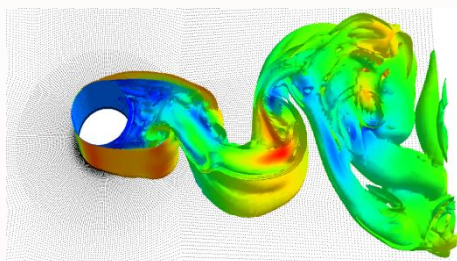


Зонный RANS-LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений

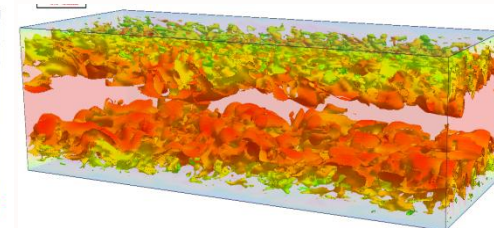
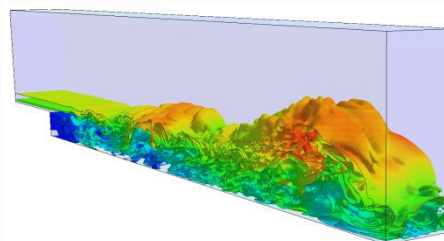
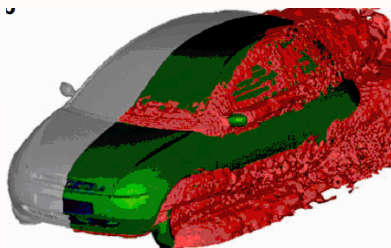
**Козелков А.С., Курулин В.В., Тятюшкина Е.С., Пучкова О.Л.,
Лашкин С.В.
ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» г. Саров**

Моделирование турбулентных течений

Большая часть практически важных течений являются турбулентными:



Внешнее обтекание



Внутреннее течение

Увеличение точности моделирования промышленных задач напрямую связано с увеличением точности моделирования турбулентных составляющих течения

Для практических задач использование прямого численного моделирования не будет доступным еще много десятилетий



Необходимо развивать методы на основе приближенных подходов типа
RANS – LES

Существующие подходы:

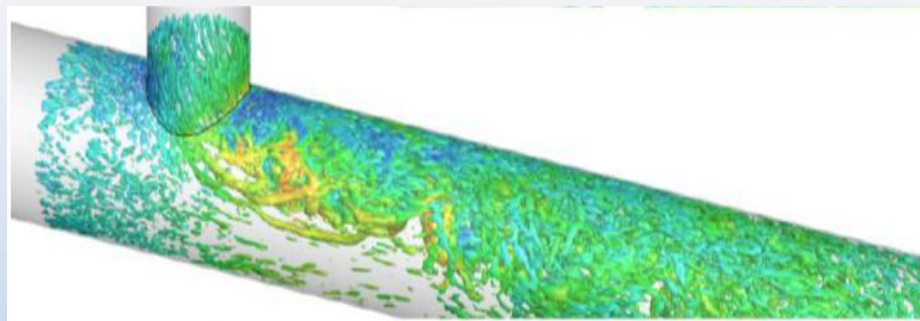
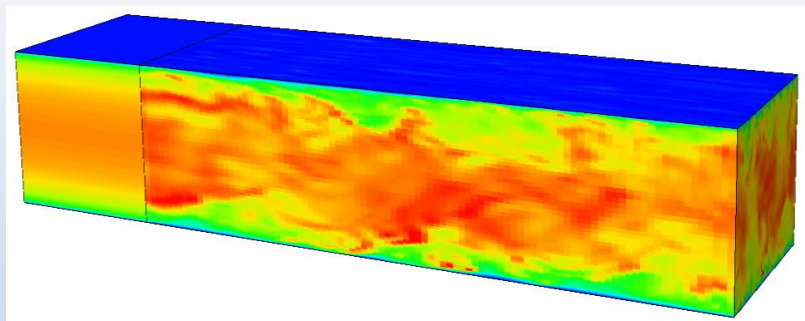
- RANS (SST, KE, специализированные модели)
- LES (Large Eddy Simulation)
- Гибридные подходы:
 - DES
 - **Зонный RANS-LES**

Моделирование турбулентных течений

Зонный RANS-LES подход

- Области LES расчета зафиксированы (расположены в зонах, где необходимо уточнение численного решения)
- Использует явную генерацию турбулентных пульсаций (генерация производится на границе областей RANS-LES)

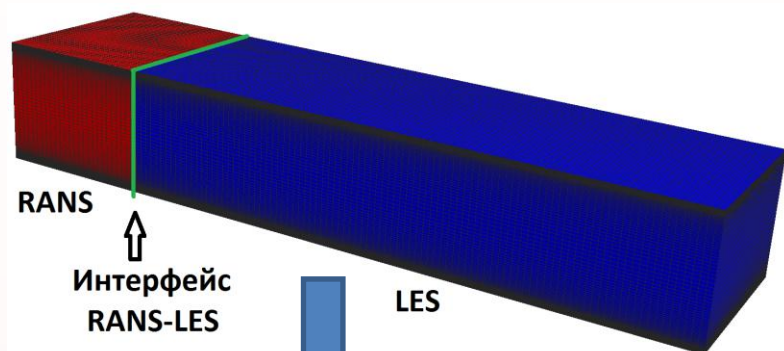
Эффективен для течений с любым размером отрывной зоны
(задачи внутренней гидродинамики)



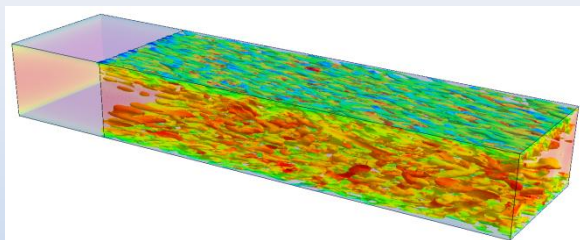
- Требуется использование алгоритмов генерации турбулентных пульсаций

Зонный RANS-LES подход

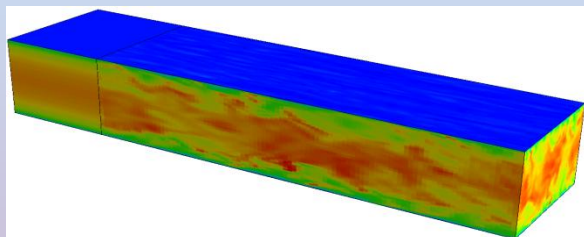
Технология реализации



Q-criterion=500



Velocity



- **RANS область** – уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу + модель турбулентности
- **LES область** – отфильтрованные уравнения Навье-Стокса + алгебраическая модель Смагоринского
- **Интерфейс RANS-LES** – граничное условие, выходное для RANS-области и входное для области LES

Технология расчета

Проводится двух-этапный расчет:

