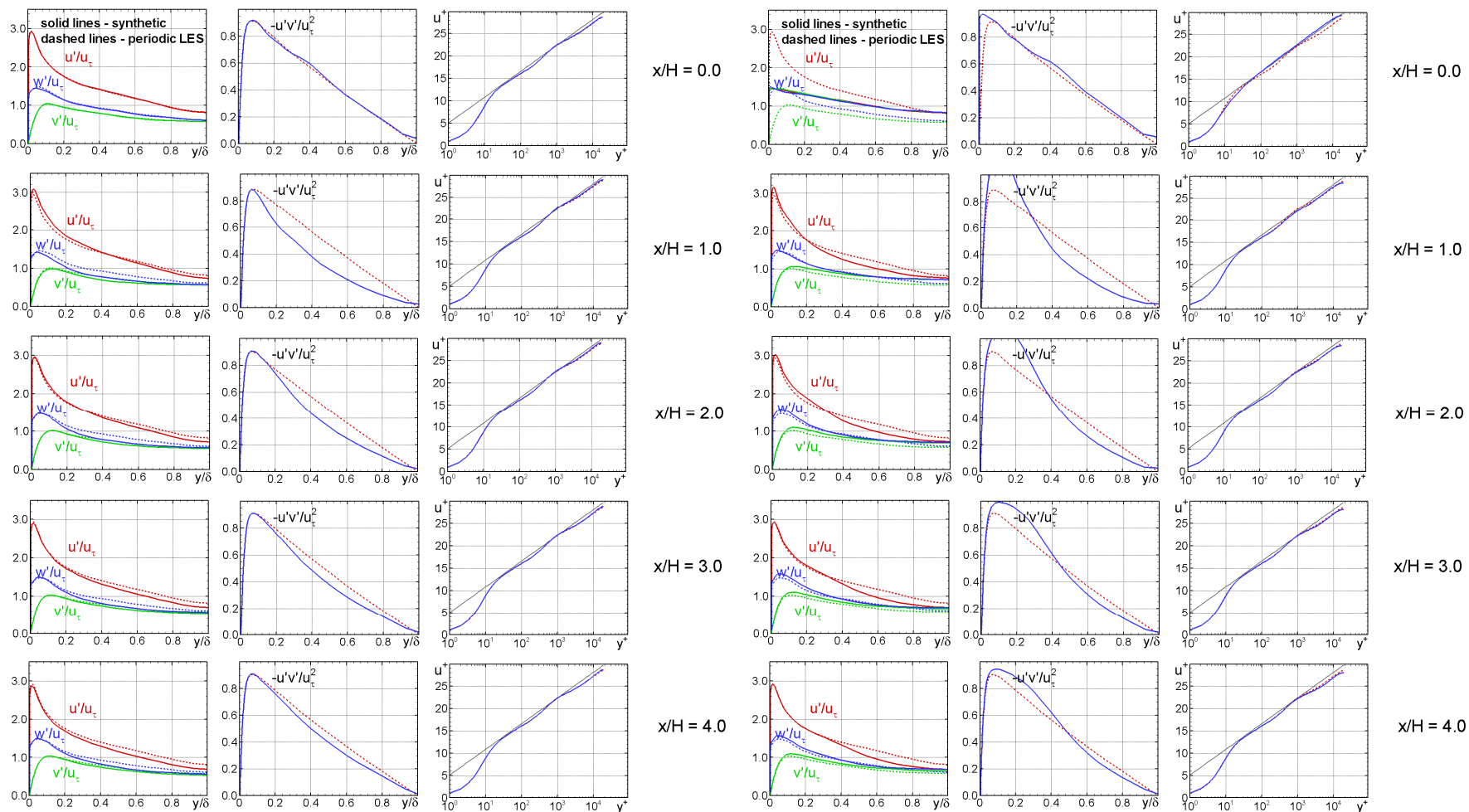
Inlet from LES

$Re_\tau = 400$

Inlet from SST RANS

Сравнение профилей скорости

# Применение STG: течение в канале



Inlet from LES

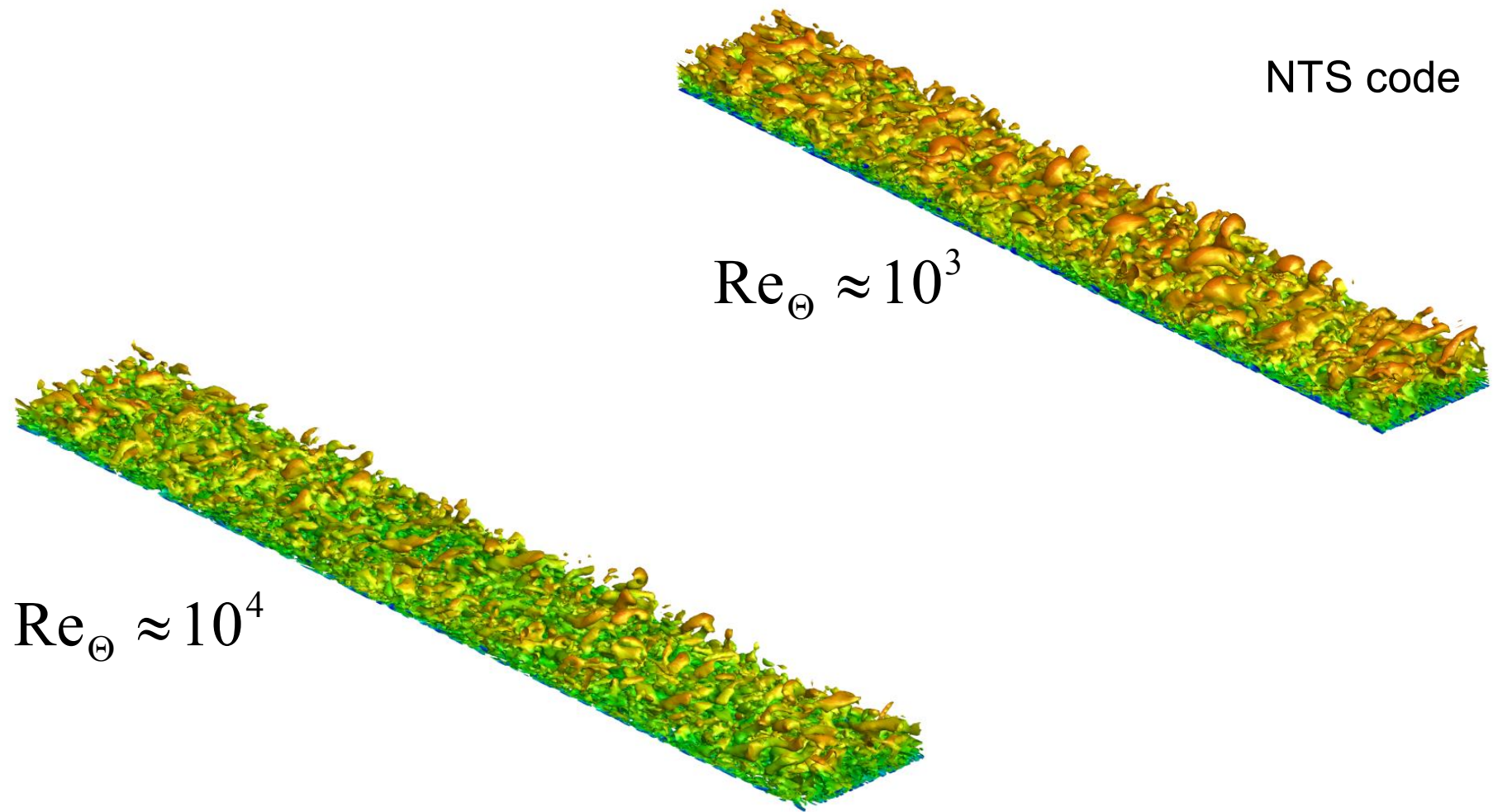
$Re_\tau = 18000$

Inlet from SST RANS

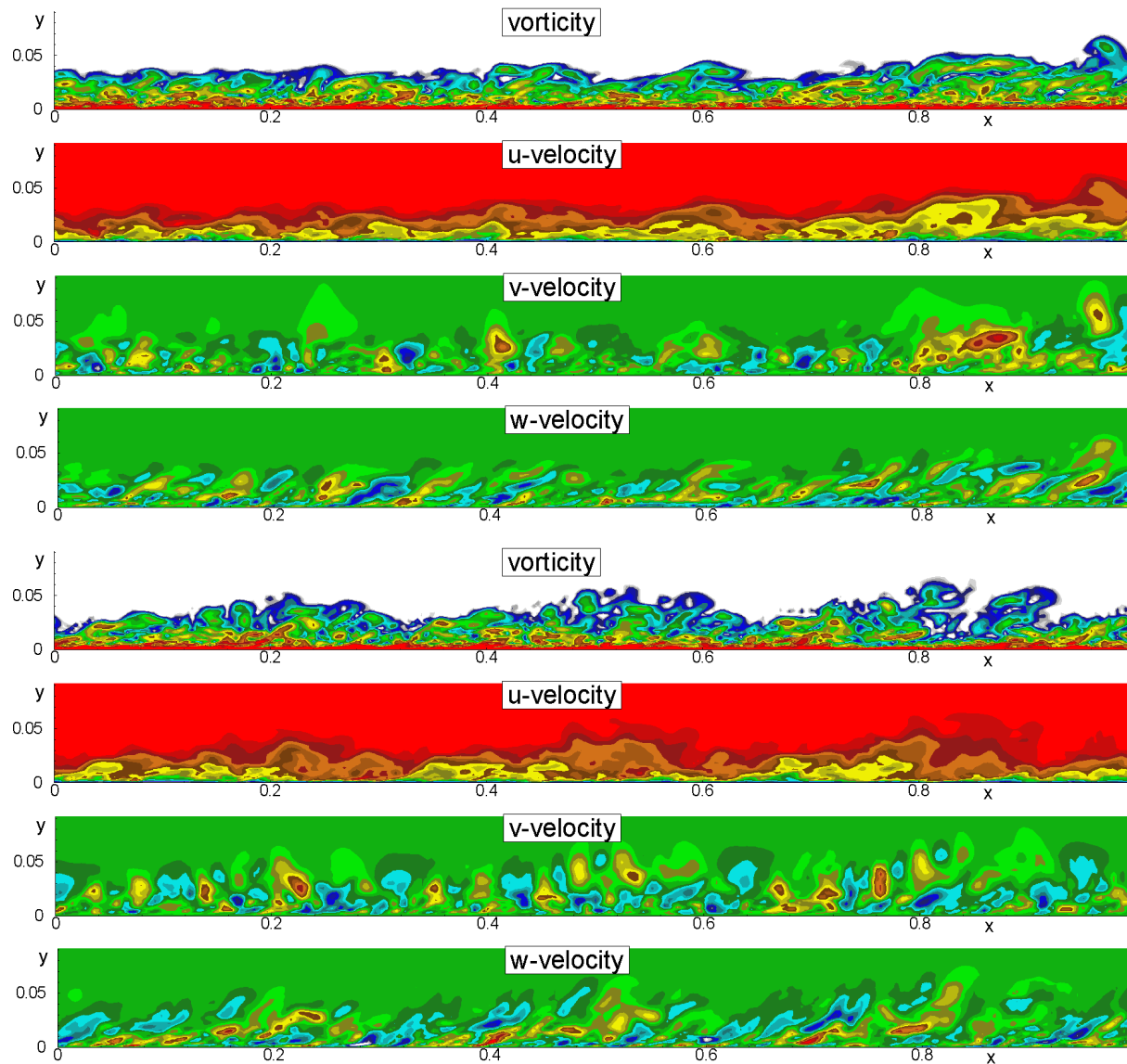
Сравнение профилей скорости

# Применение STG: пограничный слой

- Течение рассматривается при двух числах Рейнольдса



# Применение STG: пограничный слой



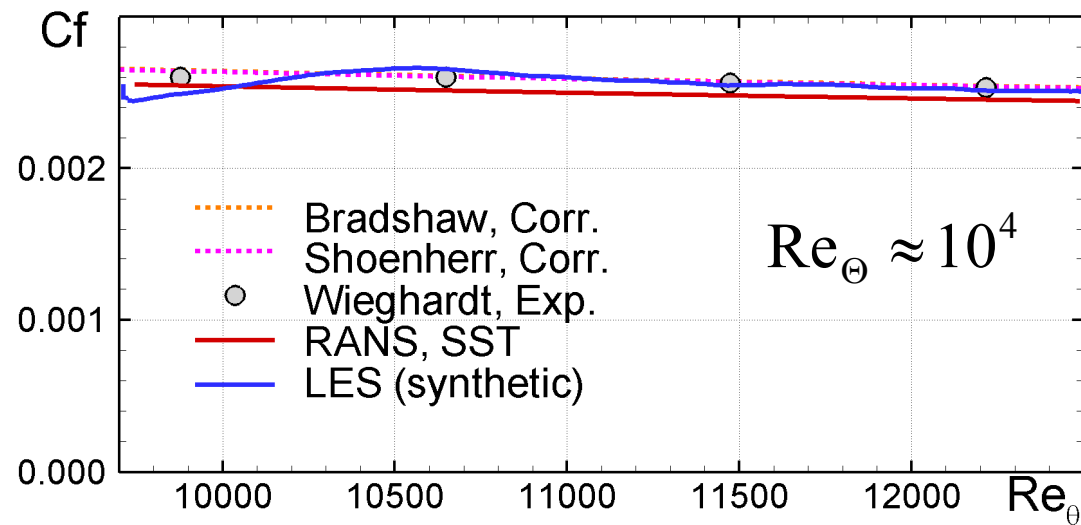
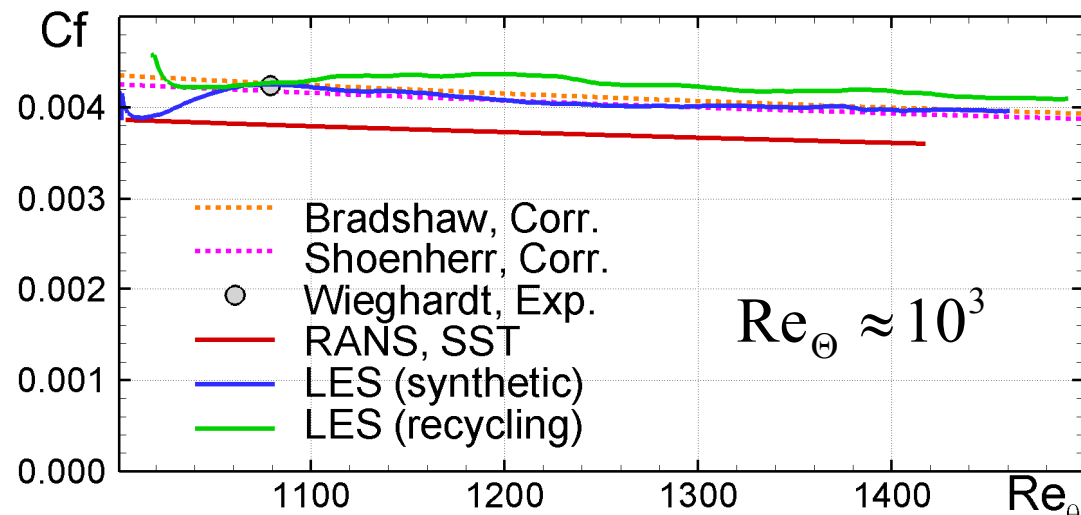
$$Re_{\Theta} \approx 10^3$$

Synthetic

Recycling

Сравнение турбулентных структур, полученных при помощи STG и рециклинга

# Применение STG: пограничный слой

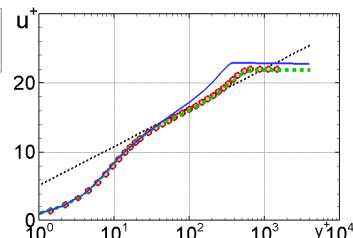
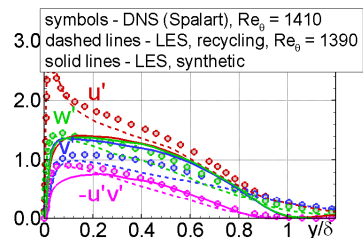


Коэффициент трения при двух числах Рейнольдса

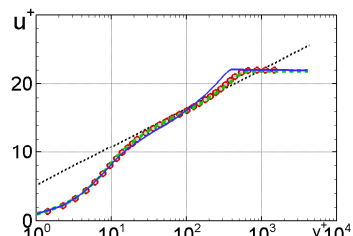
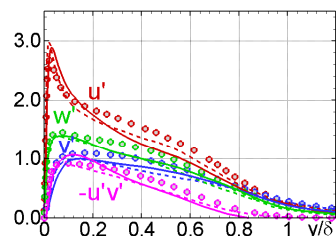
# Применение STG: пограничный слой

$Re_{\Theta} \approx 10^3$

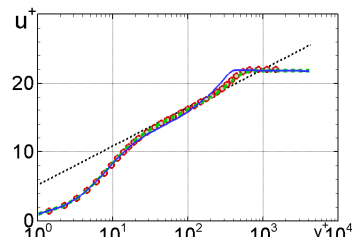
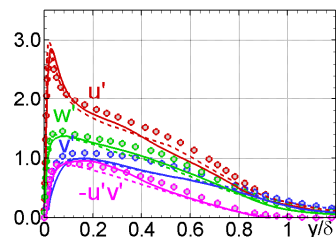
$Re_{\Theta} \approx 10^4$



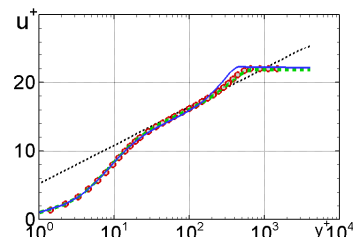
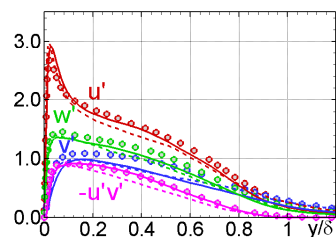
$x = 0.0, x/\delta_0 = 0$



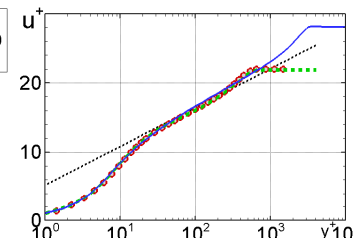
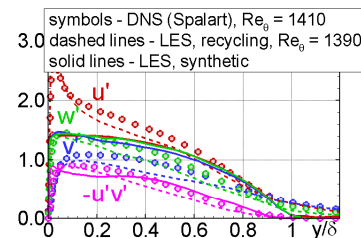
$x = 0.1, x/\delta_0 = 3$



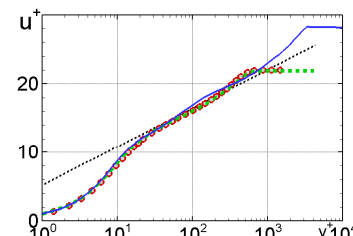
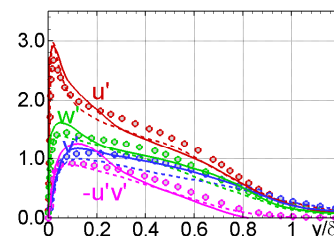
$x = 0.2, x/\delta_0 = 6$