- **Этап 1 – стационарный RANS расчет**

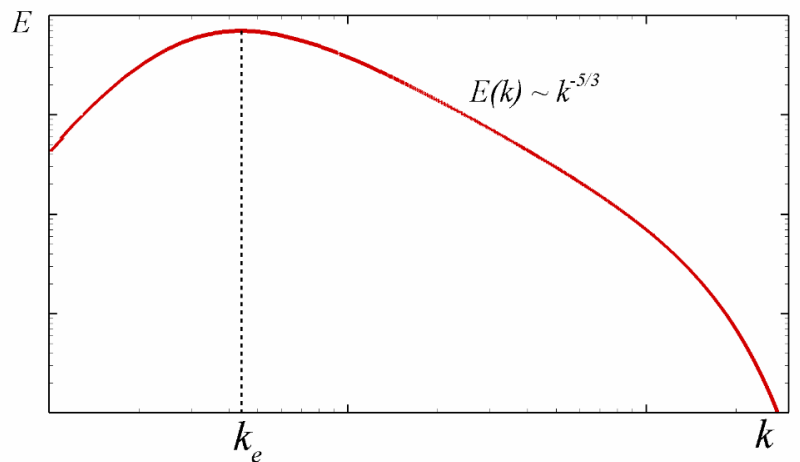
Определяются параметры турбулентности на границе областей. Интерфейс работает как внутренние грани

- **Этап 2 – нестационарный расчет**

Интерфейс работает как вход с генерированием турбулентных пульсаций

Зонный RANS-LES подход

Генератор турбулентных пульсаций*



Основная идея:

- Восстановление частотного спектра турбулентных пульсаций по RANS-решению, найденному на первом этапе. Используются эмпирические соотношения
- Генерация поля скорости, удовлетворяющему заданному тензору напряжений Рейнольдса, и найденному спектру

Основная цель расчета на первом этапе – получение стационарных распределений поля скорости и тензора τ_{ij}^t на интерфейсе RANS-LES, которые используются для создания турбулентных структур на втором этапе расчета.

$$u_i = u_i^0 + u'_i$$

Пульсации скорости u'_i вычисляются искусственным путем с использованием алгоритма генерации. Величины пульсаций должны соответствовать распределению тензора рейнольдсовских напряжений

Неверное предсказание тензора τ_{ij}^t



Значительная погрешность в генерации турбулентных структур на входе в LES область

* Используется генератор предложенный в работе: Адамьян Д.Ю., Травин А.К. , 2011 г.

Базовая модель

Модель SST

- основана на гипотезе Буссинеска
- В задачах с существенно ассиметричными зонами такие модели дают существенную погрешность в определении тензора рейнольдсовских напряжений



Модели класса RSM

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \end{cases}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right)$$

$$\begin{pmatrix} \tau_{ii} & \tau_{ij} & \tau_{ik} \\ \tau_{ji} & \tau_{jj} & \tau_{jk} \\ \tau_{ki} & \tau_{kj} & \tau_{kk} \end{pmatrix}$$

Тензор напряжений Рейнольдса $\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j}$

$u_i = \overline{u_i} + u'_i$

Способ замыкания уравнений Навье-Стокса

Применения моделей Рейнольдсовых напряжений (RSM)

Определение отдельно каждой компоненты, входящей в тензор напряжений Рейнольдса

- ✓ Предсказывают возникновения вторичных токов при течении вдоль двугранных углов

Модель EARSM

В модели EARSM тензор напряжений Рейнольдса определяется через тензор анизотропии a_{ij}

$$\tau'_{ij} = \overline{u'_i u'_j} = k_t \left(a_{ij} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \right), a_{ij} = \frac{\overline{u'_i u'_j}}{k_t} - \frac{2}{3} \delta_{ij}$$

Тензор анизотропии является линейной комбинацией 6-ти тензорных групп:

$$a_{ij} = \beta_1 T_{1,ij} + \beta_2 T_{2,ij} + \beta_3 T_{3,ij} + \beta_4 T_{4,ij} + \beta_6 T_{6,ij} + \beta_9 T_{9,ij}$$

Коэффициенты β_i определяются по формулам и являются функциями тензорных инвариантов

$$\beta_1 = -\frac{N}{Q} \quad \beta_2 = 0 \quad \beta_3 = -\frac{2IV}{NQ_1} \quad \beta_4 = -\frac{1}{Q} \quad \beta_6 = -\frac{N}{Q_1} \quad \beta_9 = \frac{1}{Q_1}$$

$$Q = \frac{(N^2 - 2\Pi_\Omega)}{A_1} \quad Q_1 = \frac{Q}{6}(2N^2 - \Pi_\Omega) \quad \Pi_S = S_{ij}S_{ji} \quad \Pi_\Omega = \Omega_{ij}\Omega_{ji} \quad IV = S_{ik}\Omega_{kj}\Omega_{ji}$$

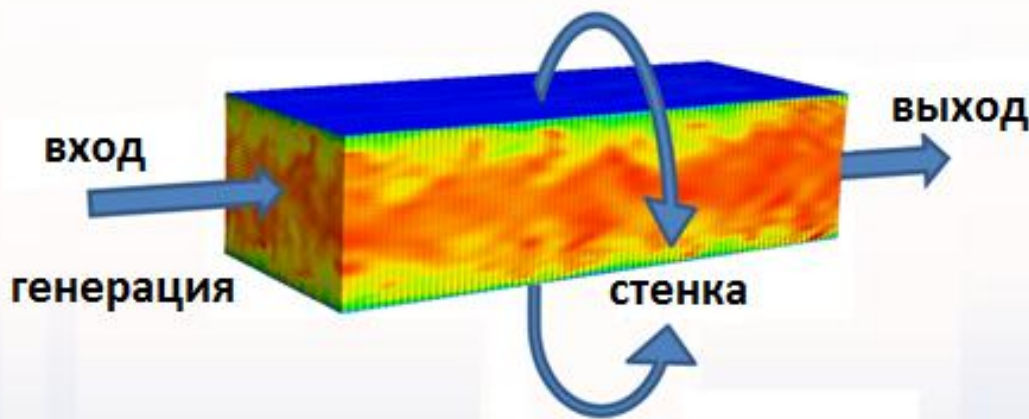
$$\begin{cases} N = \frac{C'_1}{3} + (P_1 + \sqrt{P_2})^{1/3} + \text{sign}(P_1 - \sqrt{P_2}) |P_1 - \sqrt{P_2}|^{1/3}, P_2 \geq 0 \\ N = \frac{C'_1}{3} + 2(P_1^2 - P_2)^{1/6} \cos\left(\frac{1}{3} \arccos\left(\frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 - P_2}}\right)\right), P_2 < 0 \end{cases} \quad \begin{cases} P_1 = C'_1 \left(\frac{C_1'^2}{27} + \frac{9}{20} \Pi_S - \frac{2}{3} \Pi_\Omega \right) \\ P_2 = P_1^2 - \left(\frac{C_1'^2}{9} + \frac{9}{10} \Pi_S + \frac{2}{3} \Pi_\Omega \right) \end{cases}$$

Использованы константы модели $A_1 = 1.2$, $C'_1 = \frac{9}{4}(C_1 - 1)$, $C_1 = 1.8$

Зонный RANS-LES подход

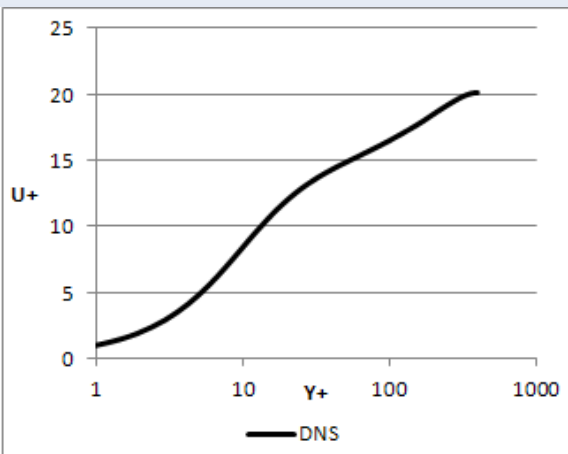
Генератор турбулентных пульсаций

Пример генерации – развитие турбулентное течение в плоском канале

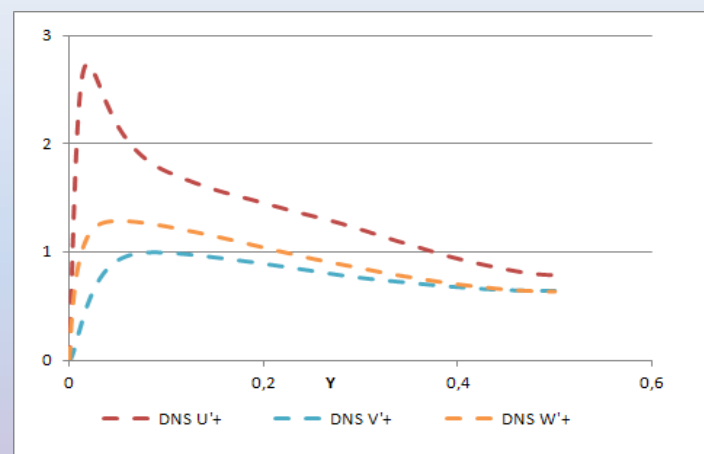
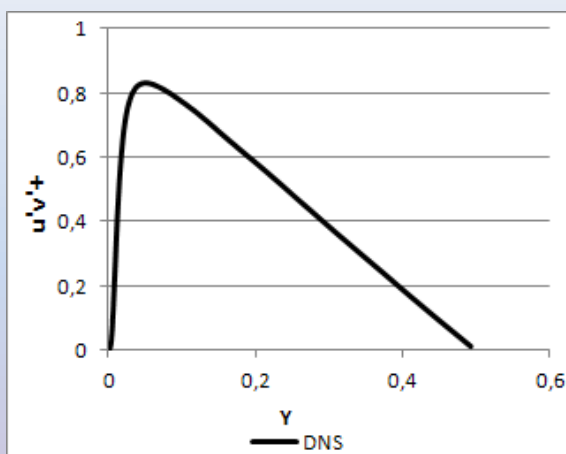


- По известному DNS решению* на входе генерируются турбулентные структуры
- Проводится LES-расчет
- Оцениваются осредненные характеристики, форма турбулентных структур

Скорость



Компоненты тензора напряжений Рейнольдса

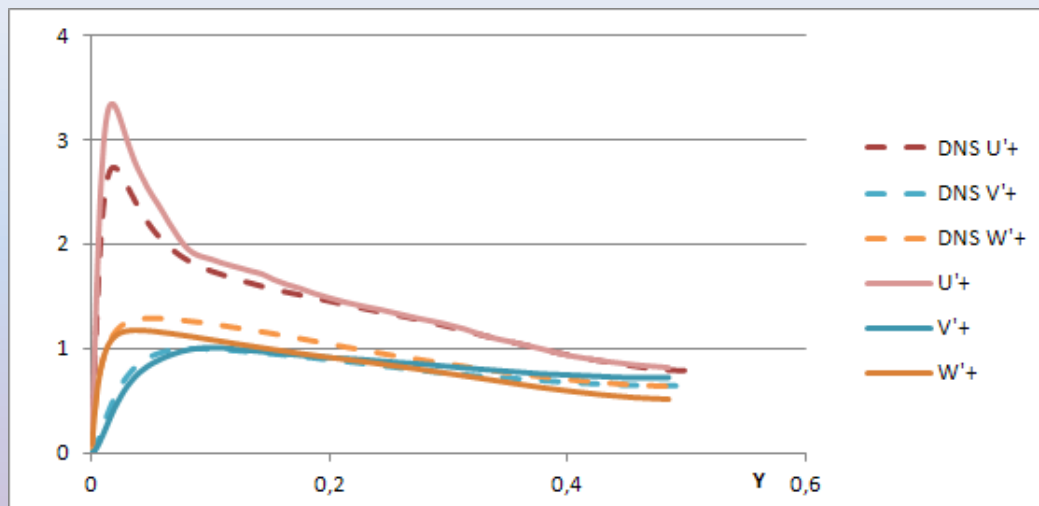
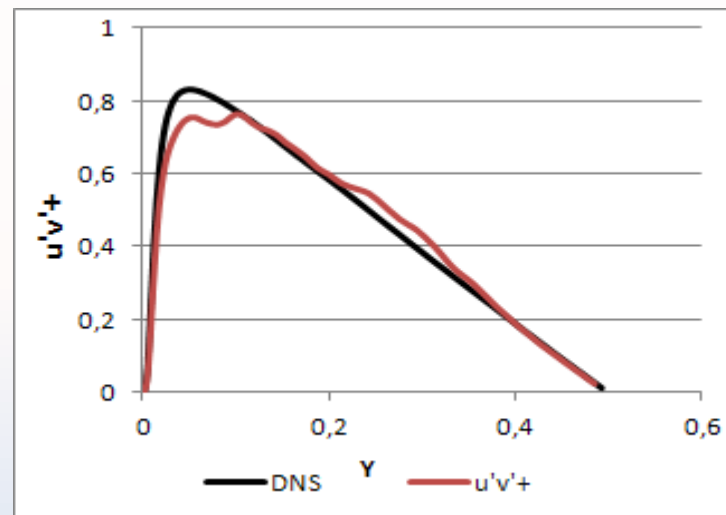
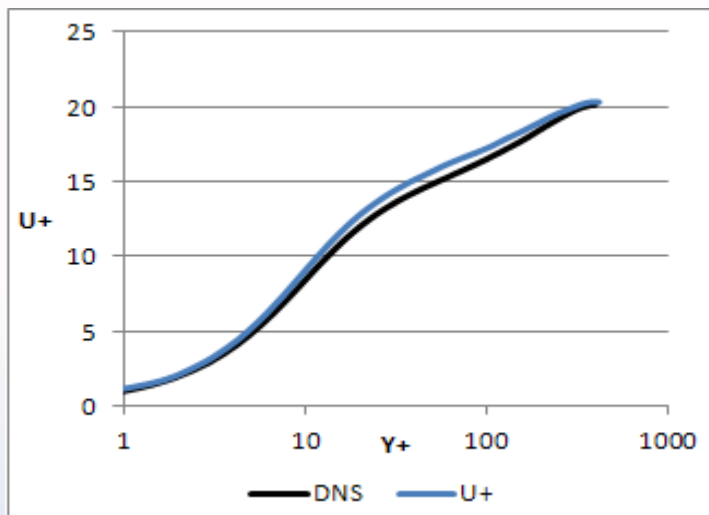