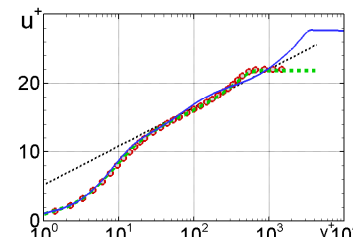
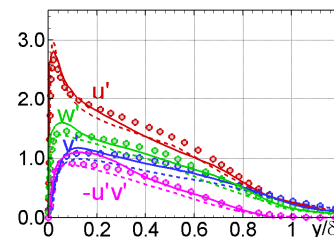
$x = 0.4, x/\delta_0 = 12$



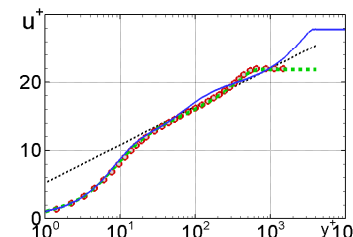
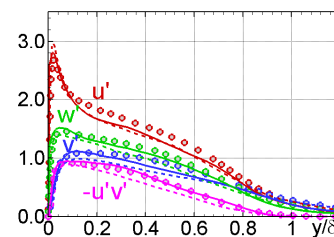
$x = 0.0, x/\delta_0 = 0$



$x = 0.1, x/\delta_0 = 3$



$x = 0.2, x/\delta_0 = 6$



$x = 0.4, x/\delta_0 = 12$

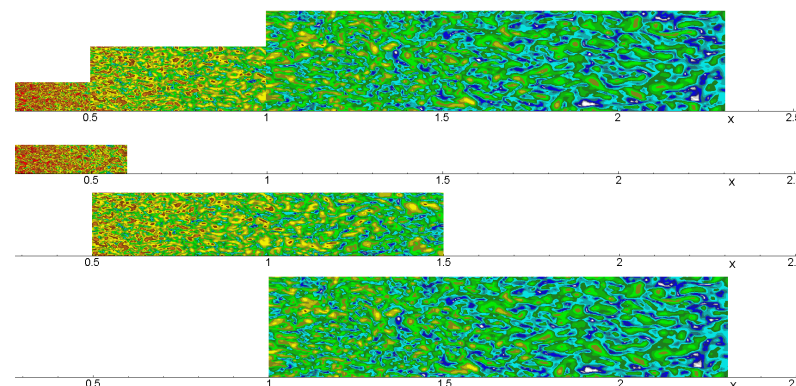
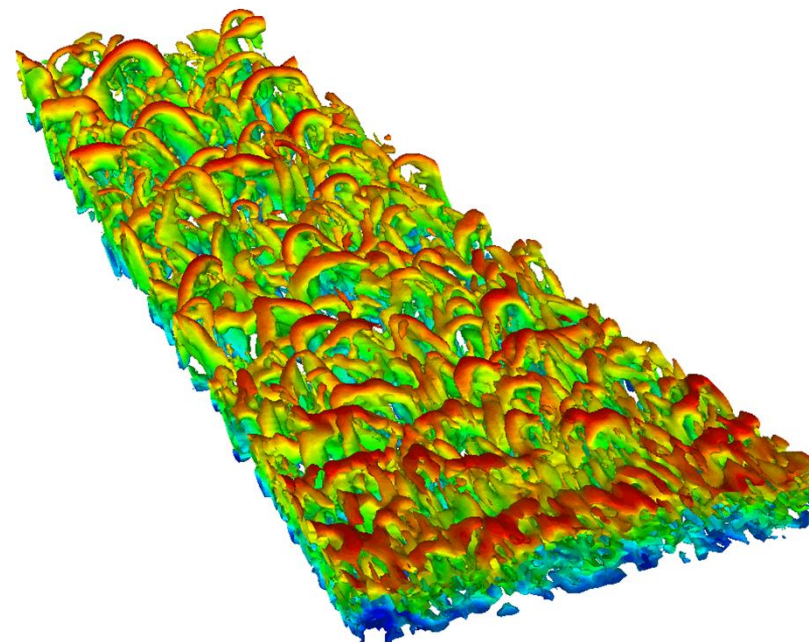
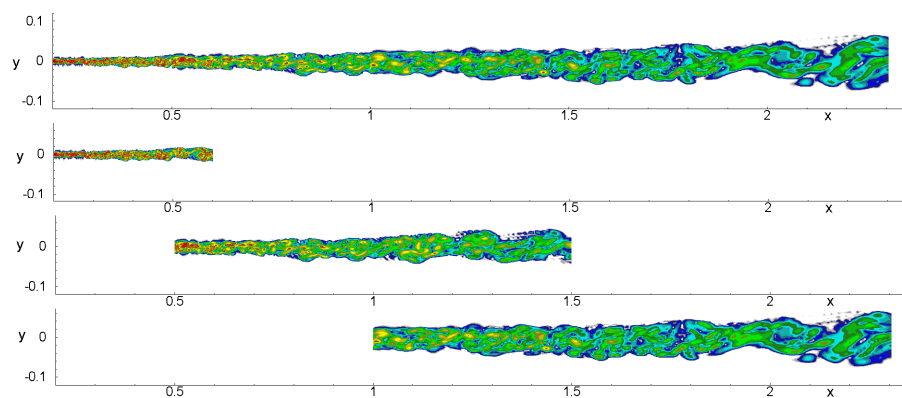
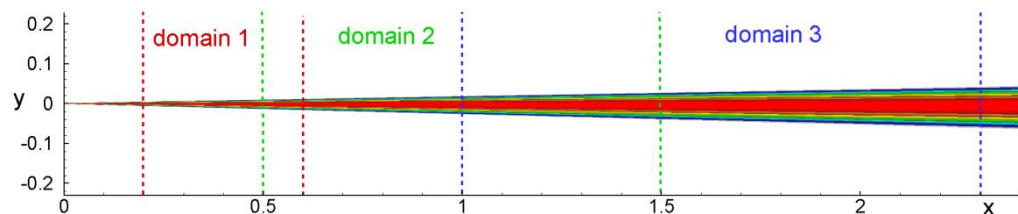
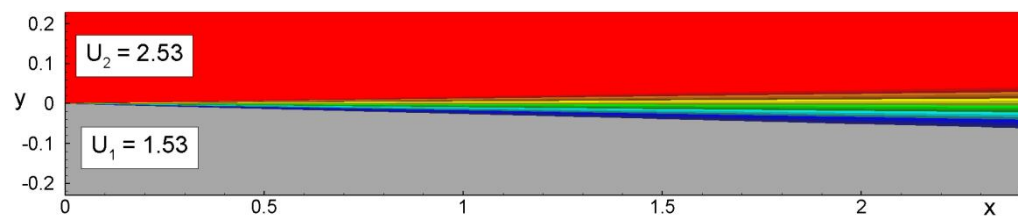
Профили скорости, полученные при двух числах Рейнольдса

# Применение STG: слой смешения

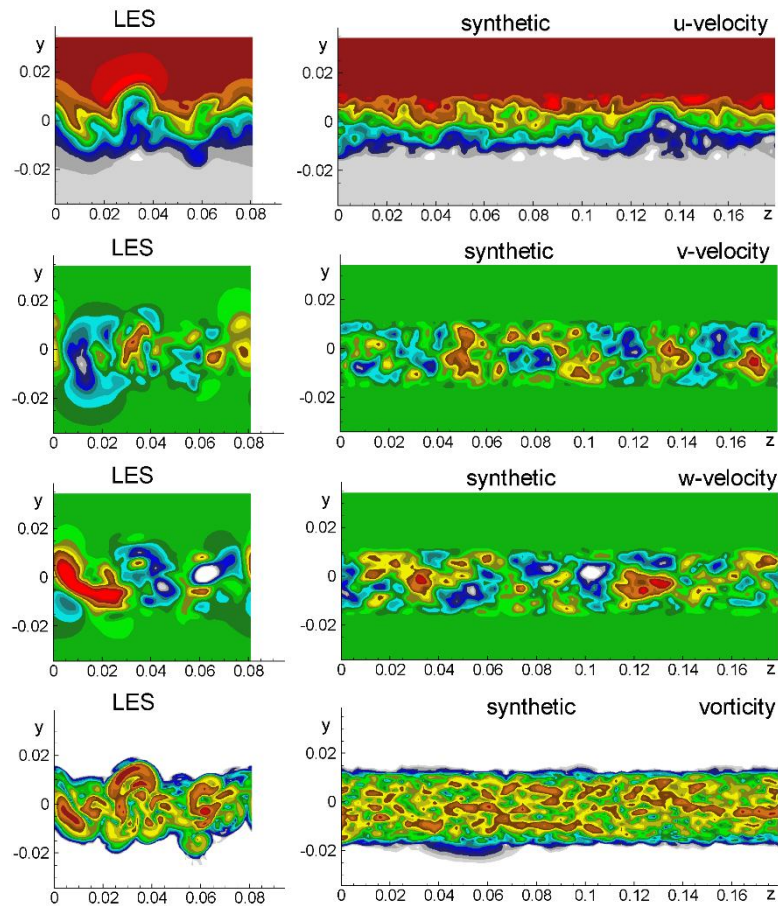
NTS code

Рассматривается 3 числа  
Рейнольдса

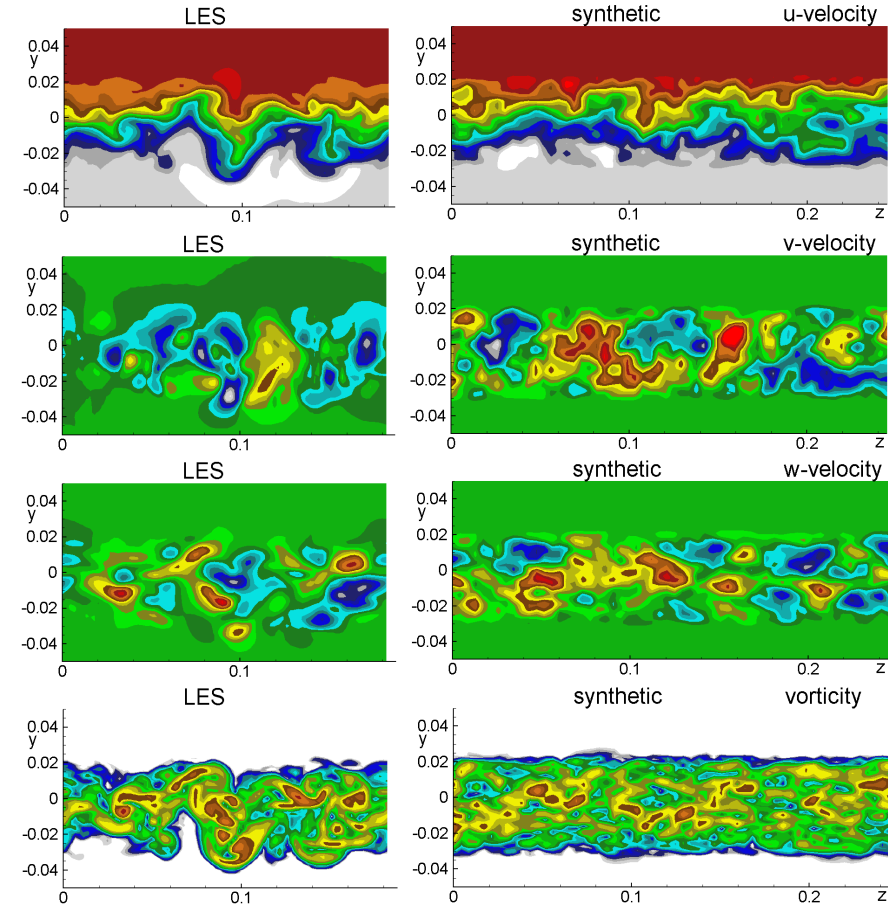
$$Re_{\Theta} \approx 650, 1500, 3000$$



# Применение STG: слой смешения



$X = 0.5$

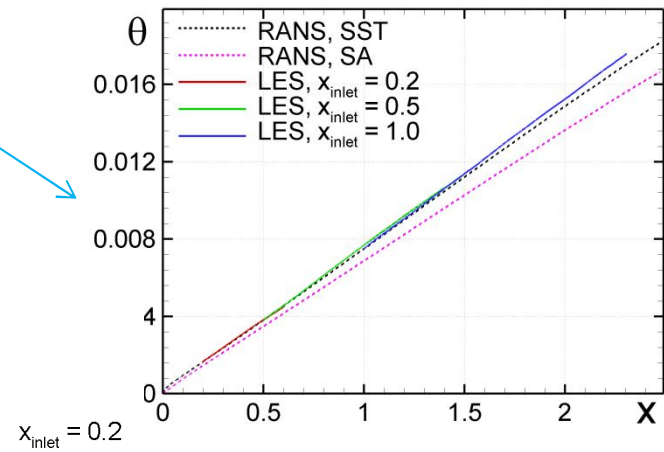
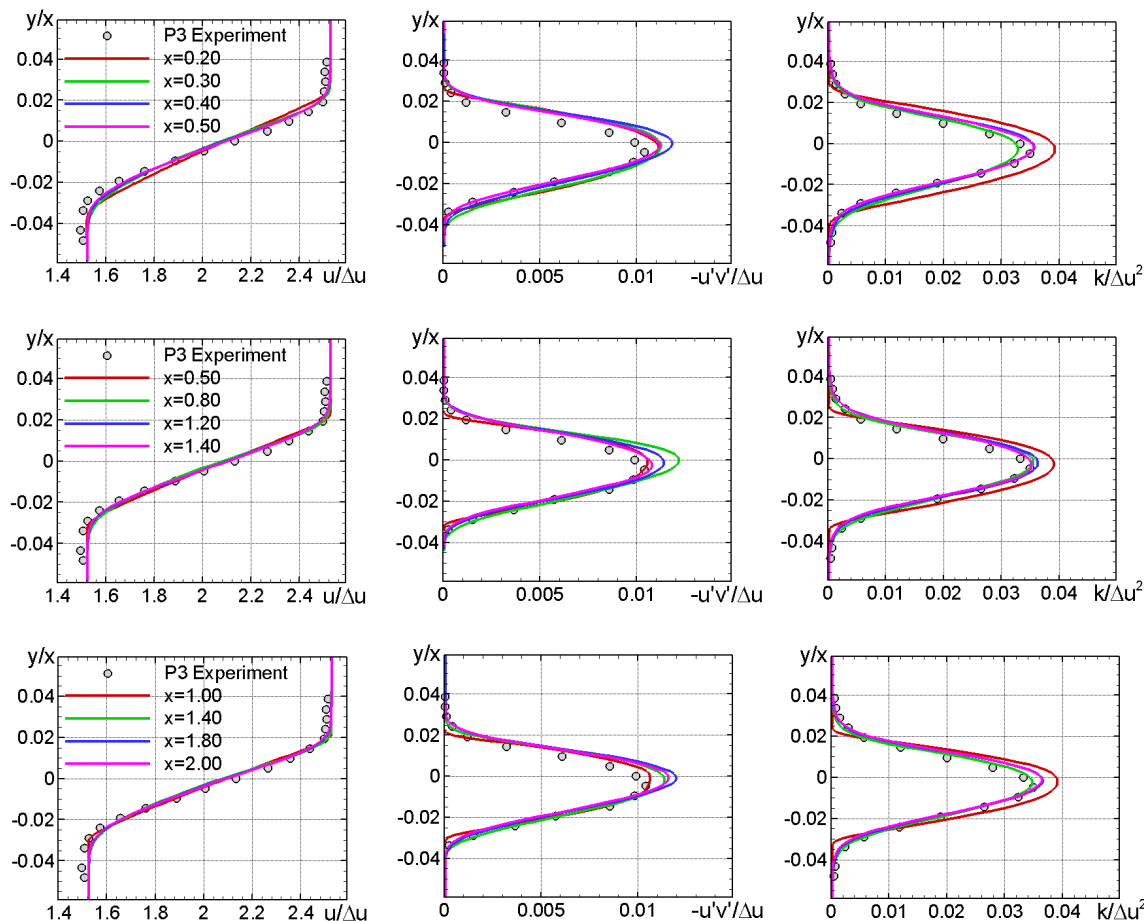


$X = 1.0$

Сравнение турбулентных структур, полученных при помощи STG,  
с результатами LES

# Применение STG: слой смешения

Сравнение коэффициента трения  
и профилей скорости



Все 3 расчета лежат  
на одной прямой

$x_{inlet} = 0.5$

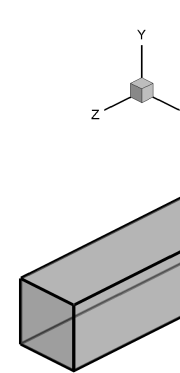
$x_{inlet} = 1.0$

# Применение STG: 3D диффузор

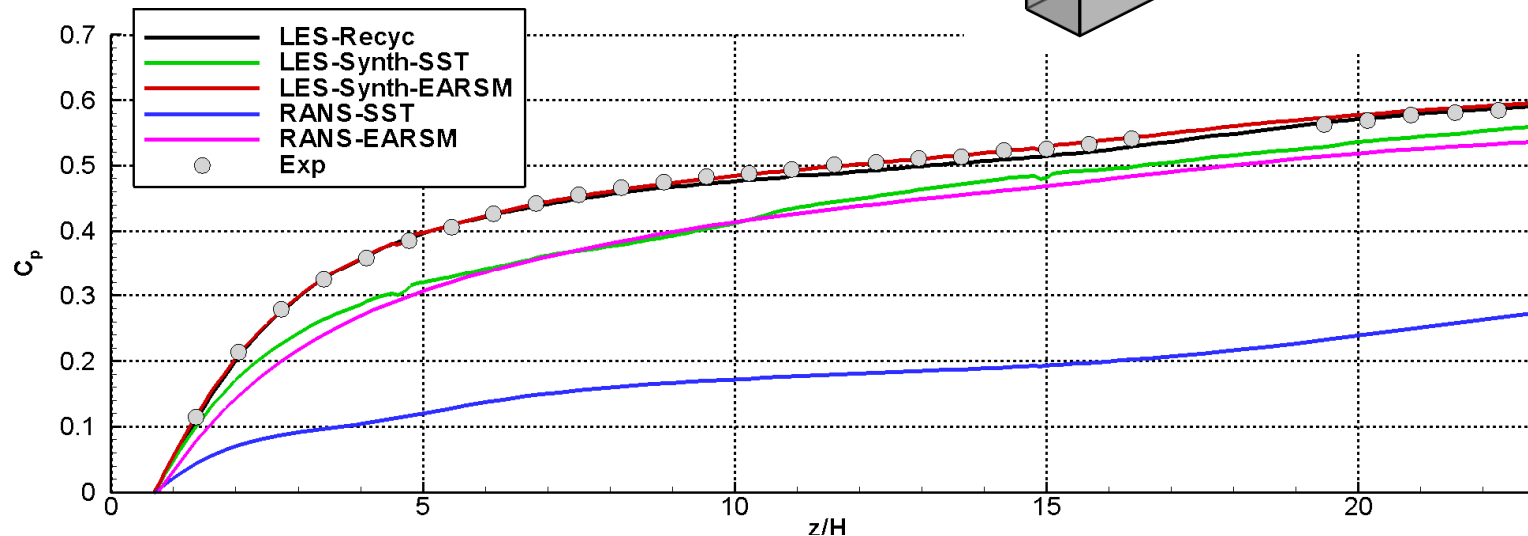
- Существенную роль играют вторичные токи
- Число Рейнольдса  $Re = U_b H / \nu = 10^4$ .

- $k-\omega$  SST RANS
- EARSM-WJ-BSL RANS
- LES, рециклинг
- LES, ГСТ на основе SST RANS
- LES, ГСТ на основе EARSM-WJ-BS

NTS code

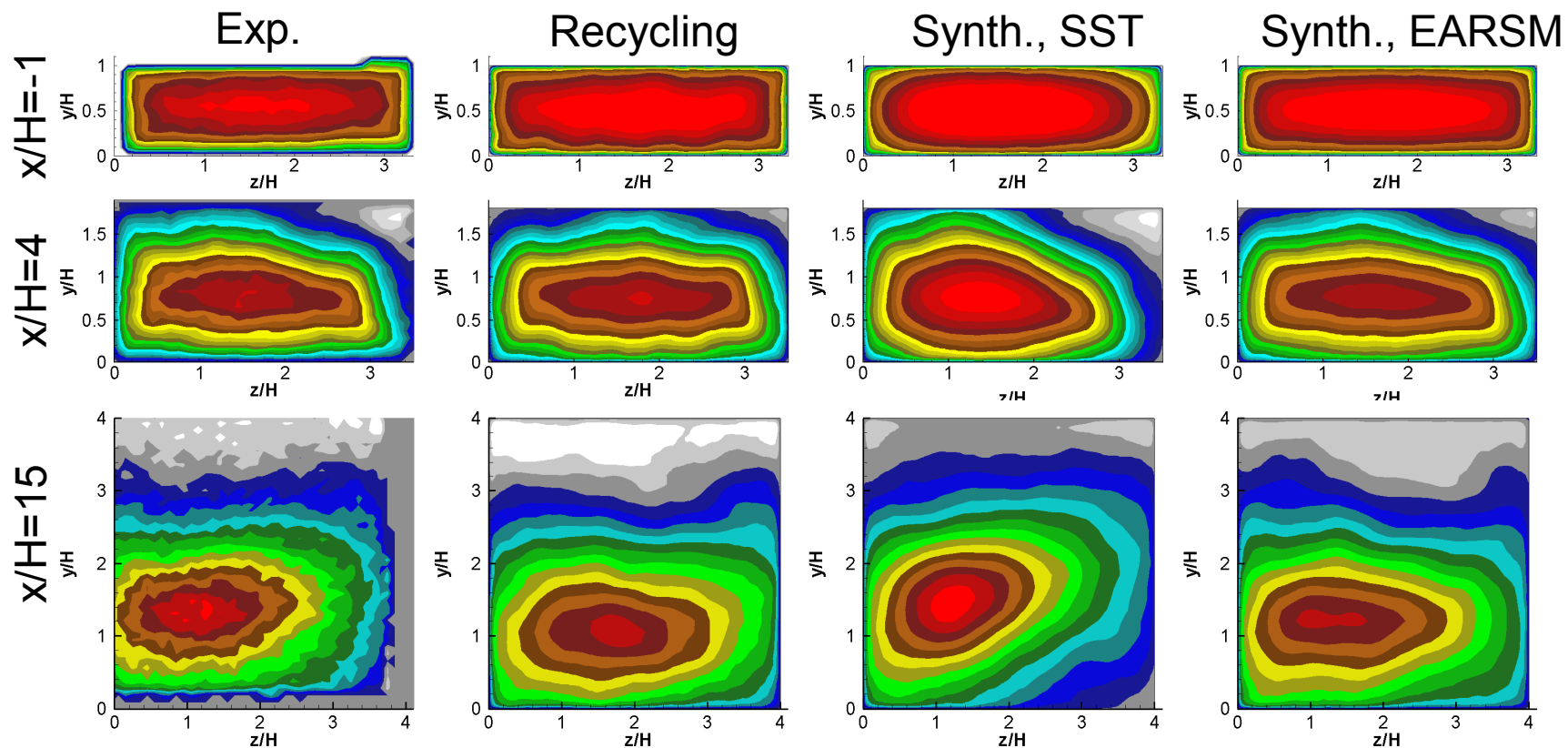


Развитое течение



- LES превосходит RANS
  - При использовании входных данных от подходящей модели (EARSM) ГСТ не уступает рециклингу

# Применение STG: 3D диффузор

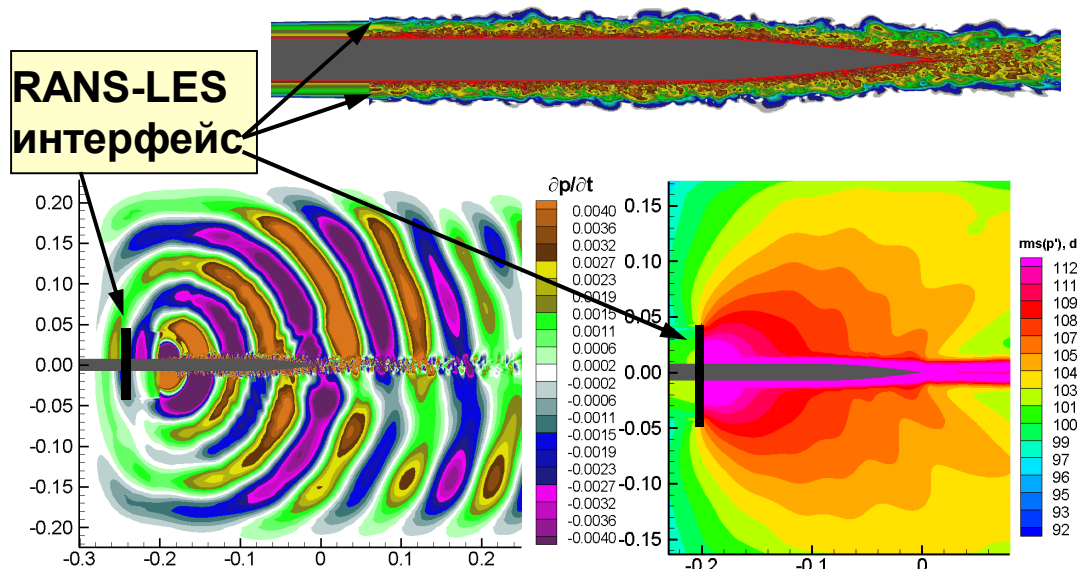
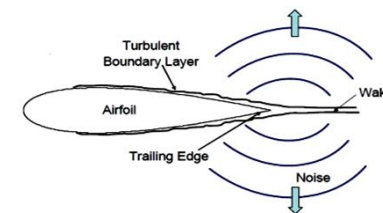


Сравнение расчетных профилей скорости с экспериментом

## Версия STG для аэроакустики

# Проблемы при расчете аэроакустики

- Практически любой генератор турбулентности неприменим для расчета задач аэроакустики без специальной доработки
  - Он является сильным источником ложного шума на RANS-WMLES интерфейсе (из-за внезапного появления вихрей)
- Пример: шум ближнего следа в окрестности задней кромки



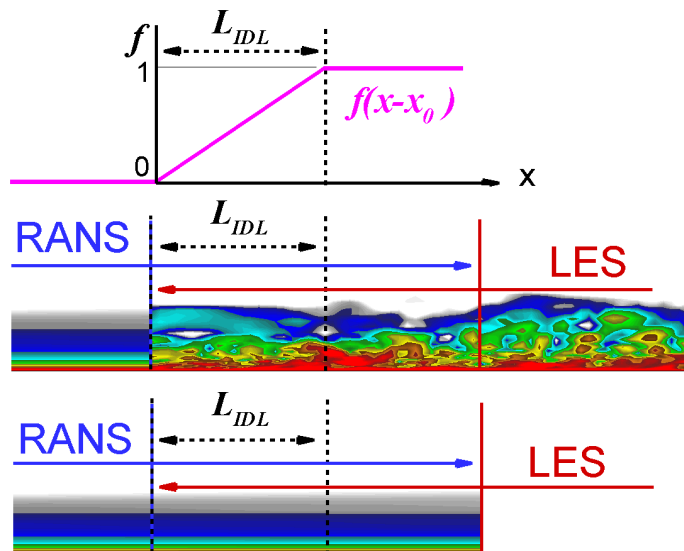
Мгновенное поле давления

Среднеквадратичное отклонение пульсаций давления

- Интенсивность ложного шума от интерфейса существенно превосходит интенсивность реального шума
- Необходима модификация, подавляющая ложный шум
  - Аэродинамика и «истинный» шум не должны быть затронуты

# Акустическая модификация STG

- Используется демпфирование давления (“internal” damping layer - IDL) в перекрывающейся RANS-WMLES области
  - IDL начинается от начала WMLES области и имеет протяженность около 2 толщин пограничного слоя
  - Внутри IDL давление в WMLES области демпфируется с использованием поля давления из RANS области

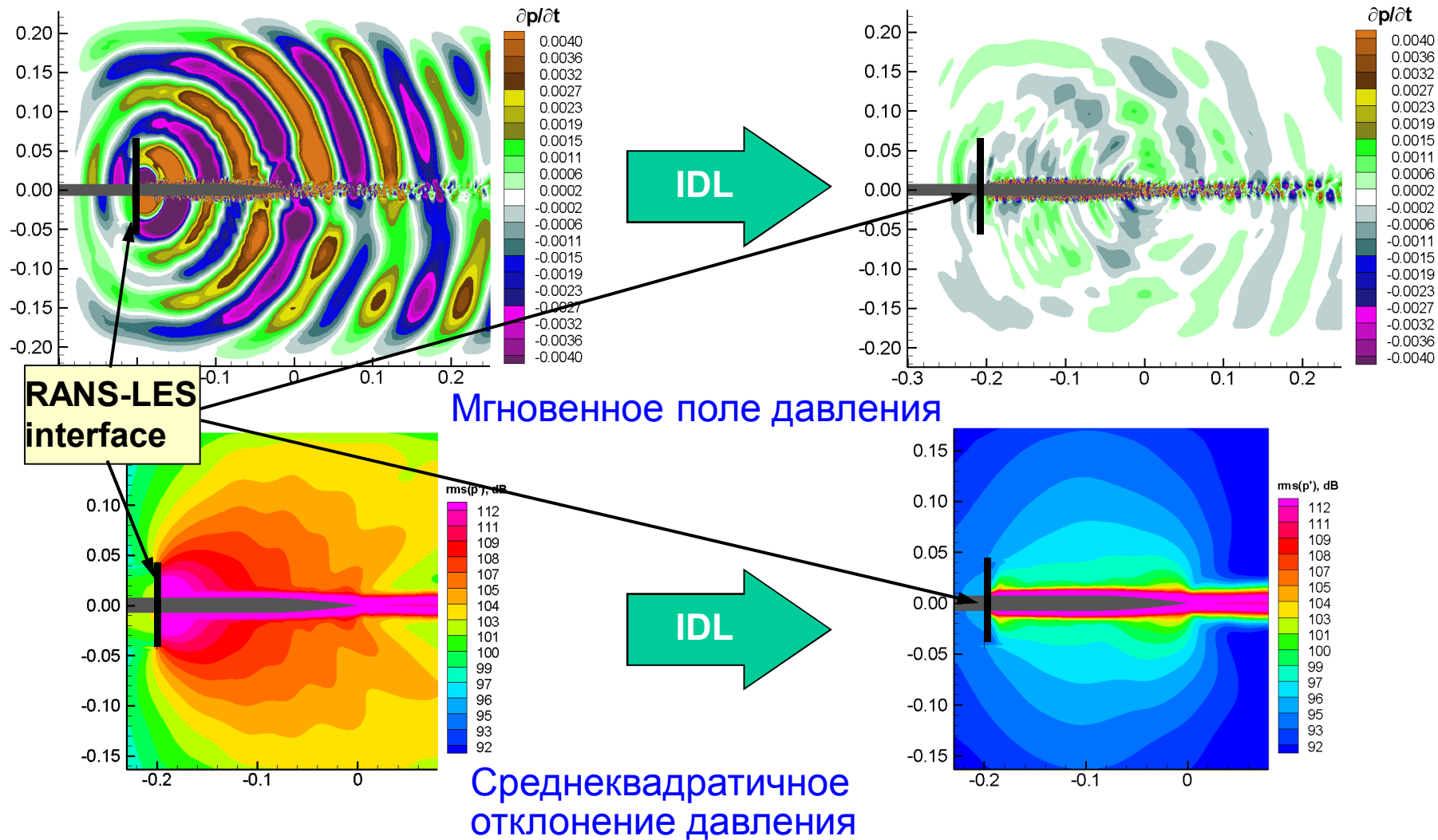


$$p_{LES}^{\text{mod}} = f(x) \cdot p_{LES} + [1 - f(x)] \cdot p_{RANS}$$

$$f = \max \{ \min [ (x - x_0) / L_{IDL}, 1 ], 0 \}$$

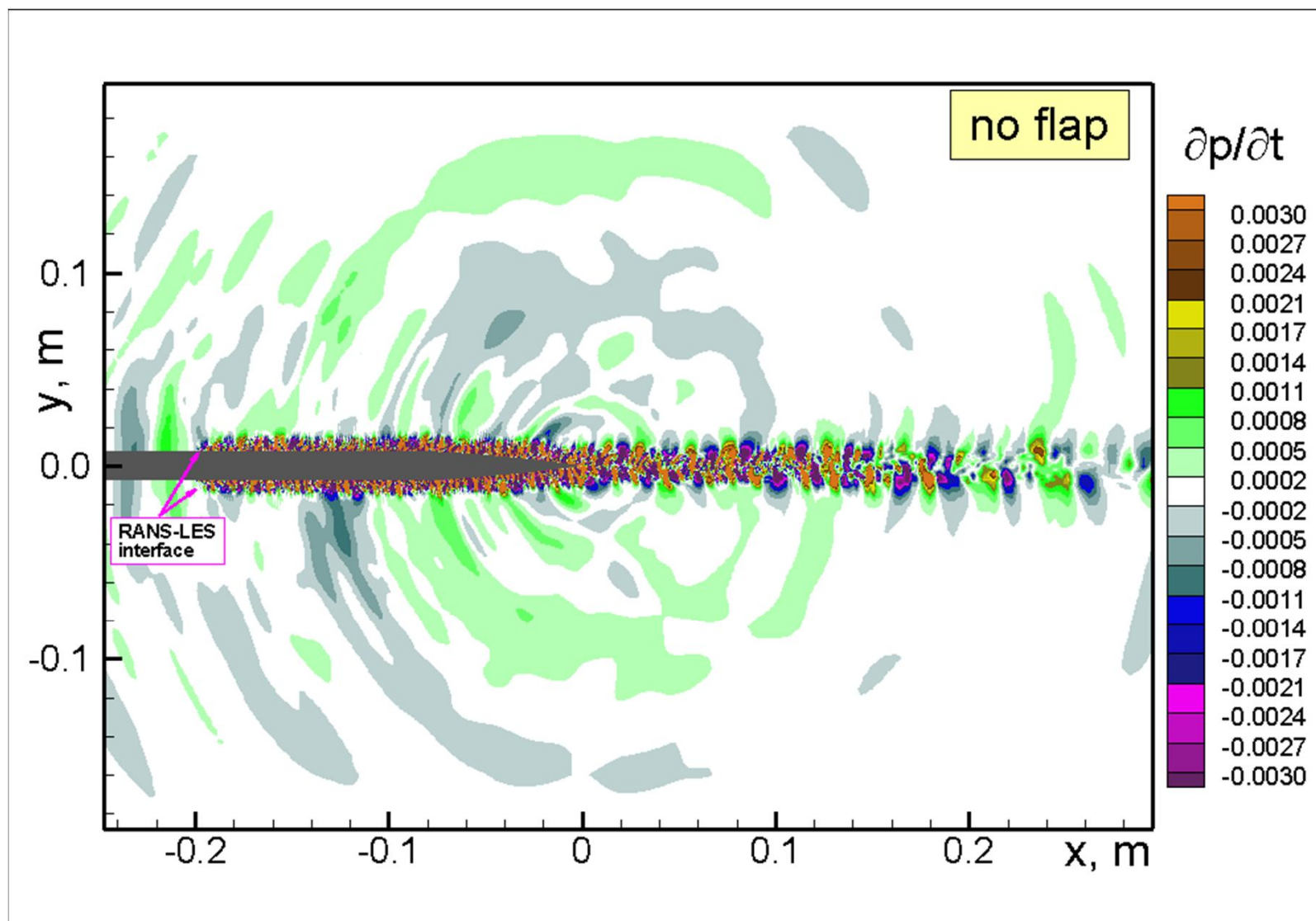
$$L_{IDL} \approx 2\delta_0$$

# Влияние на акустические характеристики



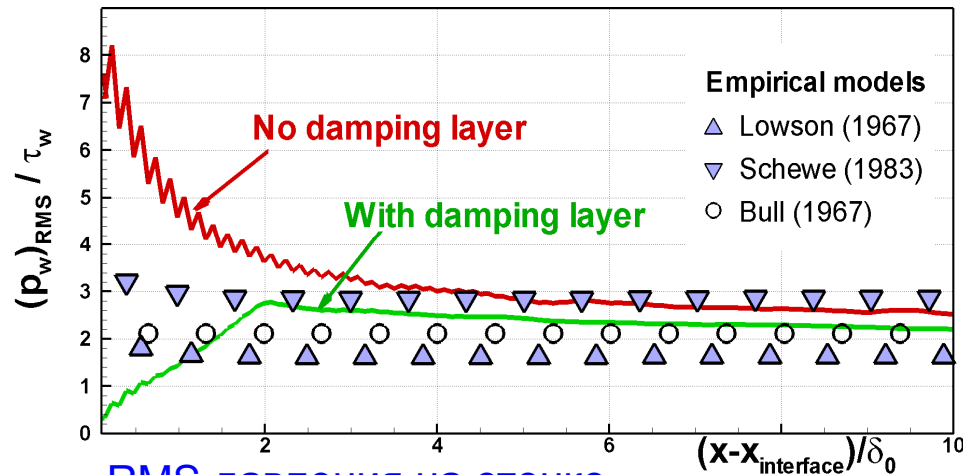
- Ложный источник шума практически исчез
- «Настоящий» шум от окрестности задней кромки стал доминирующим

# Влияние на акустические характеристики



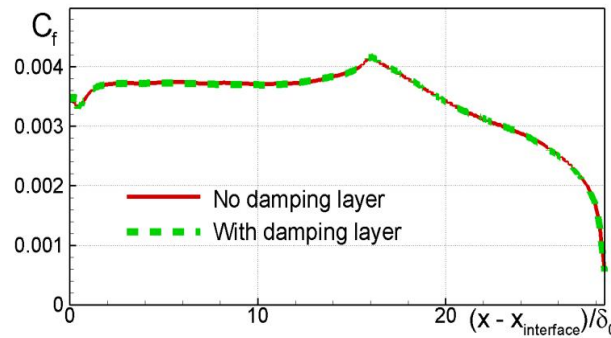
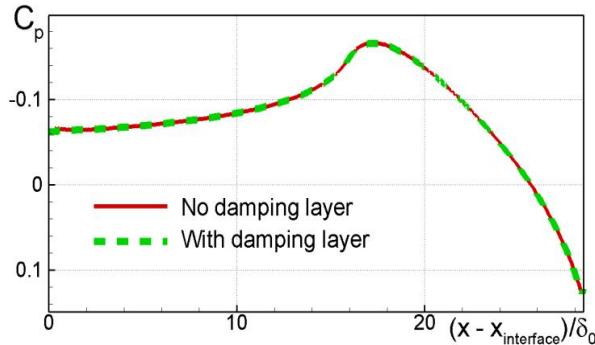
Animation of acoustic pressure