*- DNS-расчет R.D.Mozer, J.Kim, N.N. Mansour $Re_t=800$

Зонный RANS-LES подход

Генератор турбулентных пульсаций

Пример генерации – развитие турбулентное течение в плоском канале



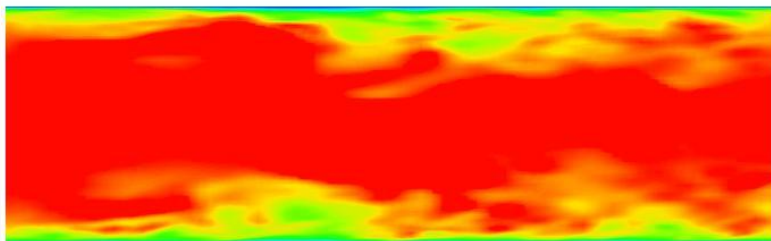
Зонный RANS-LES подход

Генератор турбулентных пульсаций

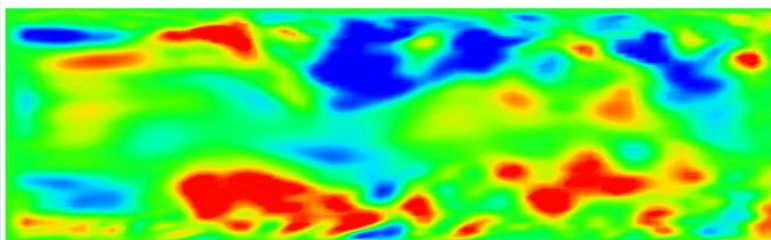
Пример генерации – развитие турбулентное течение в плоском канале

Генератор

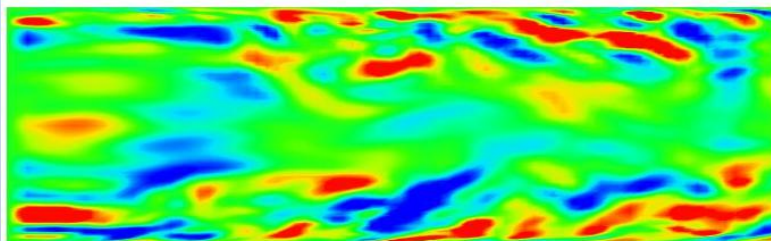
u



v

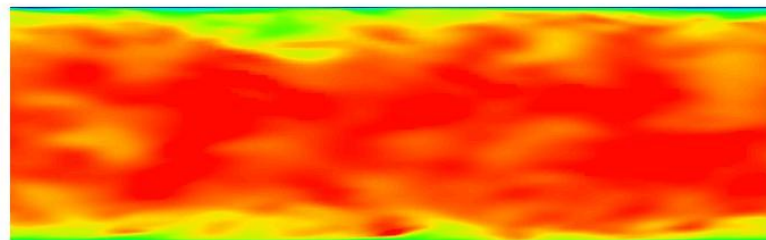


w

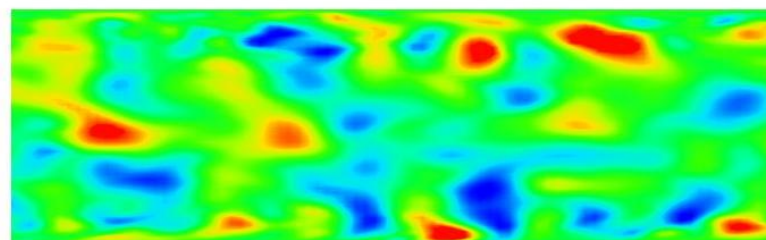


Решение LES

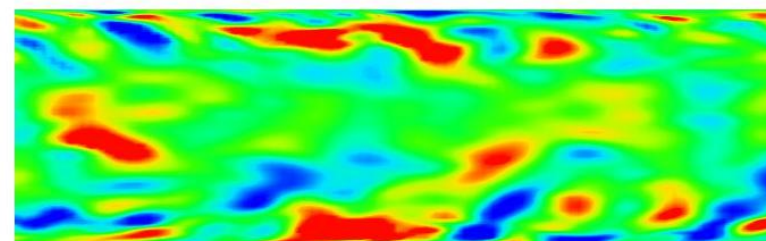
u



v

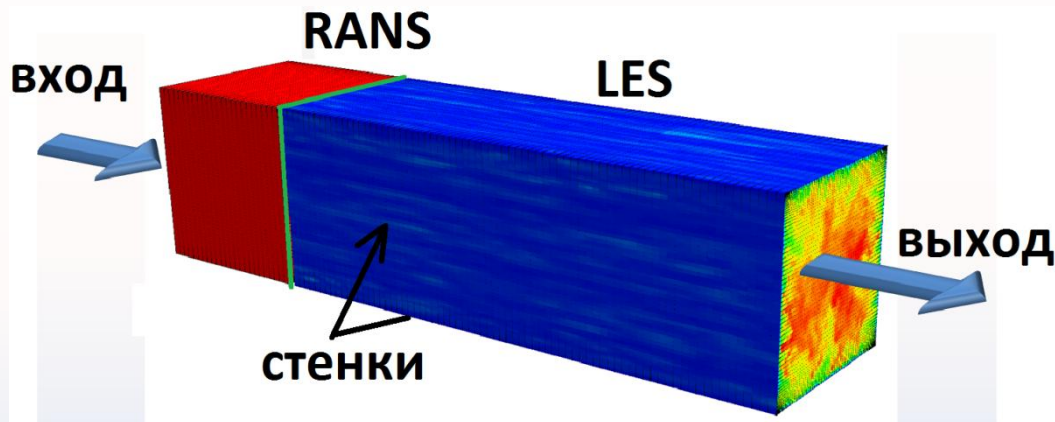


w



Пример использования RANS-LES

Турбулентное течение в квадратном канале



Сравнение

С экспериментом сравниваются профили продольной скорости в различных сечениях канала

Расчет

Проводится двухстадийный расчет:

- 1) Стационарный RANS расчет
- 2) Нестационарный расчет с использованием RANS-LES

Описание

Полностью развитое течение с $Re_t = 1200$
Особенность – образование в двугранных углах вторичных токов, которые не могут быть предсказаны RANS-моделями с линейной вихревой вязкостью

Граничные условия

Вход - табличные граничные условия, соответствующие полностью развитому турбулентному течению, промоделированному по RANS