# Влияние на аэродинамические характеристики

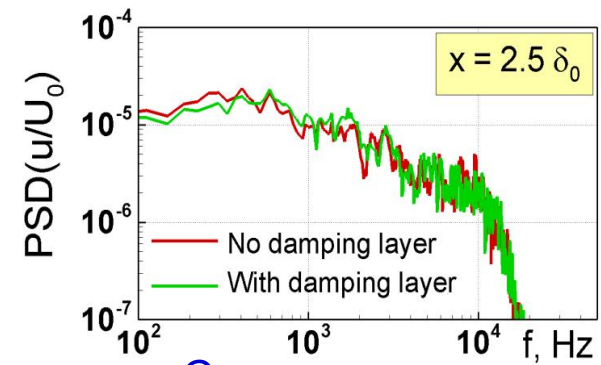


RMS давления на стенке

- Акустическая версия гораздо лучше предсказывает давление на стенке



Коэффициенты давления и трения

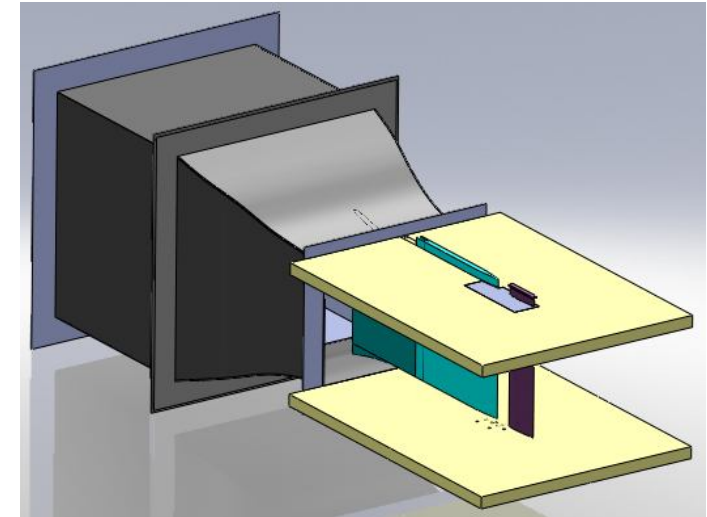


Спектр скорости при  $y/d_0 = 0.5$

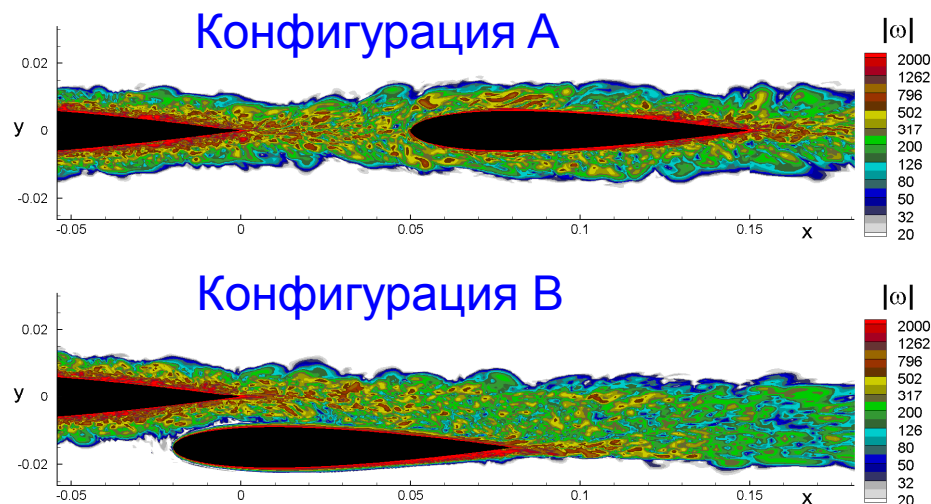
- IDL не затрагивает аэродинамические характеристики потока

# Конфигурация крыло-закрылок

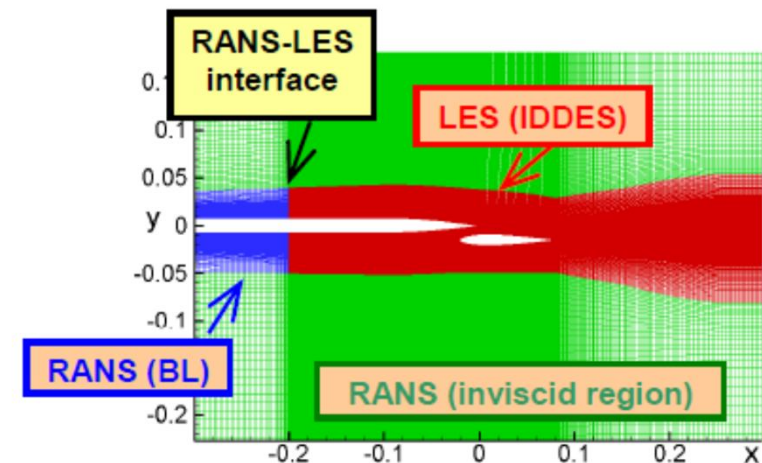
- Эксперимент ECL
  - Крыло – пластина с острой задней кромкой
  - Закрылок – профиль NACA0012, хорда 10 см
  - $Re_{\text{закрылок}} = 3.3 \cdot 10^5$ ,  $M=0.15$  ( $U=50$  m/s)
- Расчет в рамках зонного RANS-IDDES
  - Генерация искусственной турбулентности на интерфейсе методом ГСТ
    - ✓ Использование поглощающих слоев для подавления ложного шума
- Исследованы 2 конфигурации с различными механизмами генерации шума



Экспериментальная установка

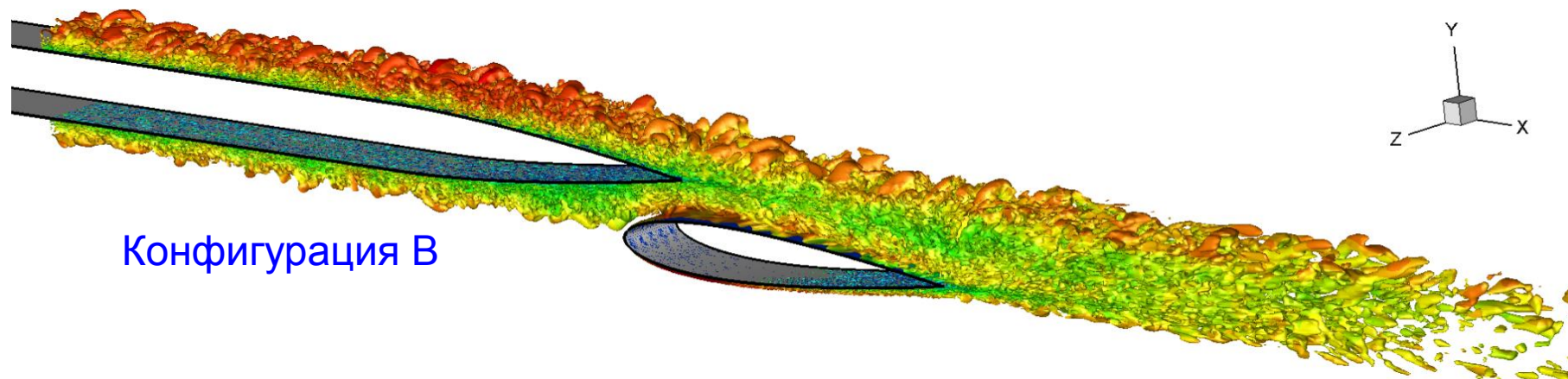
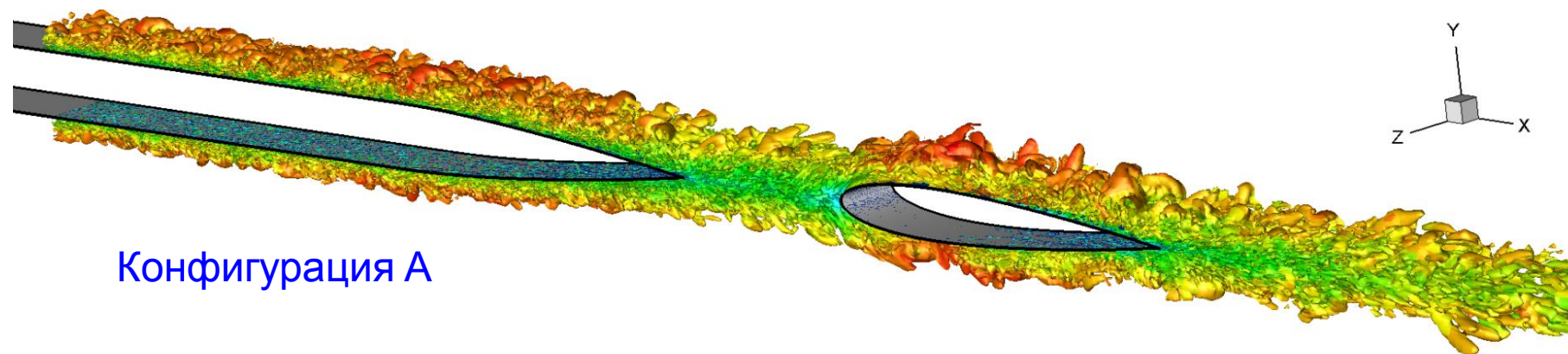


Мгновенные поля завихренности



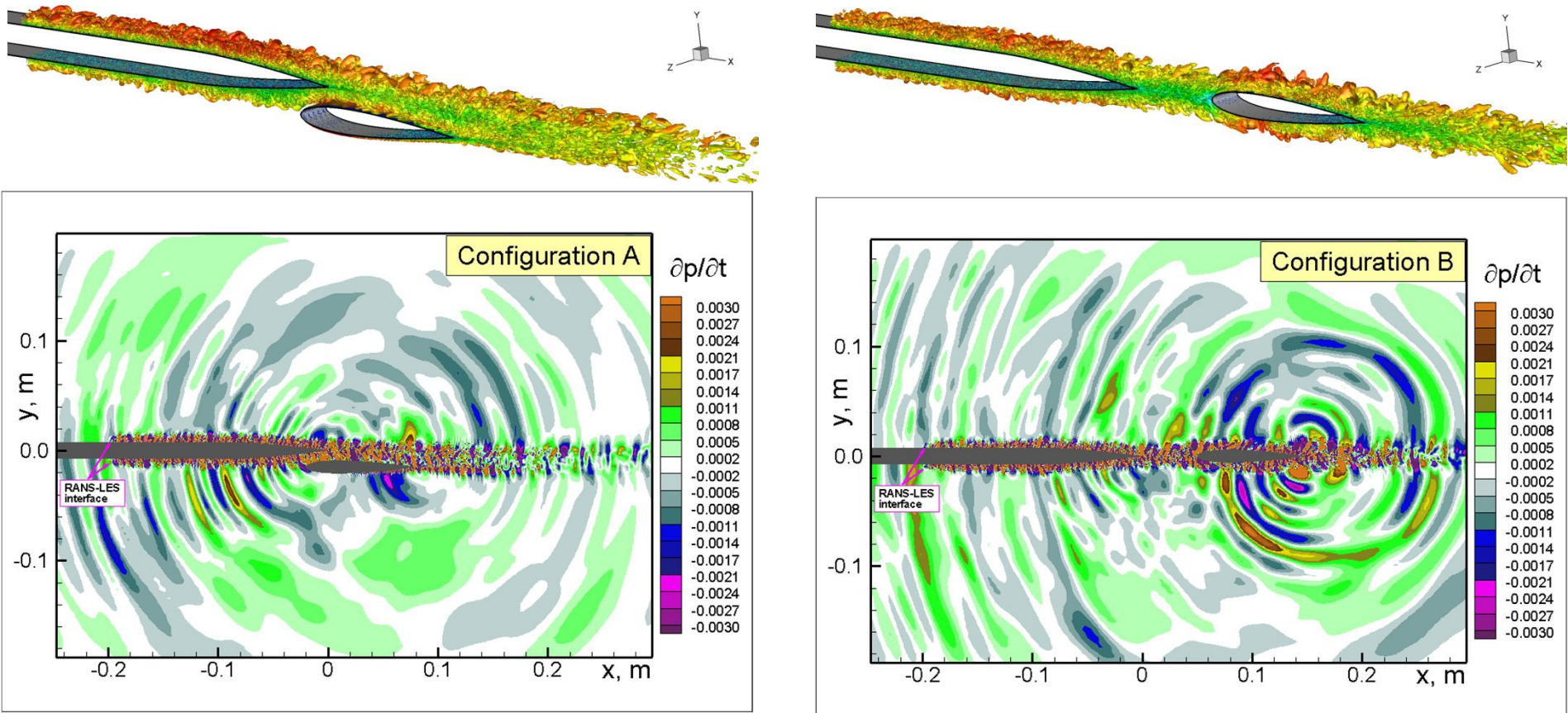
Разделение на RANS и IDDES зоны

# Трехмерные визуализации



# Ближнее акустическое поле

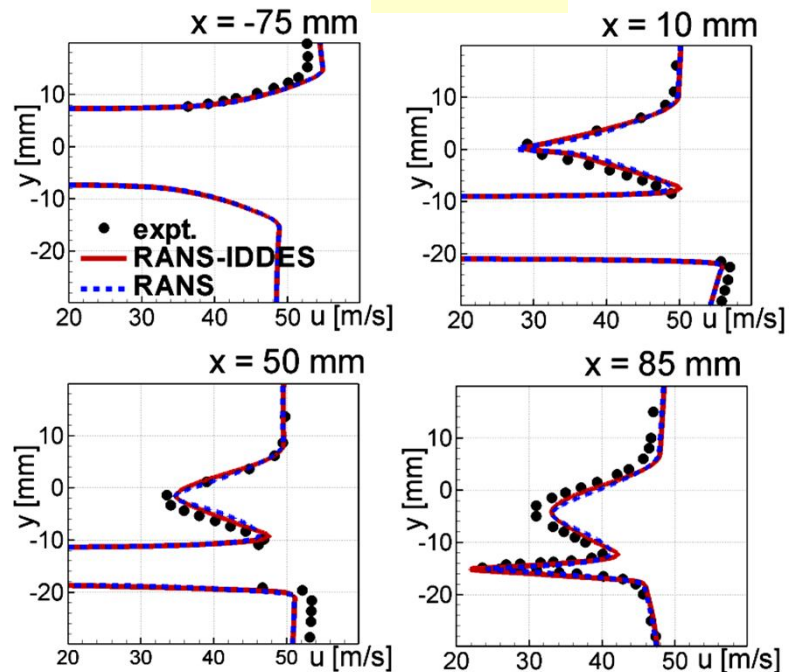
- Разрешенные турбулентные структуры из пограничных слоев на “основном крыле” по-разному взаимодействуют с закрылком
  - Различная локализация и интенсивность источников звука
- Шум ложного источника на RANS-LES интерфейсе пренебрежимо мал



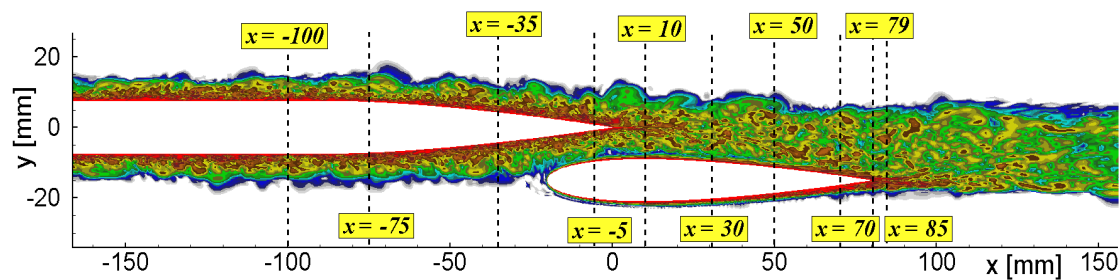
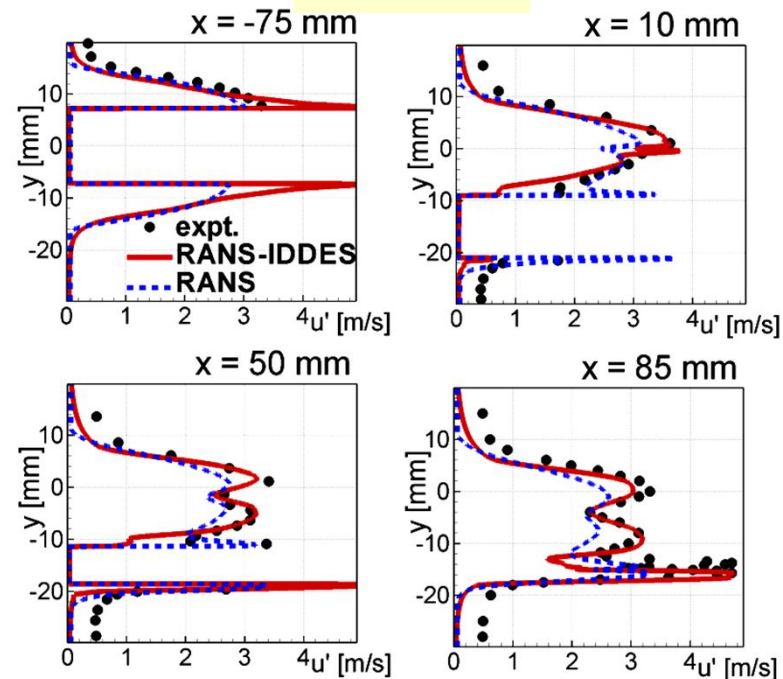
Изоповерхности закрутки и давление в акустическом диапазоне

# Сравнение с экспериментом

$U_{\text{mean}}$



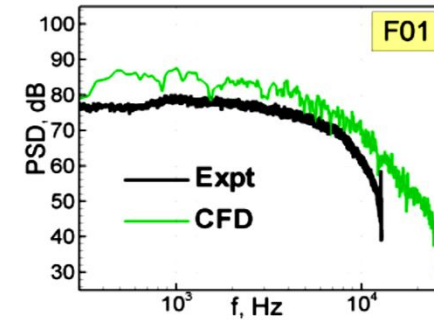
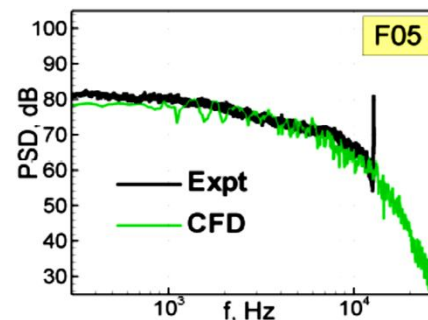
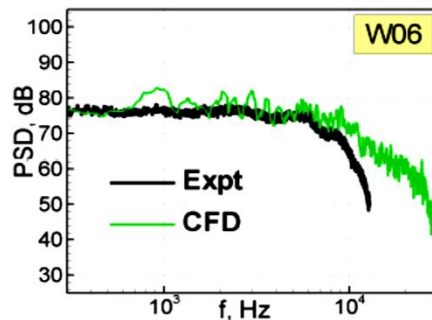
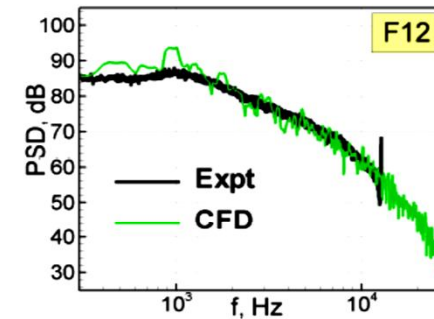
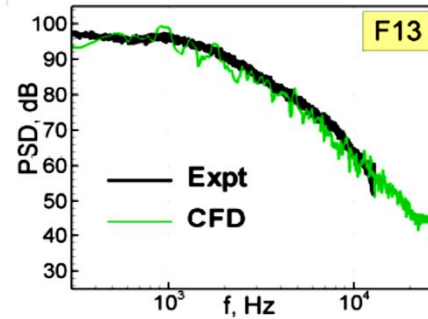
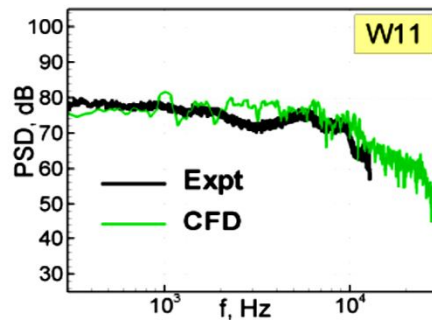
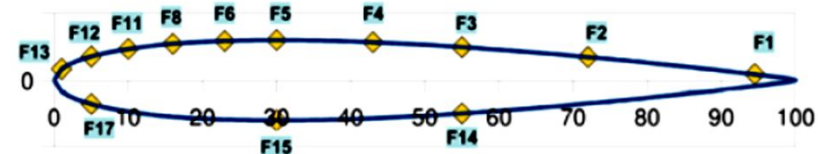
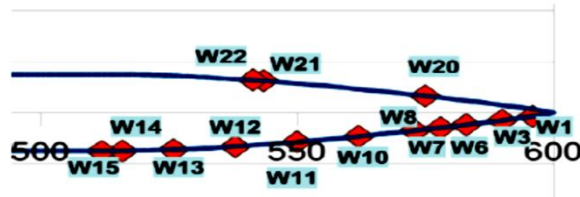
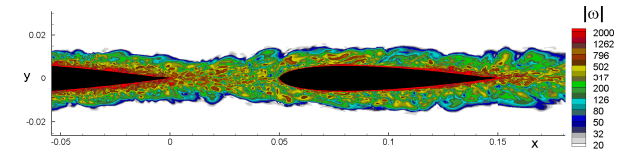
$\text{rms}(u')$



Конфигурация А

# Сравнение с экспериментом

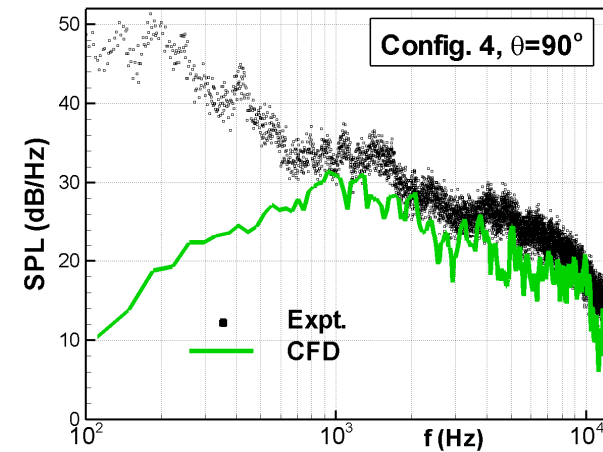
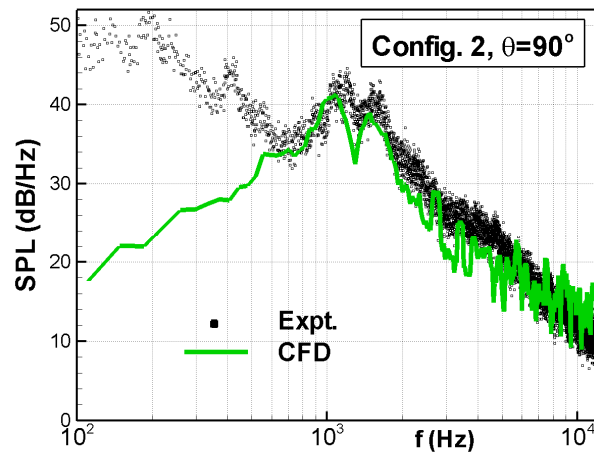
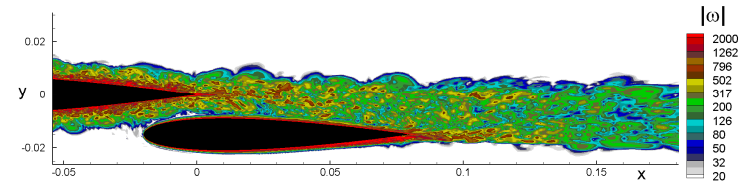
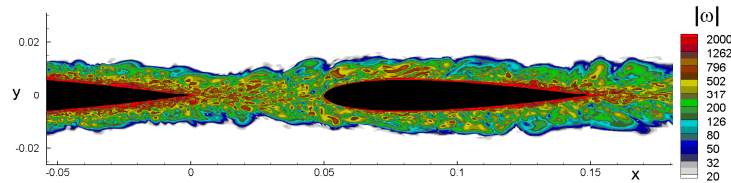
## Спектры давления на стенке



- Ближнее поле
  - Весьма точное предсказание спектров вдоль всей поверхности

# Сравнение с экспериментом

## Шум в дальнем поле

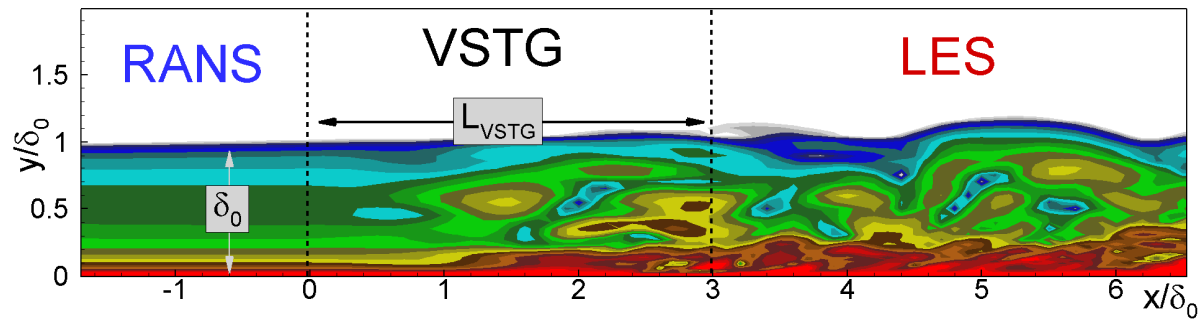


### Дальнее поле

- Хорошее согласование с экспериментом вне области низких частот
  - ✓ При  $f < 700$  Hz в эксперименте доминирует фоновый шум трубы

# Объемный источник турбулентности

# Объемный источник турбулентности

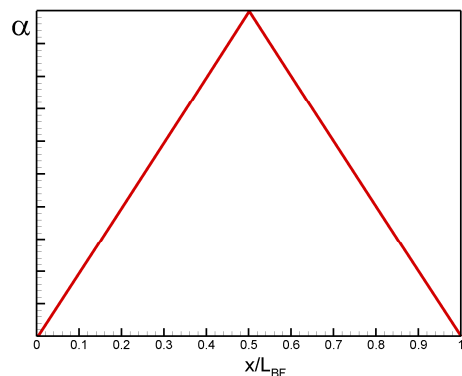


- В осредненные по Рейнольдсу уравнения баланса импульса вводится нестационарный Объемный Источник Турбулентности :

$$f_i = C_{VSTG} \cdot \rho \cdot U_0 \cdot u'_i \cdot \alpha(x) / L_{VSTG} \quad C_{VSTG} = 1.1$$

- $U_0$  – масштаб скорости,  $L_{VSTG}$  – протяженность источника
- Пульсации скорости  $u'_i$  вычисляются при помощи Генератора Синтетической Турбулентности (STG)
- Входные параметры STG (напряжения Рейнольдса) определяются из RANS области вверх по потоку от источника.

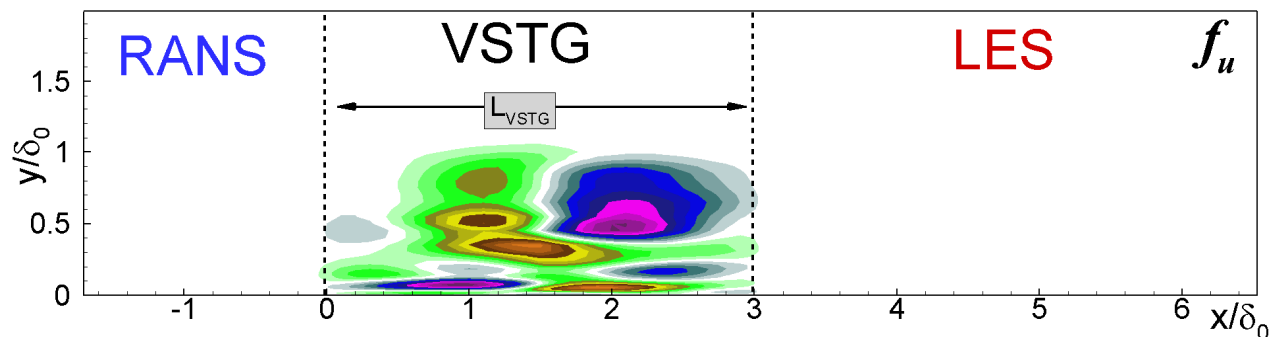
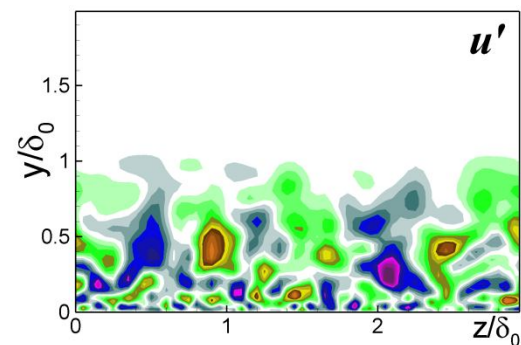
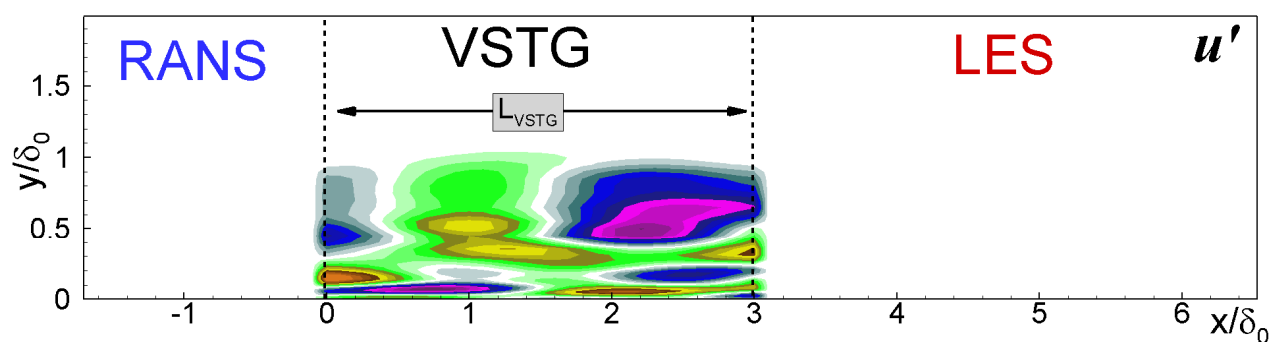
# Весовая функция



$$f_i = C_{VSTG} \cdot \rho \cdot U_0 \cdot u'_i \cdot \alpha(x) / L_{VSTG}$$

$$\int \alpha(x) \cdot dx = L_{VSTG}$$

Данная весовая функция обеспечивает низкий уровень ложного шума от объемного источника



# Изменение зависимости от времени в STG

Стандартное определение непригодно для использования в рамках объемного источника

$$v'_i(\vec{r}, t) = 2 \cdot \sqrt{3/2} \cdot \sum_{n=1}^N \sqrt{q^n} \cdot [\sigma_i^n \cdot \cos(k^n \cdot (d_j^n \cdot x_j) + \varphi^n + s^n \cdot t / \tau)]$$

$$\tau = C_\tau \cdot l_e^{\max} / U \quad C_\tau = 2$$

Для использования в рамках объемного источника необходима «конвективная» запись зависимости от времени

$$v'_i(\vec{r}, t) = 2 \cdot \sqrt{3/2} \cdot \sum_{n=1}^N \sqrt{q^n} \cdot [\sigma_i^n \cdot \cos(d_j^n \cdot r'_j + \varphi^n)]$$

$$x' = 2 \cdot \pi \cdot (x - U \cdot t) / l_e^{\max}$$

$$y' = k^n \cdot y$$

$$z' = k^n \cdot z$$

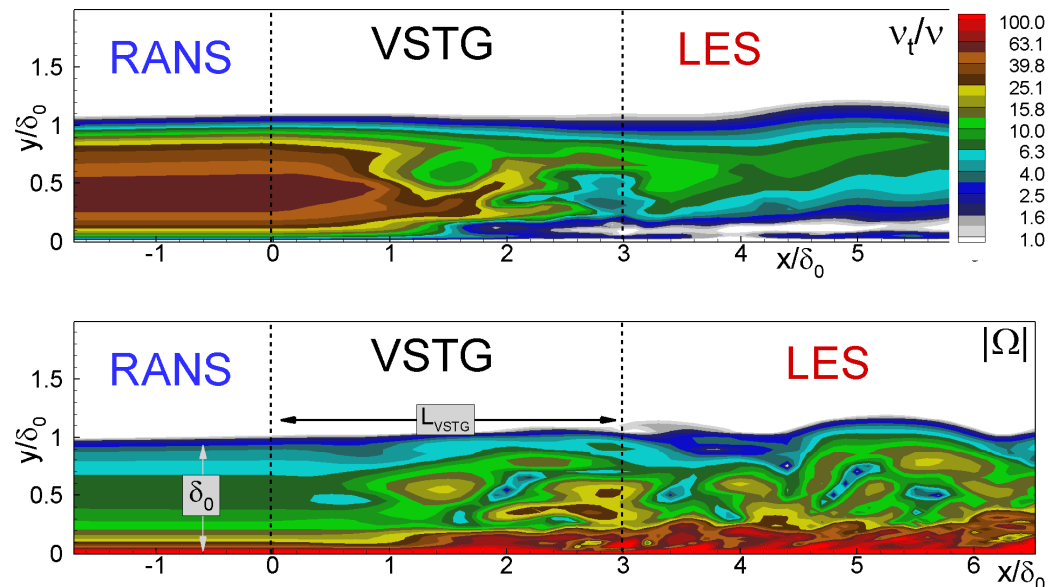
# Сток в уравнении для кинетической энергии турбулентности

Для перевода турбулентной вязкости из RANS в LES в уравнение переноса кинетической энергии турбулентности добавляется объемный сток:

$$f_{k_t} = -\rho \cdot U_0 \cdot \max(v_t - v_t^{sgs}, 0) \cdot \omega_t \cdot \alpha(x) / L_{VSTG}$$

- Величина  $v_t^{sgs}$  вычисляется при помощи подсеточной модели Смагоринского с использованием линейного масштаба IDDES:

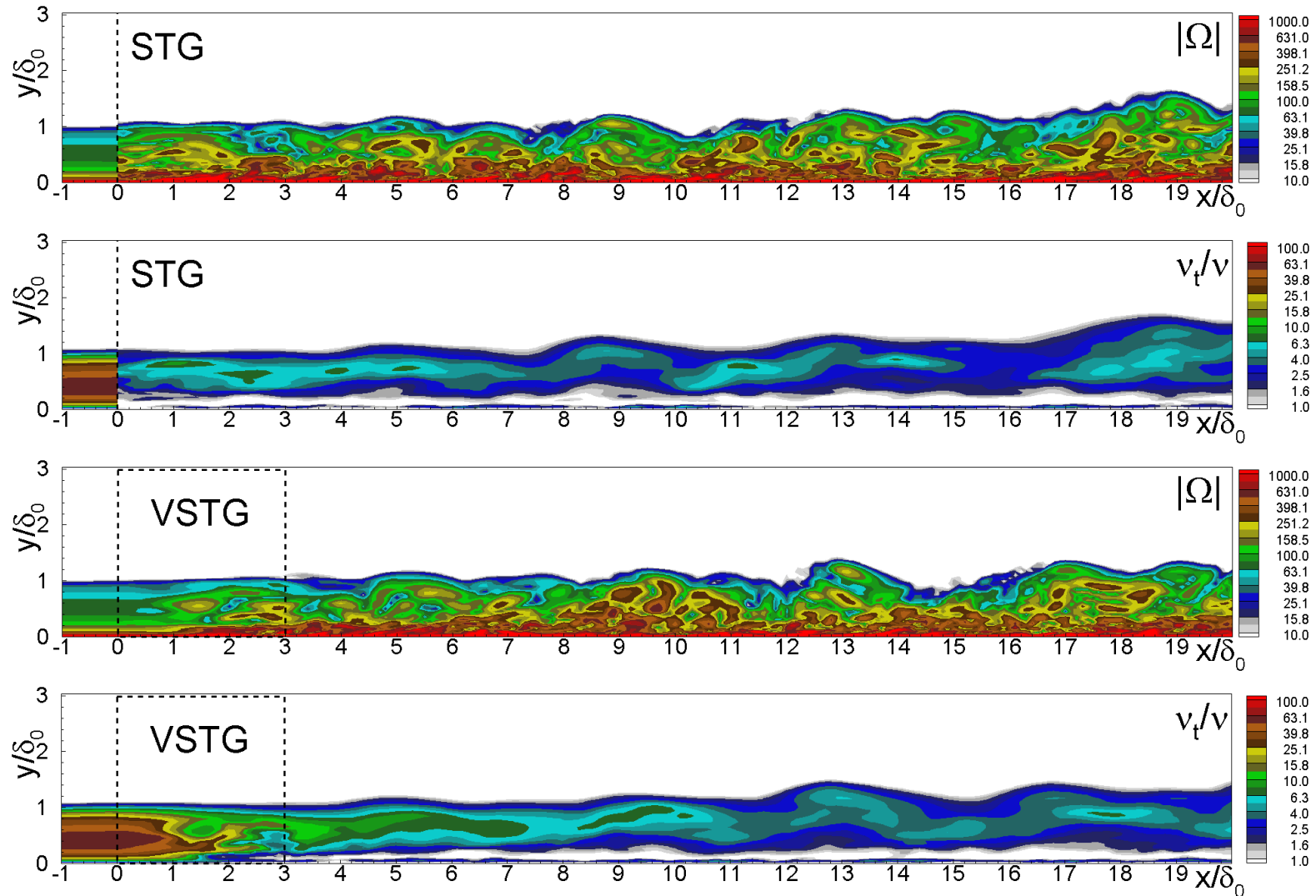
$$v_t^{sgs} = (0.2 \cdot \Delta_{IDDES})^2 \cdot S$$