Параметры расчета

Схема BCD с $j=0.9$

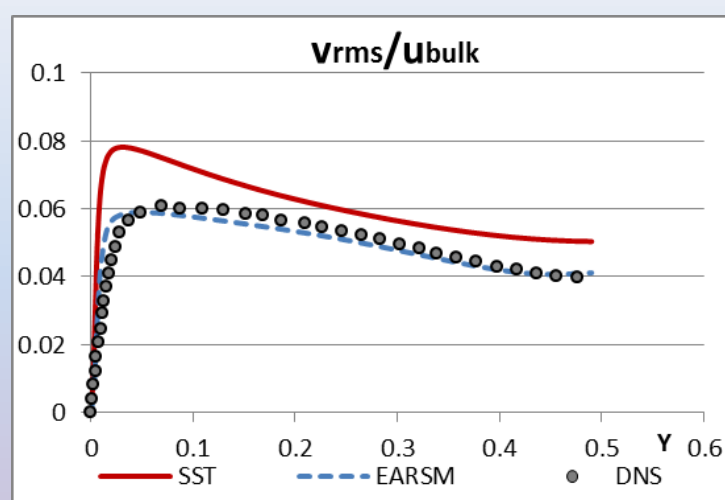
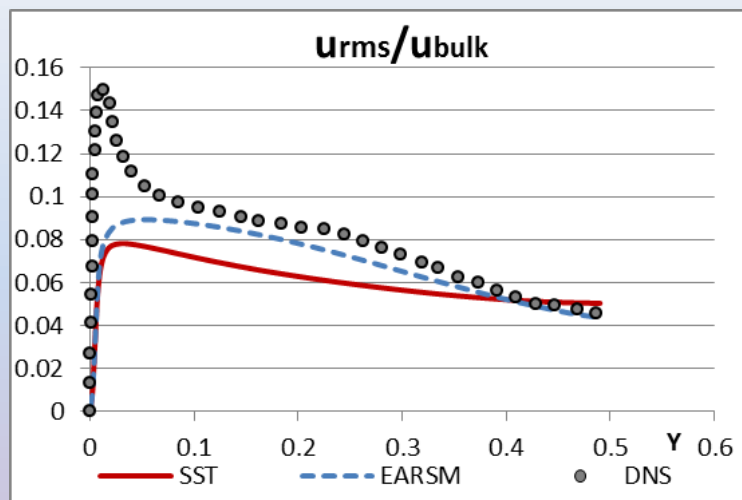
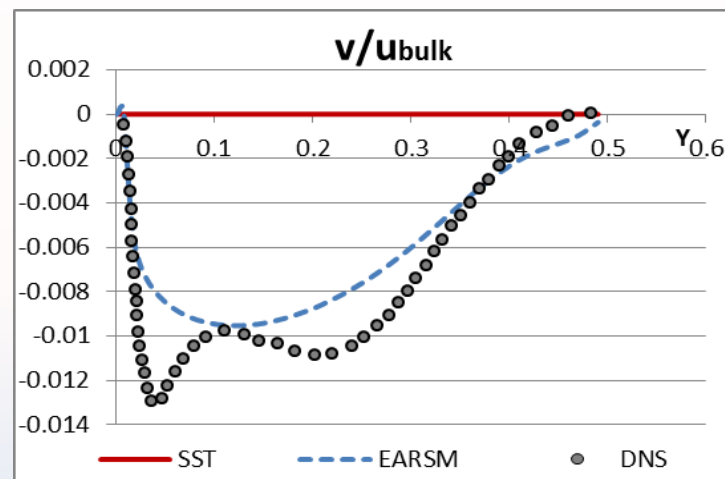
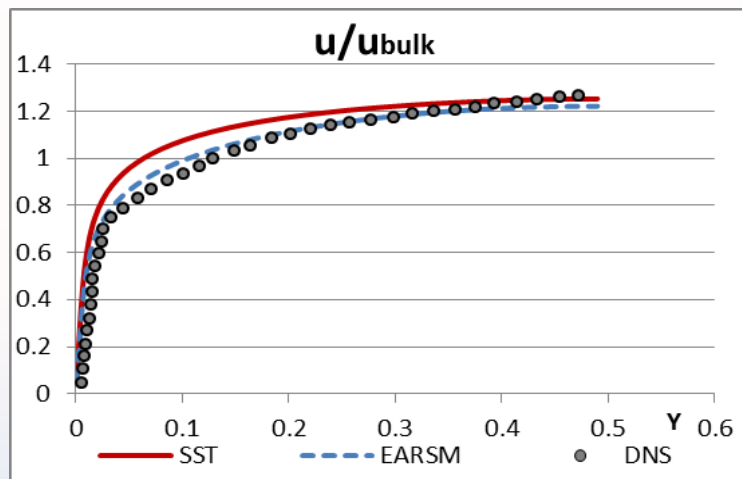
Схема Адамса-Бешфорта