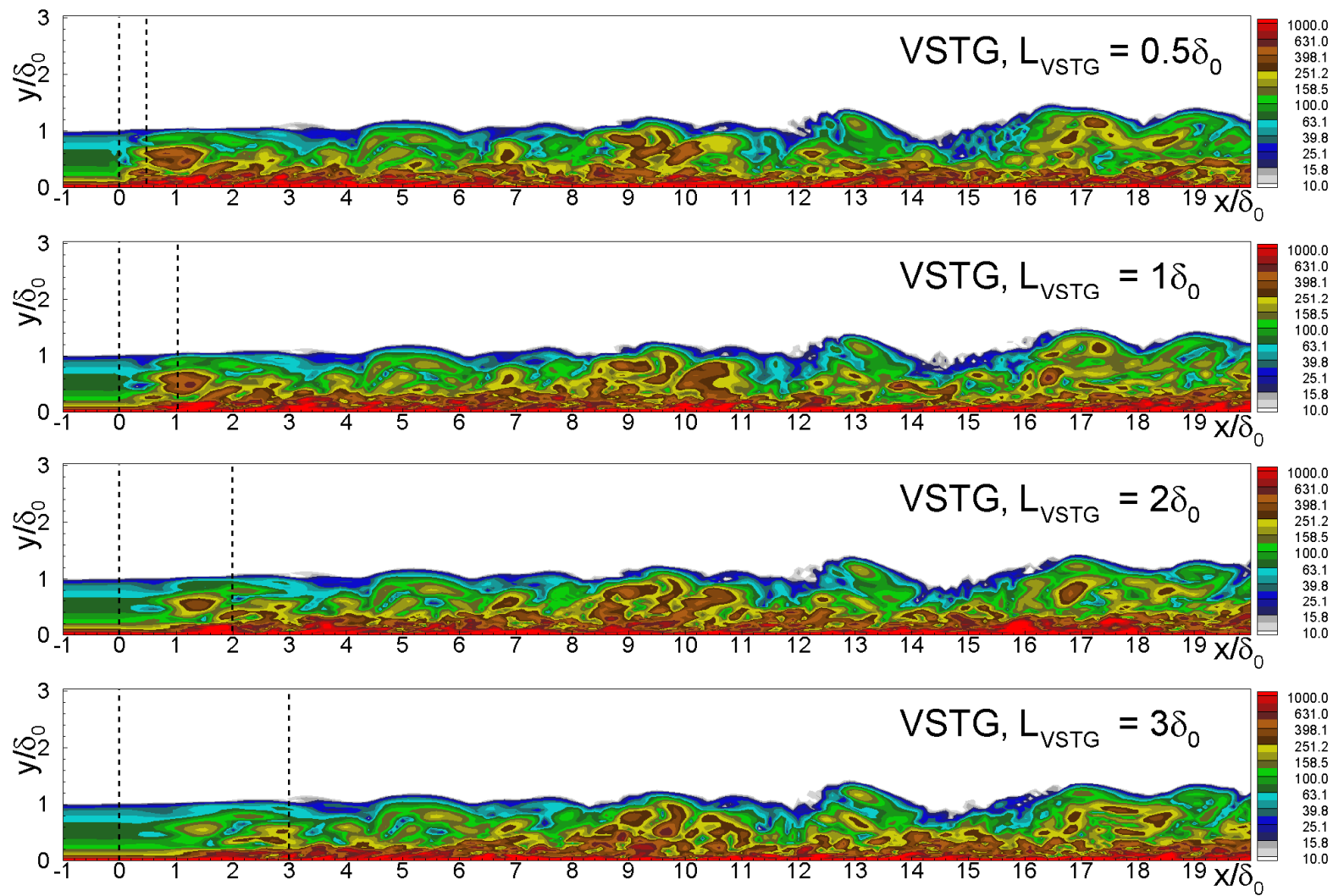
# Сравнение STG и VSTG

Рассматривается сжимаемый турбулентный пограничный слой  
при следующих параметрах  $Re_L = L \cdot U_0 / \nu = 3.5 \cdot 10^6$   $M = 0.5$

$$\delta_0 \approx 0.005 \quad Re_{\Theta 0} \approx 2 \cdot 10^3 \quad L_{LES} \approx 30 \cdot \delta_0$$

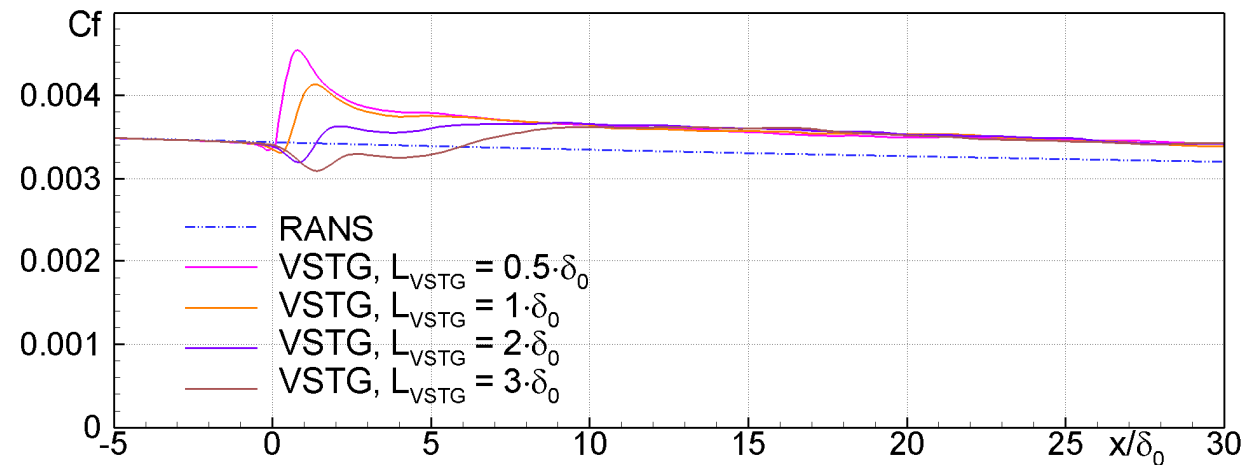
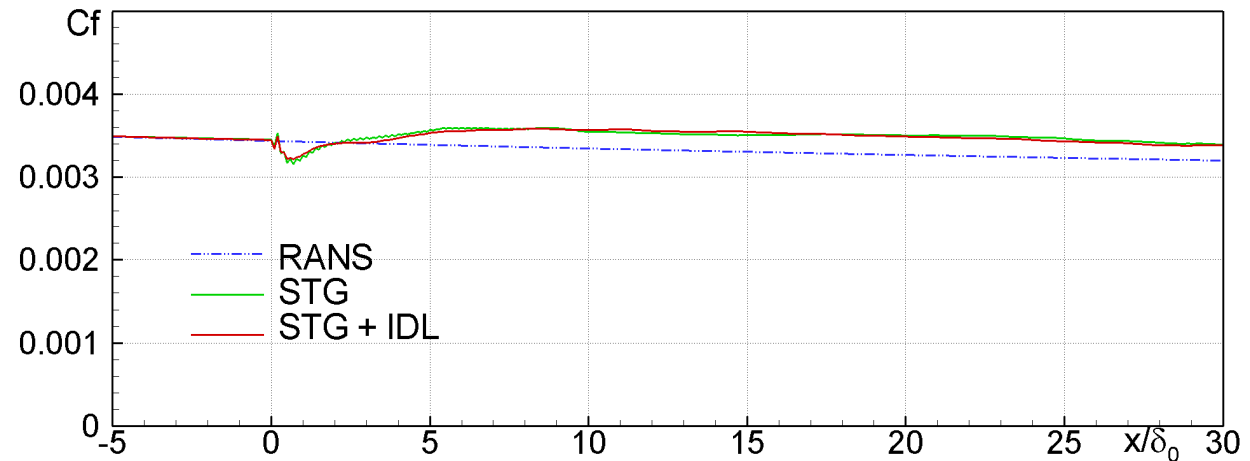


# Влияние длины области источника



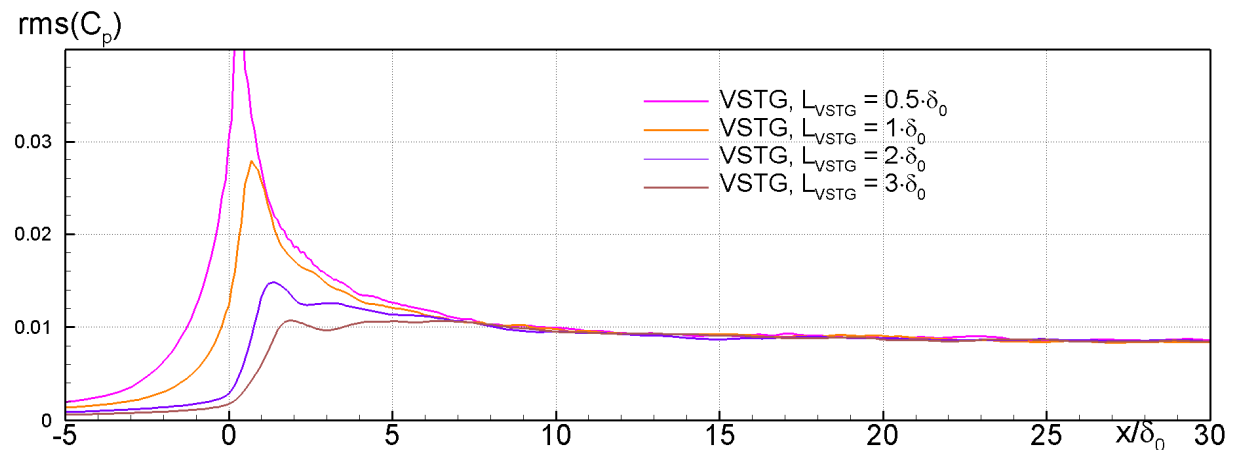
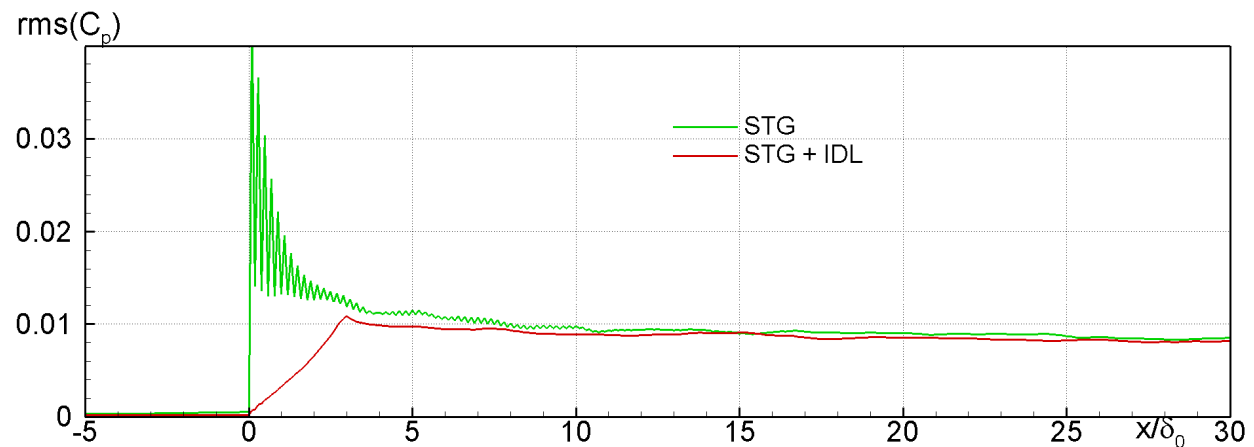
# Влияние длины области источника

- Увеличение длины области объемного источника приводит к увеличению длины переходной зоны



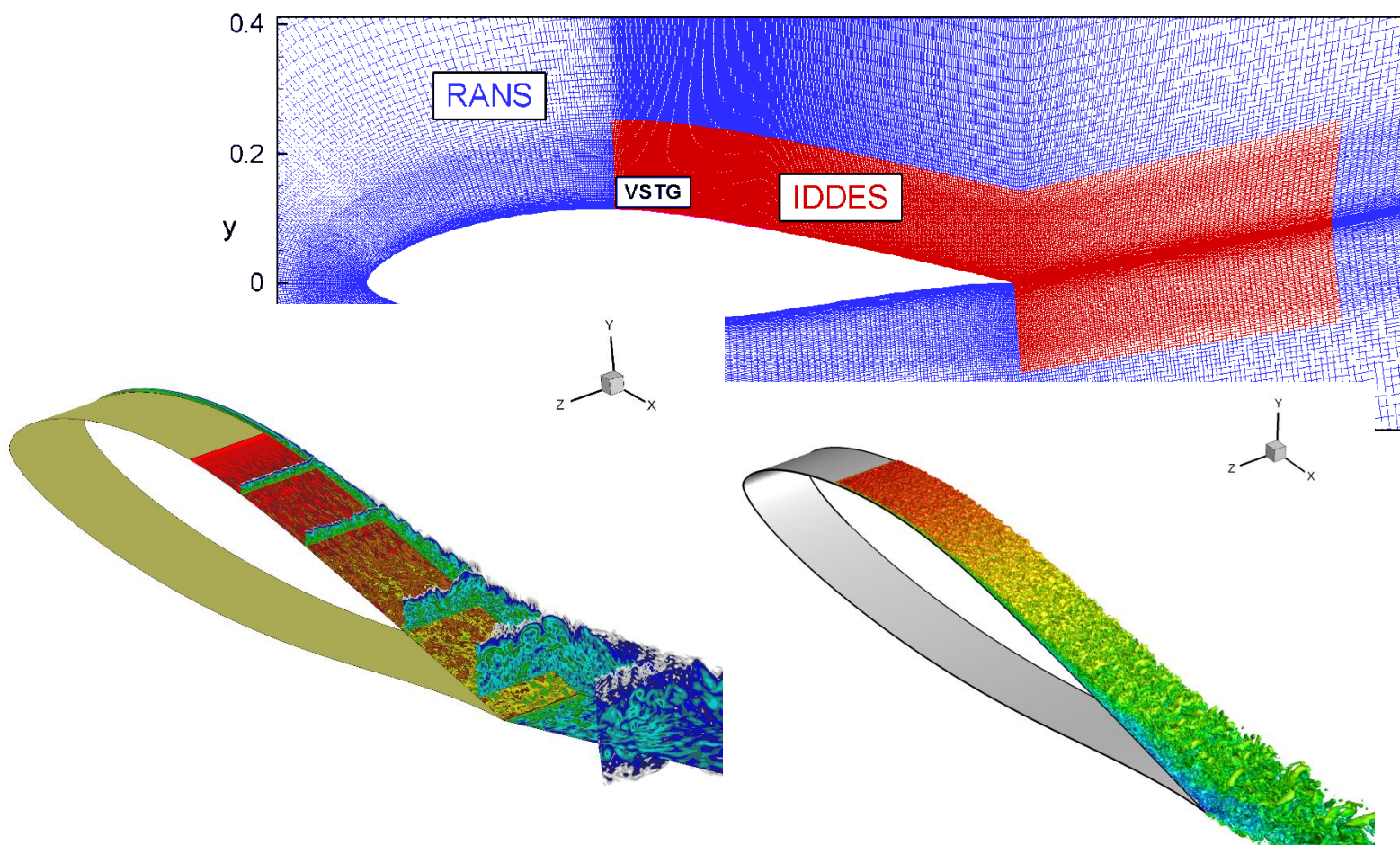
# Влияние длины области источника

- Однако при увеличении длины области объемного источника падает интенсивность ложного шума
  - Длины области источника должна подбираться для каждой задачи
    - ✓ 2 толщины пограничного слоя являются разумным компромиссом



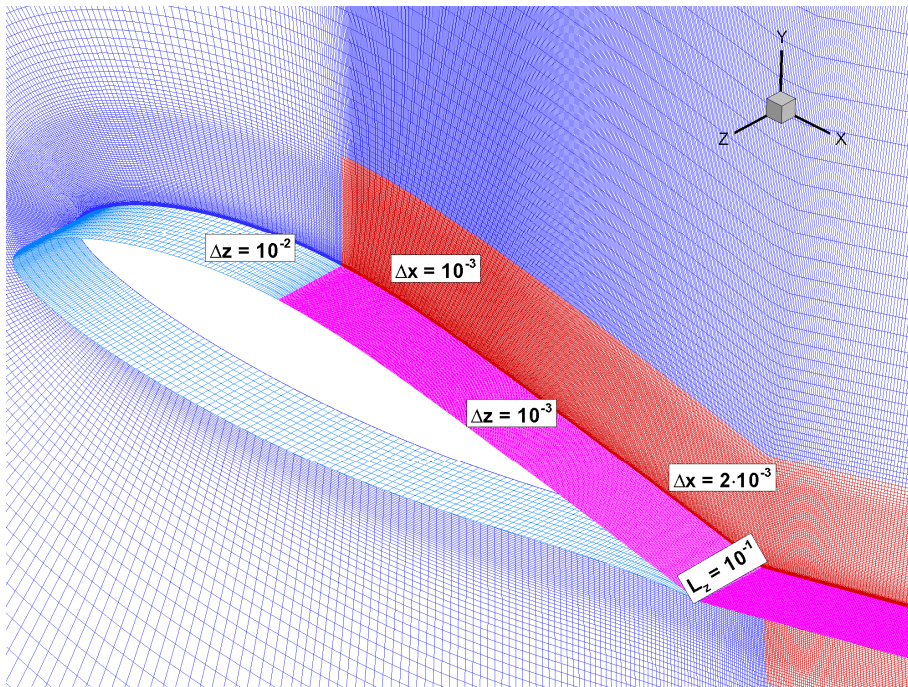
# Расчет крылового профиля DU-96

- Несжимаемое течение,  $Re=4 \cdot 10^6$ , угол атаки  $AoA = 13^\circ$
- Гибридный SST RANS-IDDES расчет
  - Цель расчета - проверить влияние расположения области объемного источника на результат

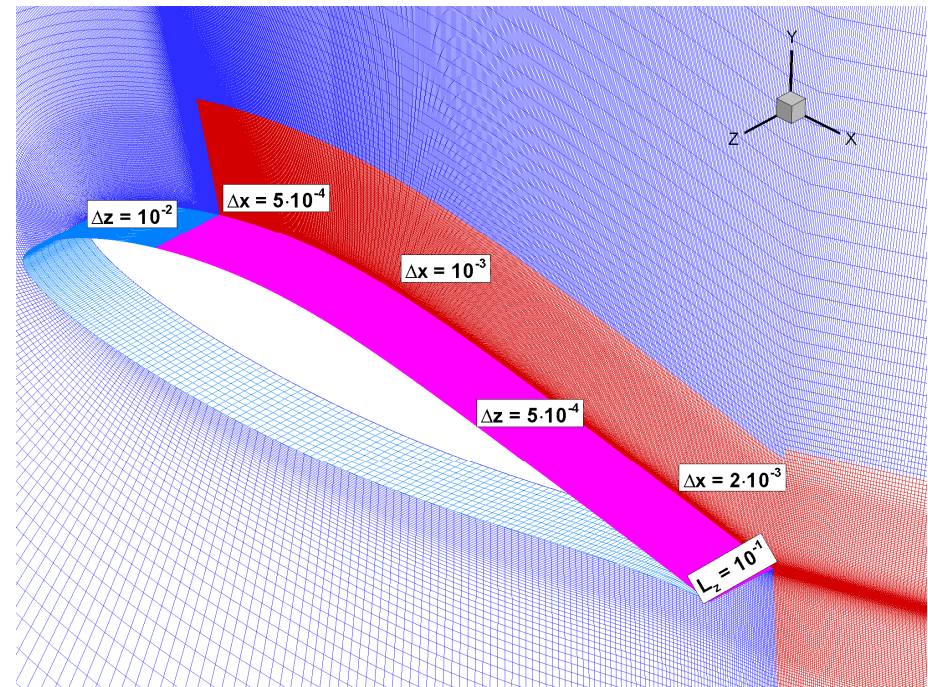


# Расчетные сетки

- Были рассмотрены 2 варианта с различным положением RANS-LES перехода
- При  $x_{VSTG}/c = 0.2$  сетка гораздо мельче, поскольку тоньше пограничный слой
  - При расчете WMLES шаги сетки определяются толщиной пограничного слоя