Число куранта $CFL = 1.1$

LES $C_s = 0.05$

Пример использования RANS-LES

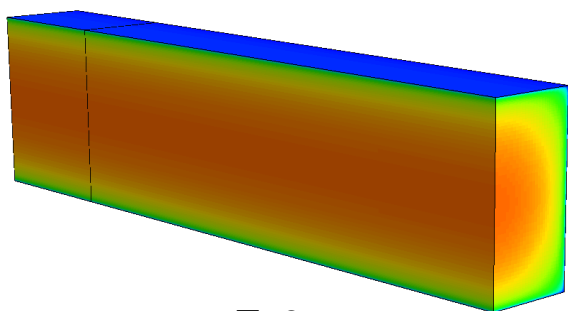
Профили осредненной скорости



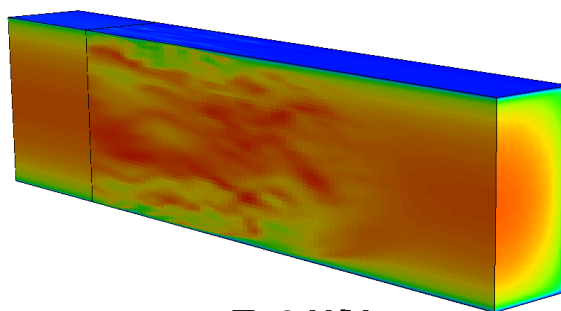
Пример использования RANS-LES

Турбулентное течение в квадратном канале

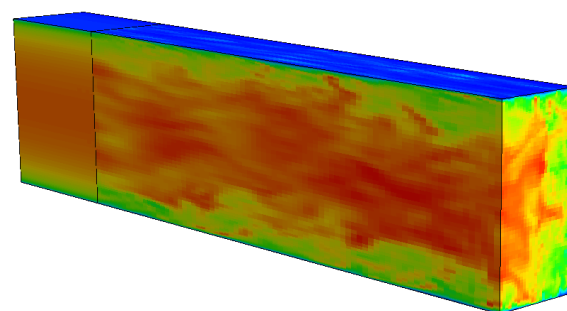
Амплитуда скорости



T=0



T=2 H/V

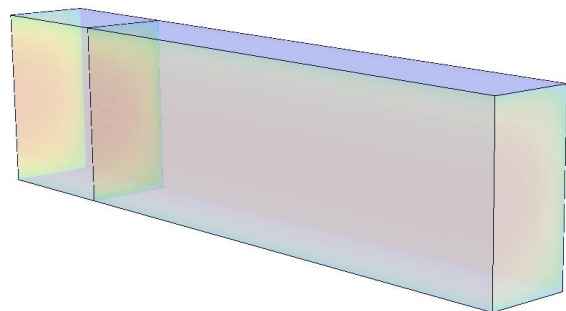


T=5 H/V

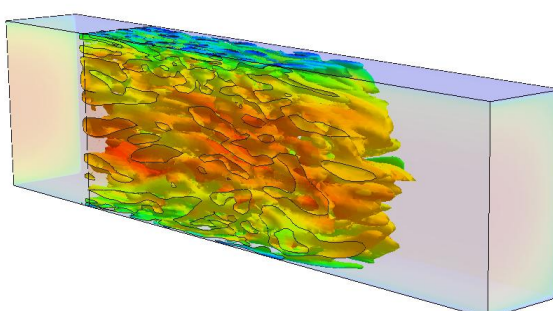
MAG_UVW

30.84
27.42
23.99
20.56
17.14
13.71
10.28
6.86
3.43
1.16e-003

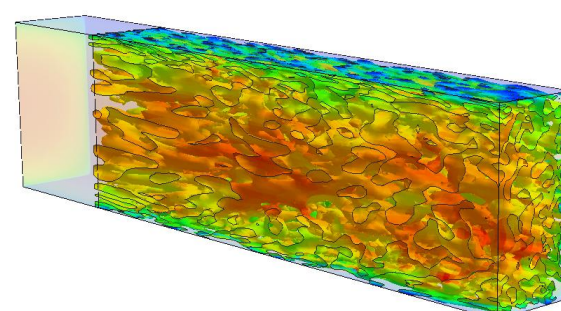
Q_crit = 100



T=0



T=2 H/V



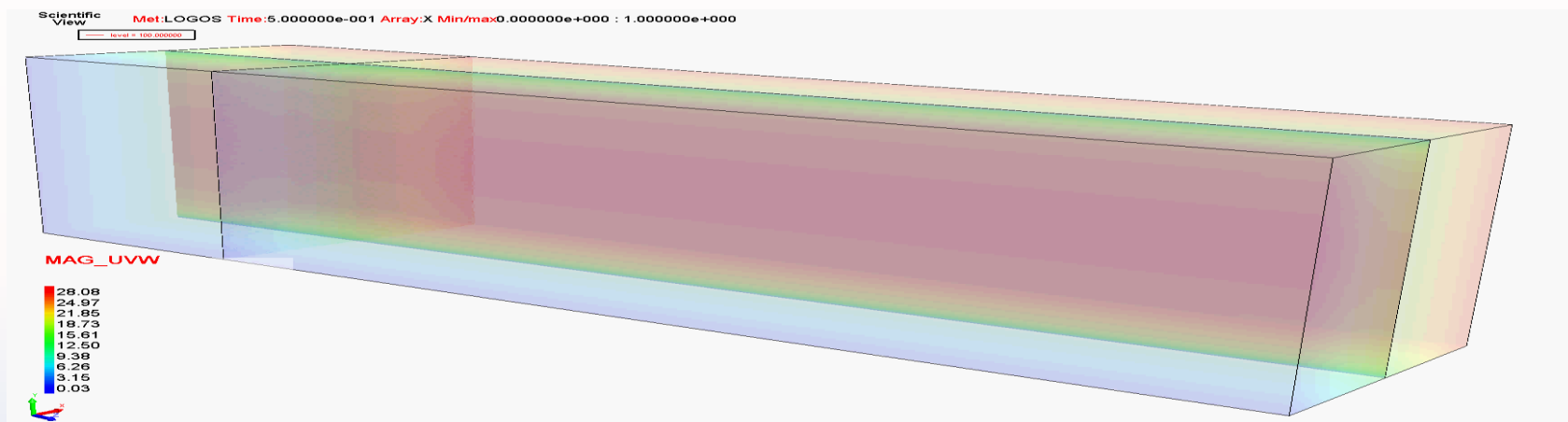
T=5 H/V

MAG_UVW

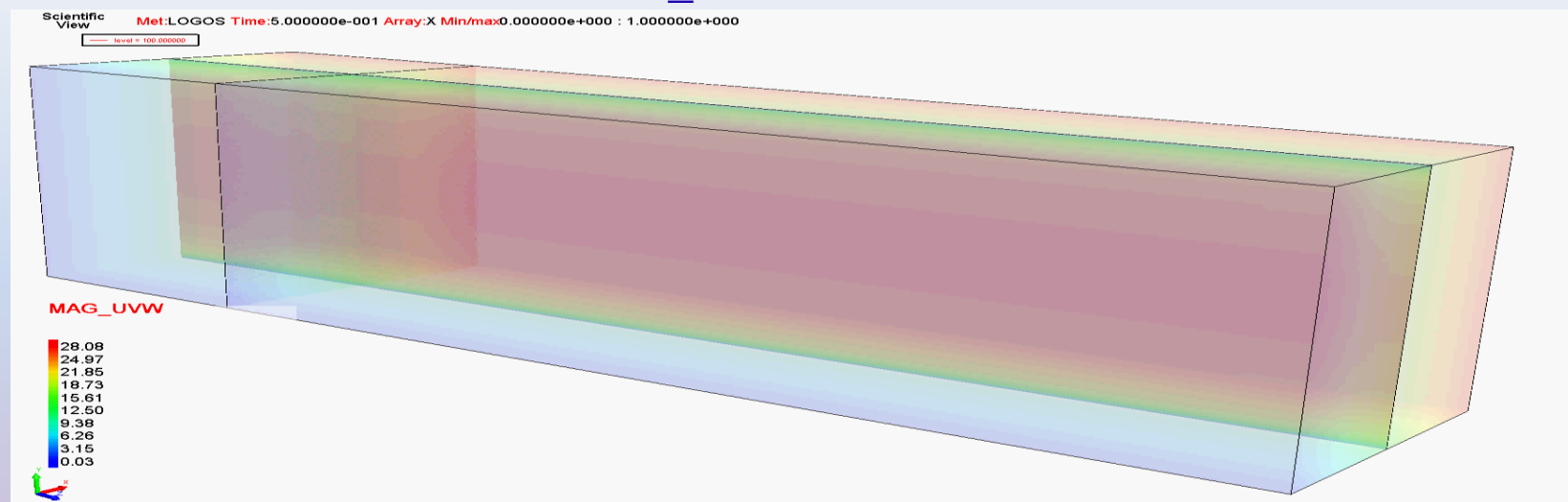
32.89
29.24
25.59
21.94
18.29
14.64
10.99
7.34
3.68
0.03