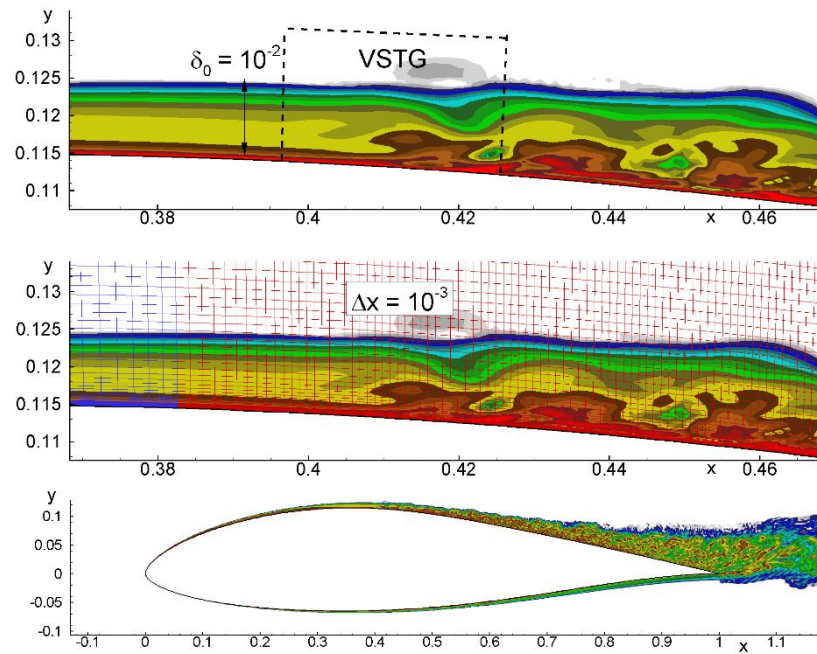
$$x_{VSTG}/c = 0.4$$



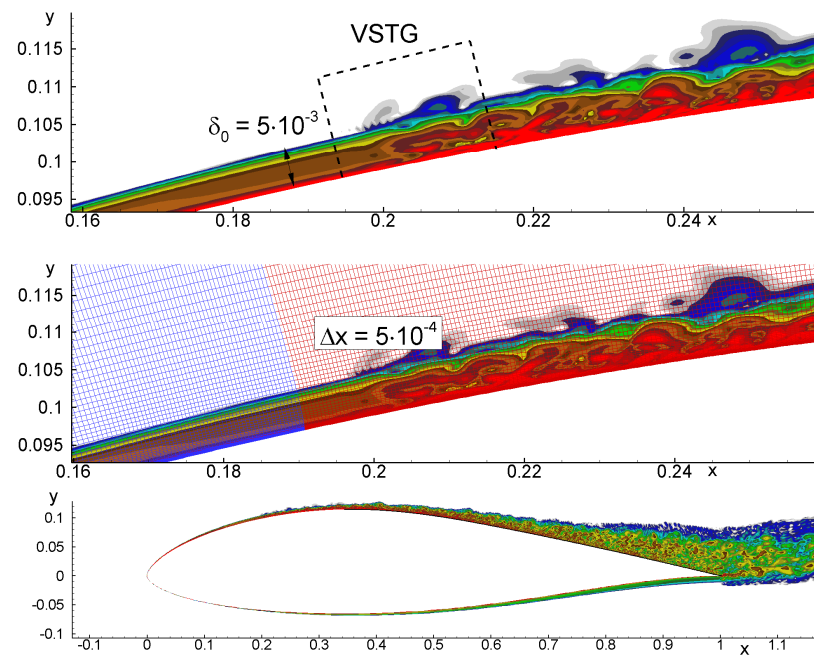
$$x_{VSTG}/c = 0.2$$

# Положение VSTG

$$x_{VSTG}/c = 0.4$$

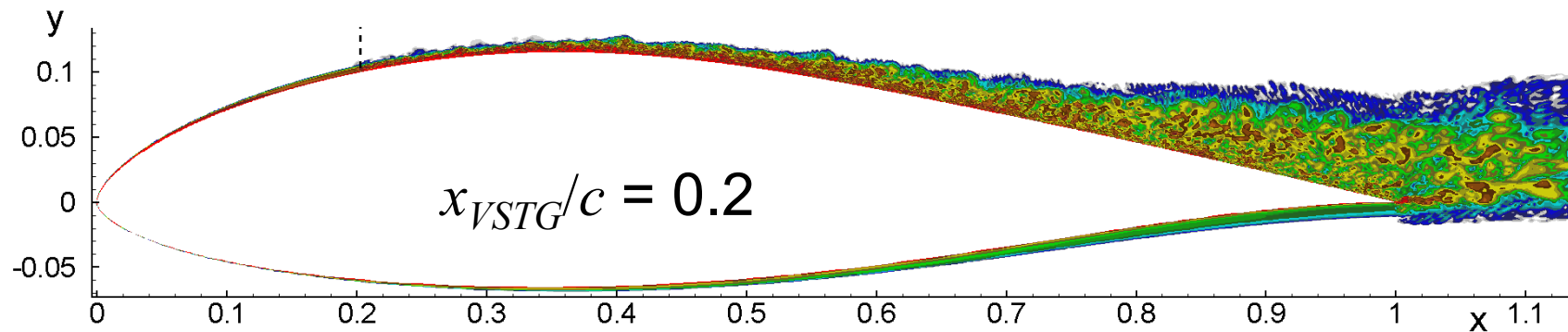
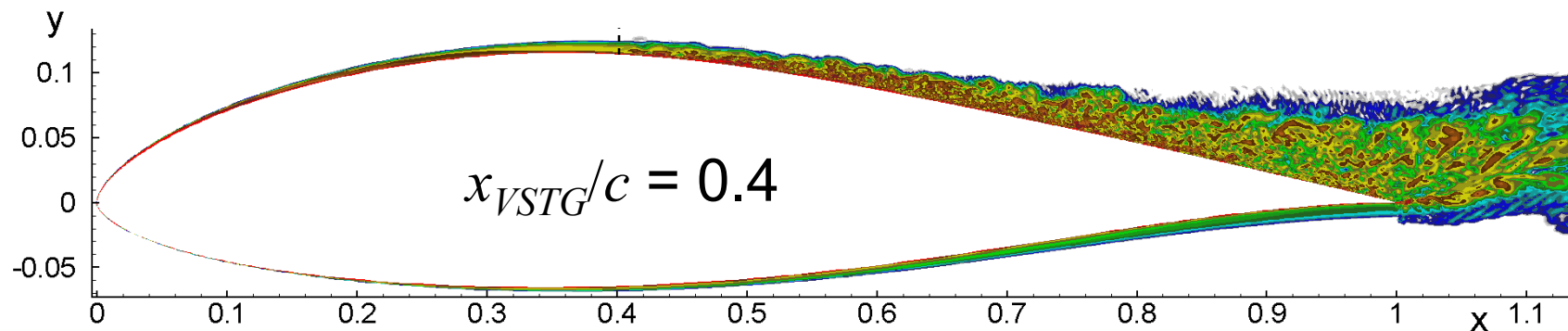


$$x_{VSTG}/c = 0.2$$



# Визуализация течения

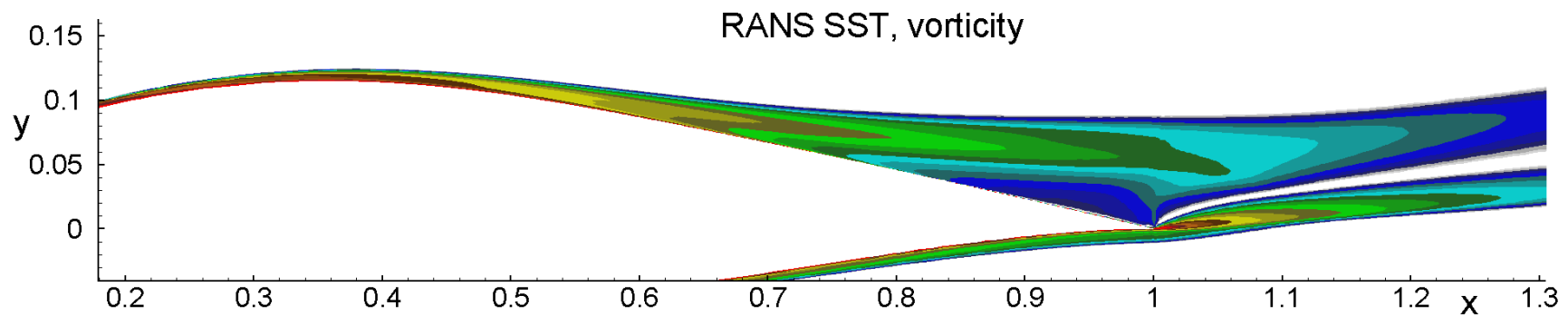
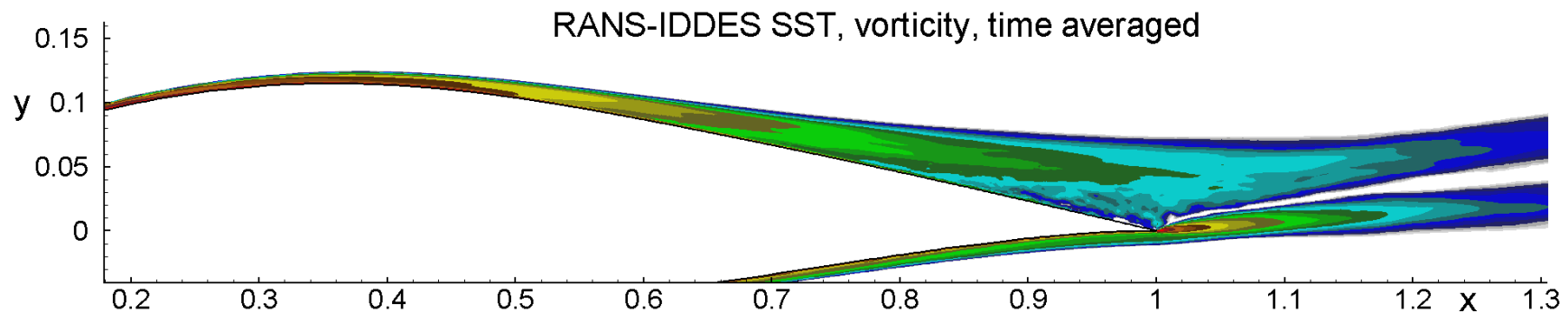
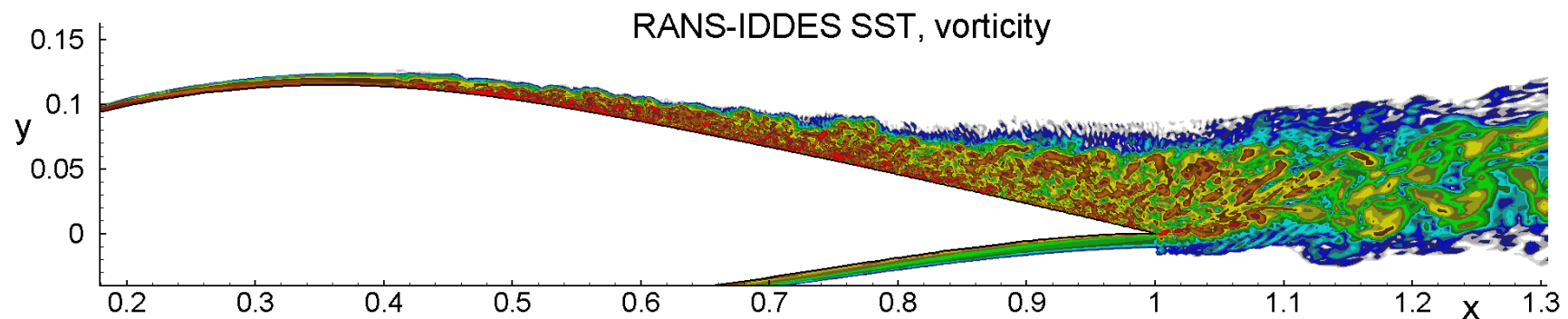
Картина течения практически не зависит от положения области объемного источника



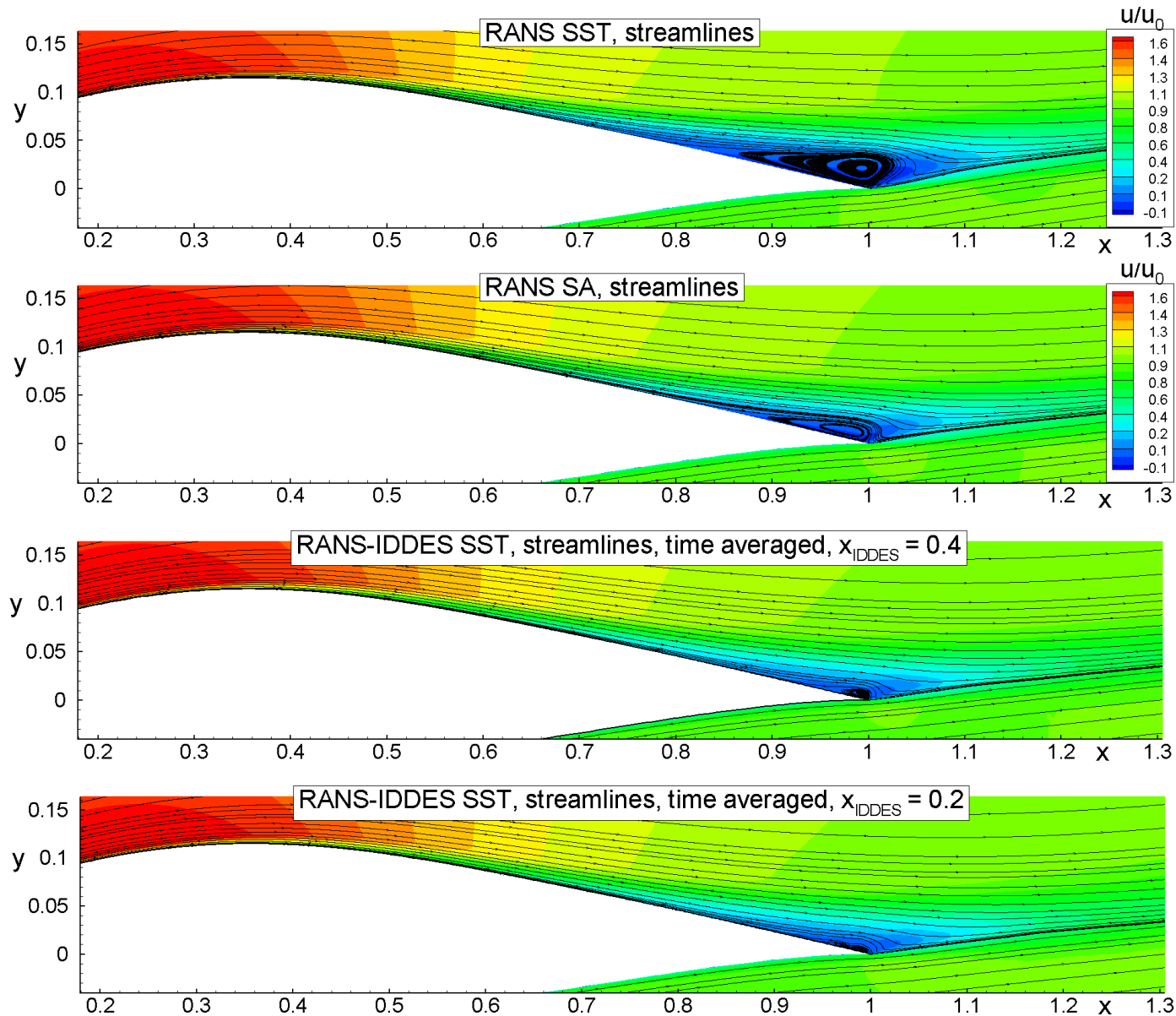
Контуры завихренности

# Сравнение с RANS

SST RANS предсказывает более массивный отрыв

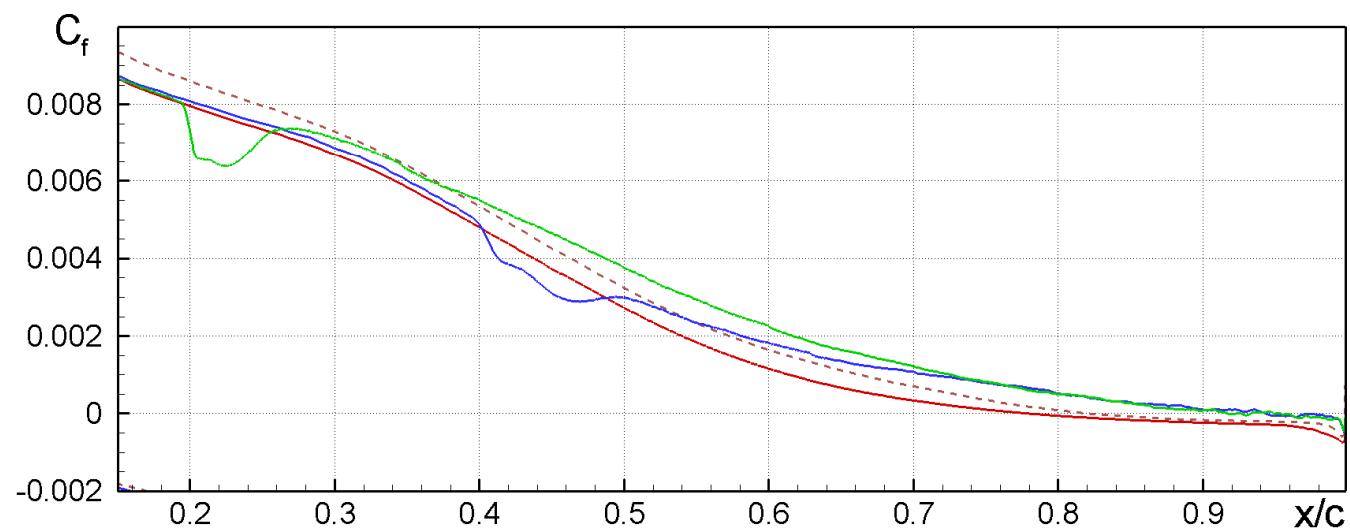
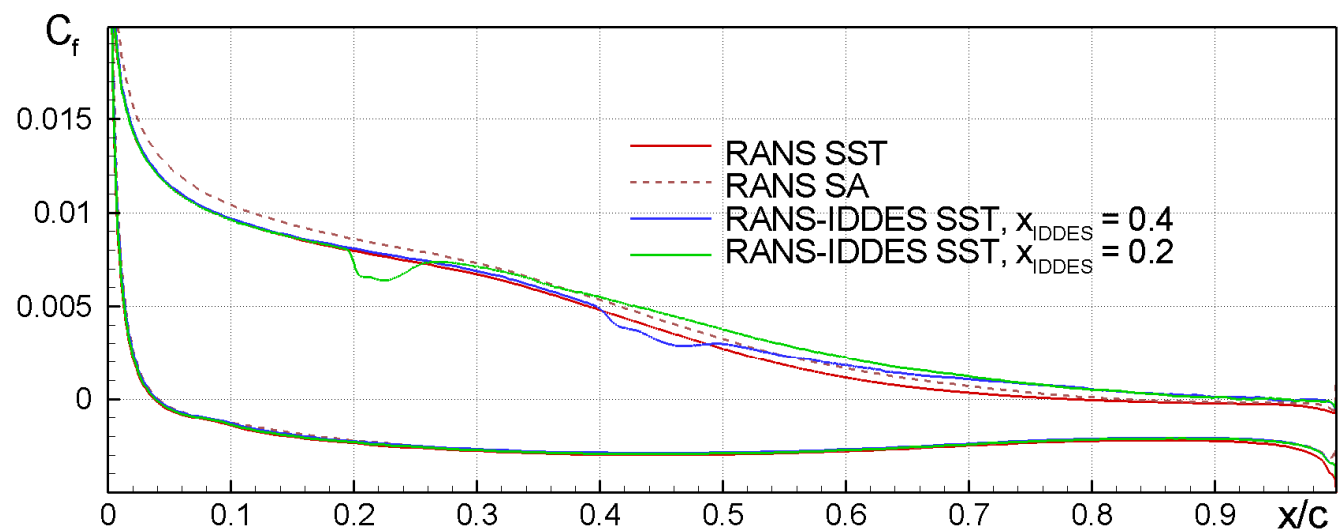


# Величина зоны отрыва



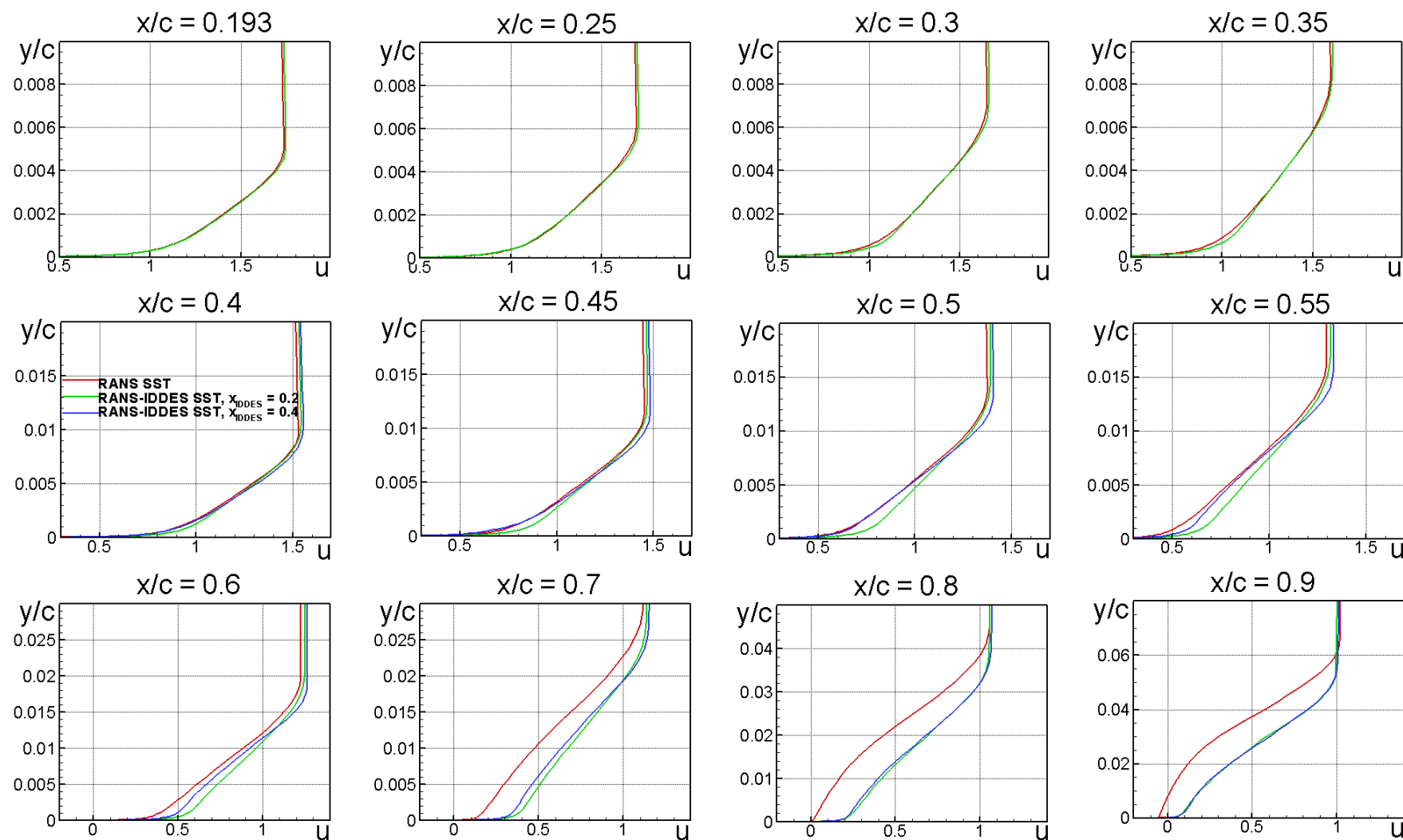
Линии тока и поля продольной компоненты скорости

# Сравнение с RANS



Трение на стенке

# Сравнение с RANS



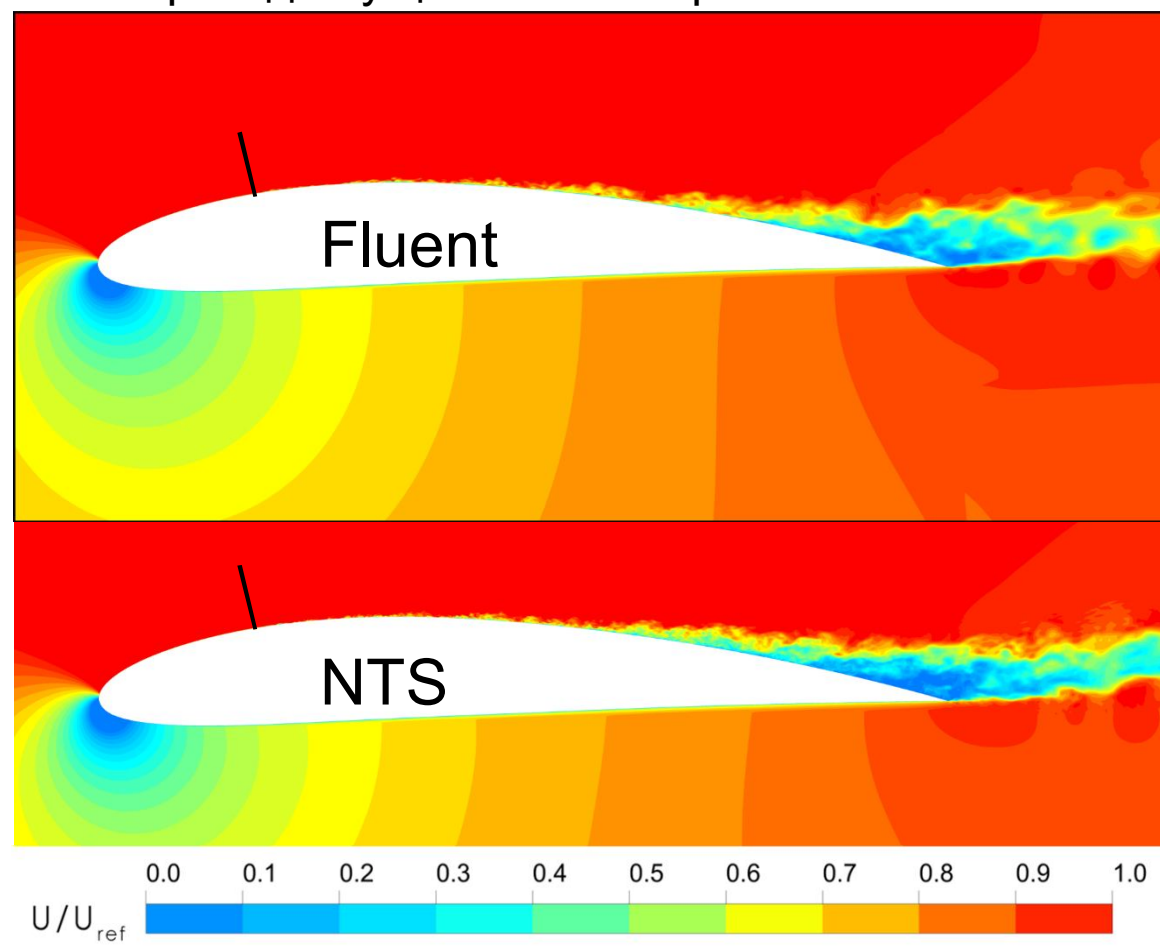
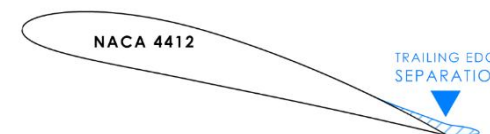
Профили скорости

# Сравнение Fluent и NTS

- Расчет крылового профиля NACA4412

- $Re=1.5 \cdot 10^6$ ,  $AoA=13.87^\circ$
- FLUENT: двухстадийный SST RANS - alg. WMLES расчет
- NTS: одностадийный SST RANS - SST IDDES расчет
- В обоих случаях переход осуществлялся при  $x/c=0.2$

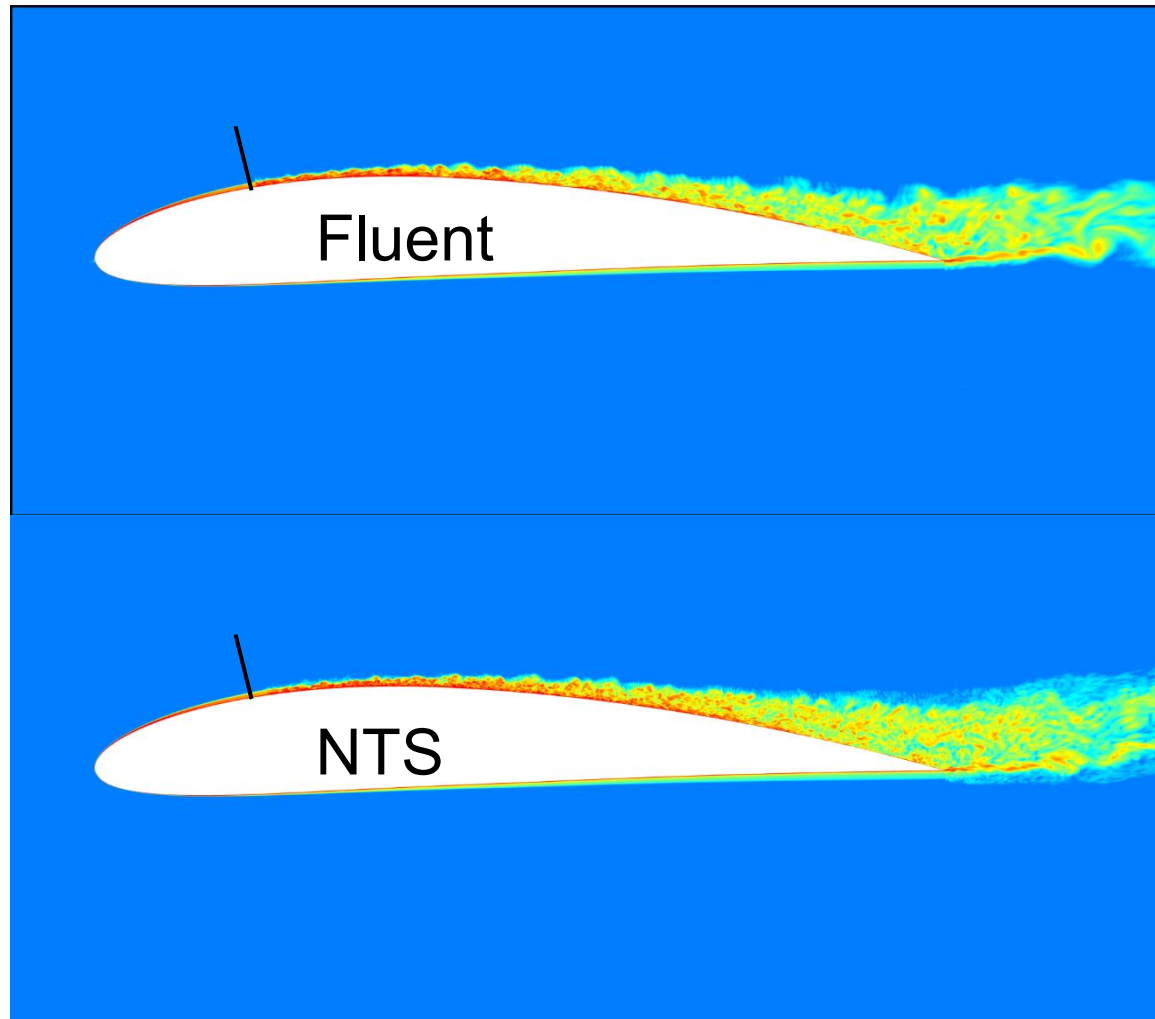
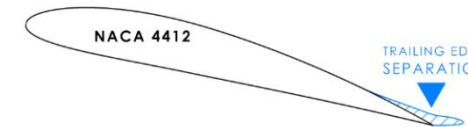
UNIFORM  
FREESTREAM



# Сравнение Fluent и NTS

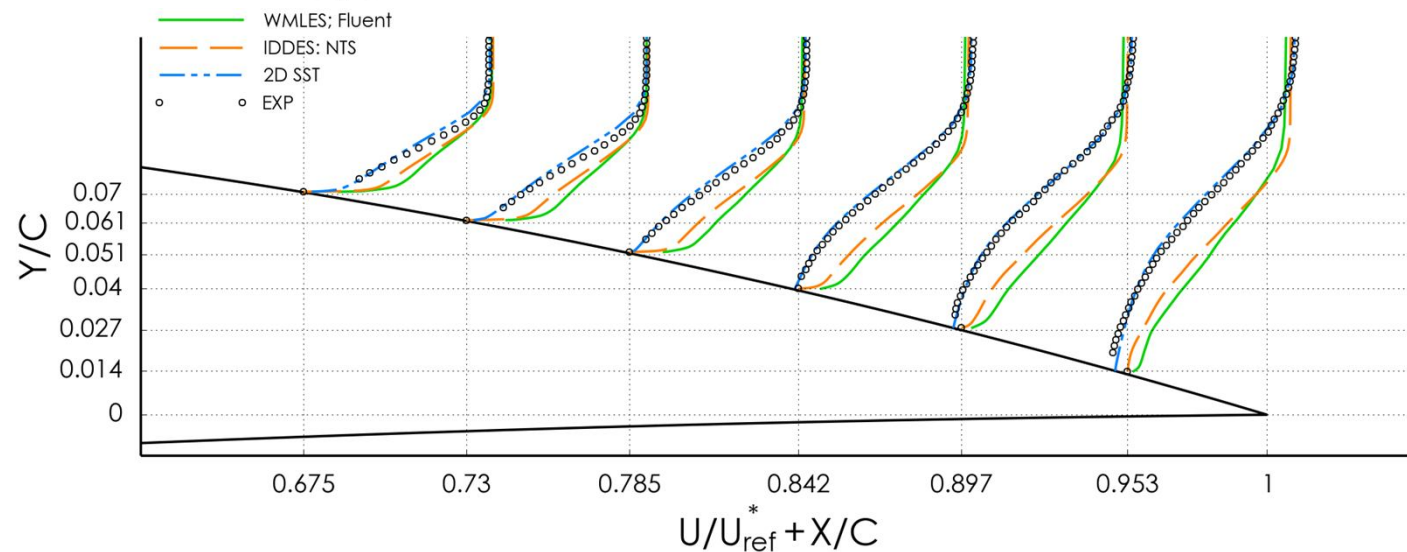
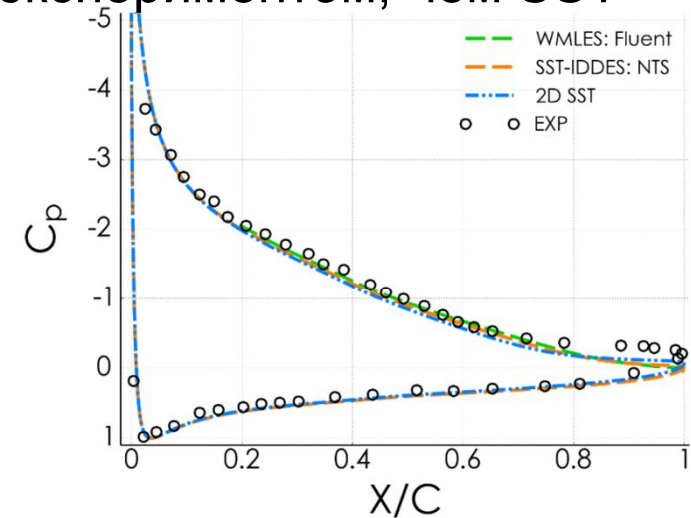
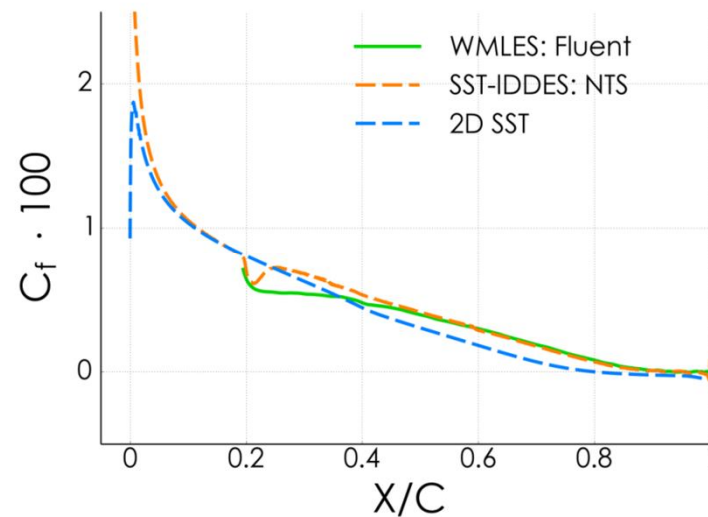
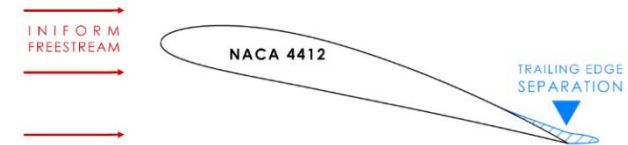
Турбулентные структуры во Fluent несколько более крупные из-за более диссипативной схемы

INIFORM  
FREESTREAM



# Сравнение Fluent и NTS

- Несмотря на различие в подходах результаты Fluent и NTS практически совпадают
- WMLES существенно хуже согласуется с экспериментом, чем SST



# Резюме

- При выборе метода создания турбулентного контента необходимо учитывать его «технологичность»
  - Методы, построенные на суперпозиции Фурье-мод лучше других подходят для современных кодов
- При расчете акустических задач необходимы специальные модификации методов генерации
- Задание пульсаций при помощи объемного источника является перспективным альтернативным подходом