Пример использования RANS-LES

Амплитуда скорости

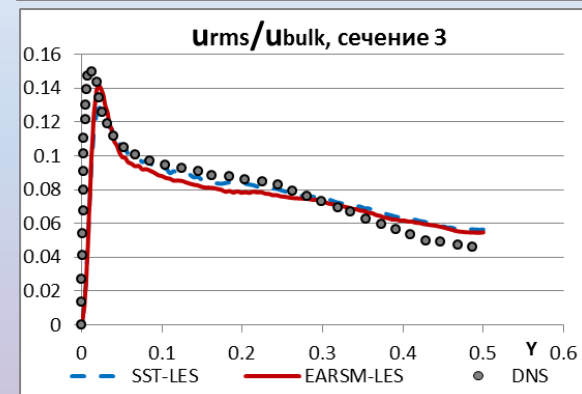
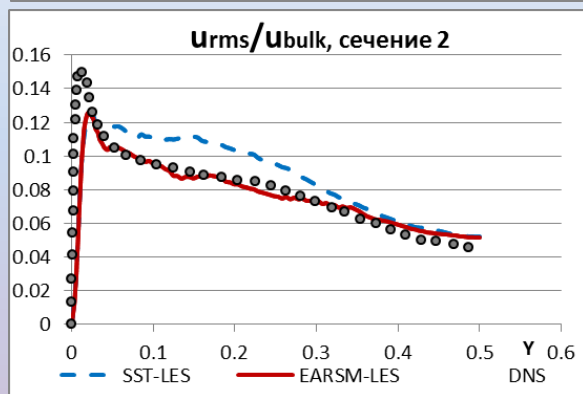
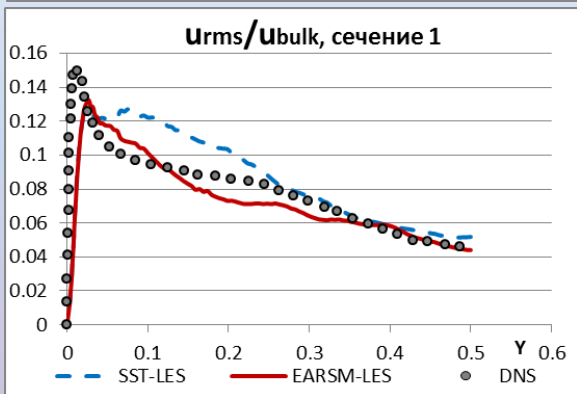
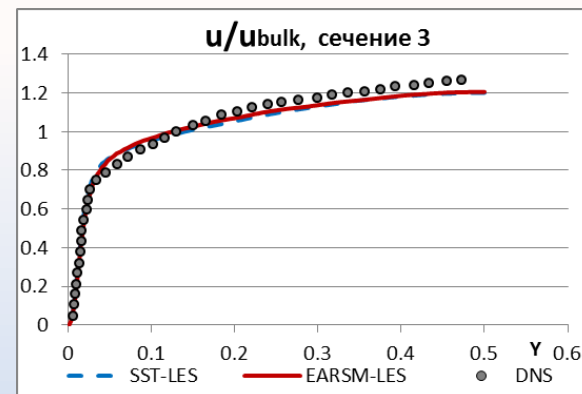
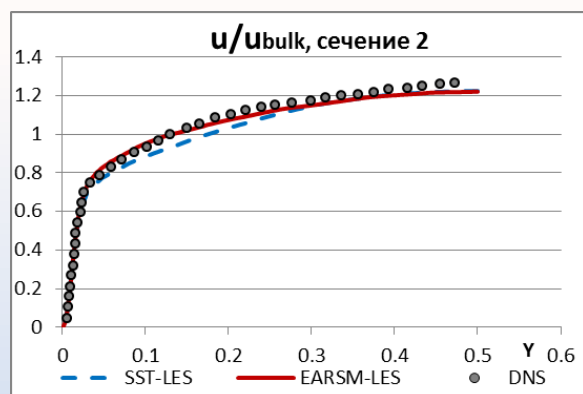
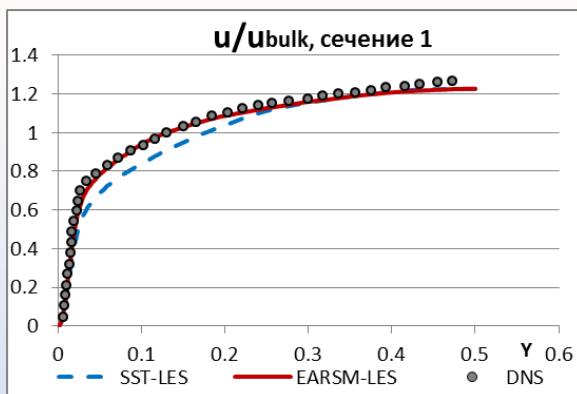
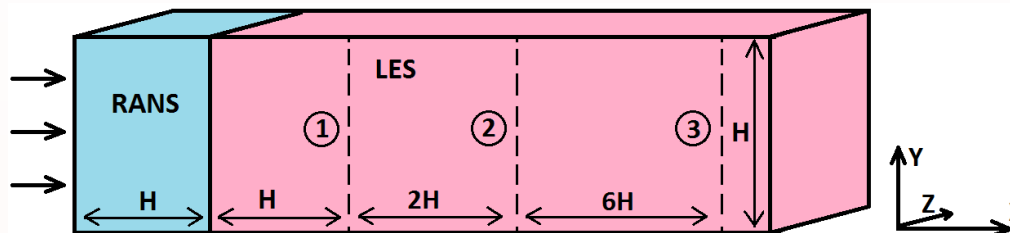


$Q_{crit} = 100$



Пример использования RANS-LES

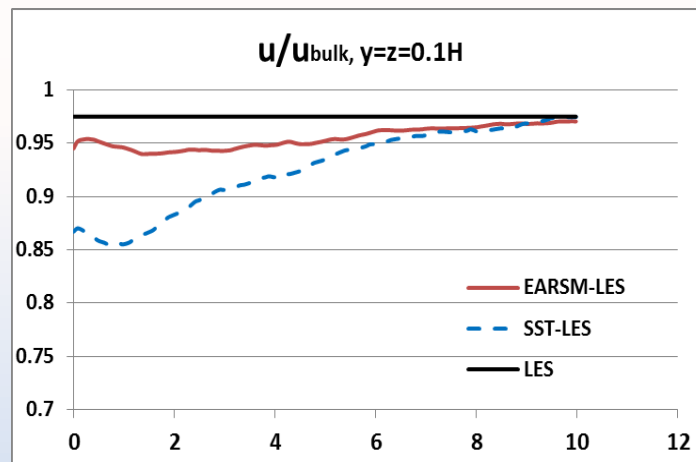
Профили осредненной скорости



Пример использования RANS-LES

Оценка точности решения в зависимости от расстояния от интерфейса

Сравнение проводится с профилем, который получается при моделировании данной задачи с использованием модели LES и циклических граничных условий LES (подобно DNS расчету)

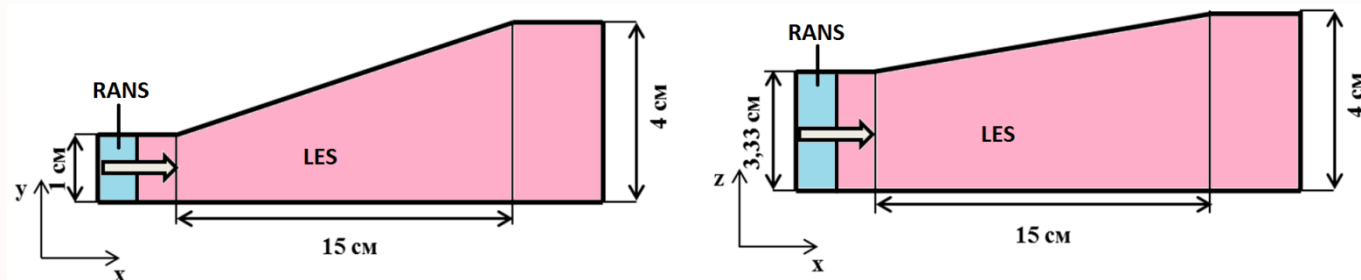


- Зонный RANS-LES на основе EARSM уже с самого начала интерфейса имеет отклонение от результатов LES расчета не более 5%,
- SST-LES достигает такого значения лишь на расстоянии $5H$ от интерфейса.

Использование модели EARSM-LES позволяет в 2-3 раза сократить переходную область после интерфейса RANS-LES

Пример использования RANS-LES

Турбулентное течение в асимметричном диффузоре



Расчет

Проводится двухстадийный расчет:

- 1) Стационарный RANS расчет
- 2) Нестационарный расчет с использованием RANS-LES

Параметры расчета

Схема BCD с $j=0.9$

Схема Адамса-Бешфорта

Число куранта $CFL = 1.1$

LES $C_s = 0.05$

Описание

Число Рейнольдса $Re=10^4$

Проявляется анизотропия течения жидкости, в канале образуется обширная отрывная зона, нахождение положения и формы которой, является непростой задачей

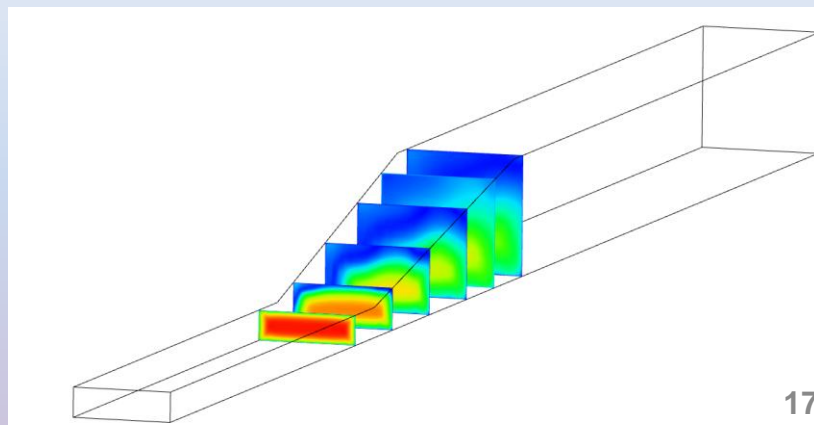
Граничные условия

На входе задавалась постоянная скорость

$U=1$ м/с

Сравнение

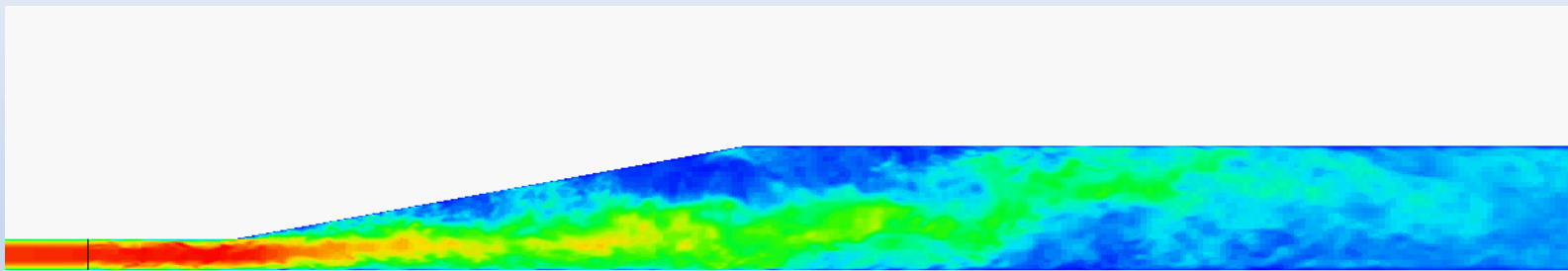
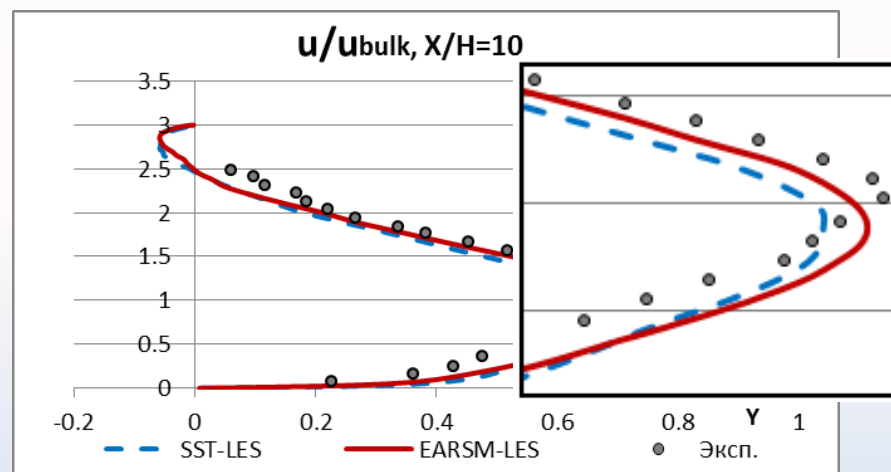
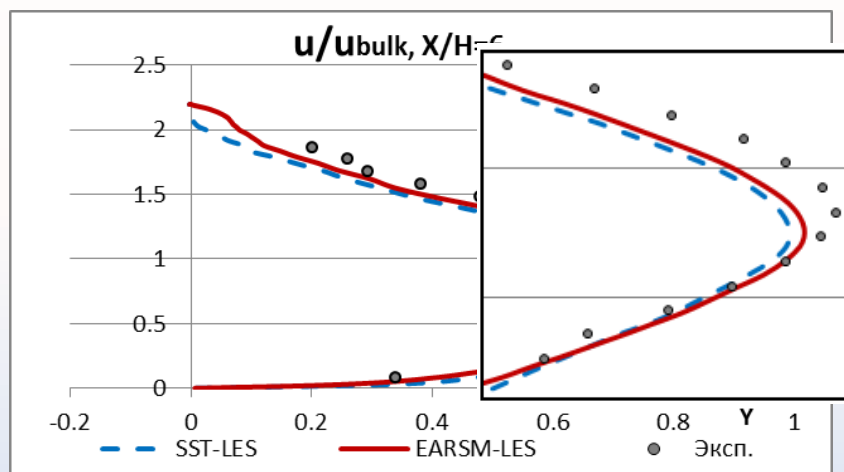
С экспериментом сравнивается продольная скорость, нормированная на средне-поточную скорость, в различных сечениях диффузора



Пример использования RANS-LES

Турбулентное течение в асимметричном диффузоре

Профили осредненной скорости



ВЫВОДЫ

Перспективы использования

- Зонный RANS-LES наиболее оптимален при решении задач внутренней гидродинамики.
- Реализованная технология может применяться в промышленных приложениях
- Зонный RANS-LES дает более точные результаты при использовании модели турбулентности EARSM и может использоваться при моделировании течений в геометрических конфигурациях любой сложности.

