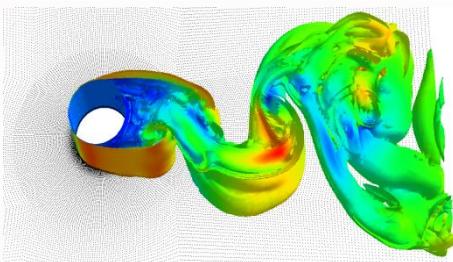


# Зонный RANS-LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений

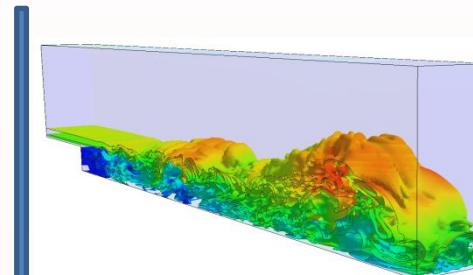
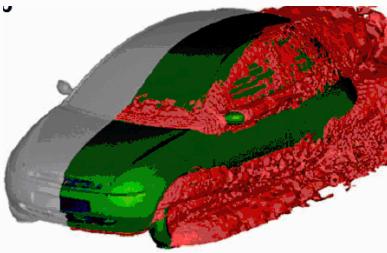
Козелков А.С., Курулин В.В., Тятушкина Е.С., Пучкова О.Л.,  
Лашкин С.В.  
ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» г. Саров

# Моделирование турбулентных течений

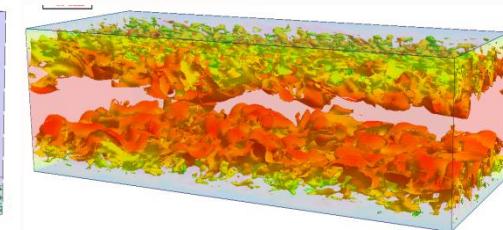
Большая часть практически важных течений являются турбулентными:



Внешнее обтекание



Внутреннее течение



Увеличение точности моделирования индустриальных 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:

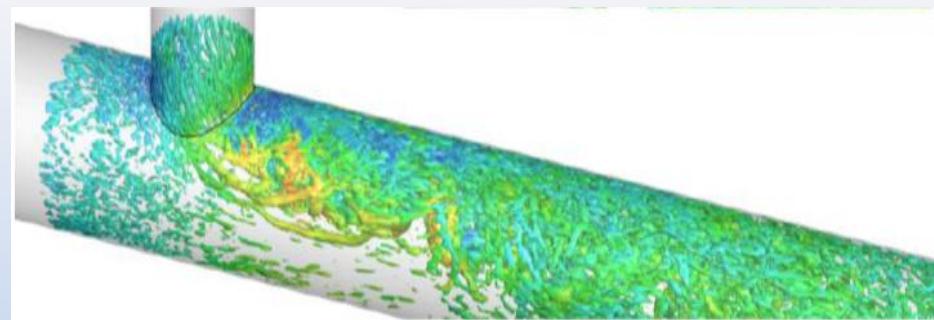
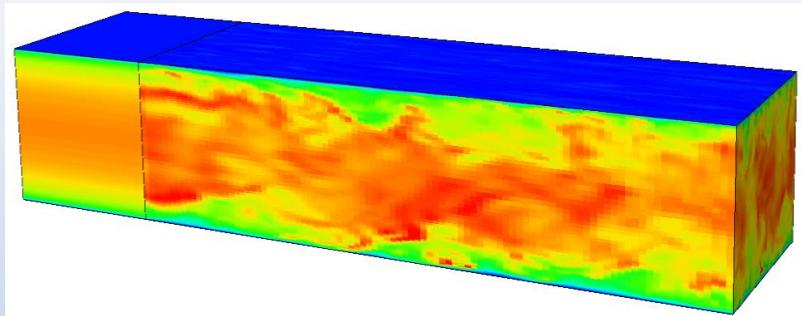
- RANS (SST, KE, специализированные модели)
- LES (Large Eddy Simulation)
- Гибридные подходы:
  - DES
  - **Зонный RANS-LES**

# 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)

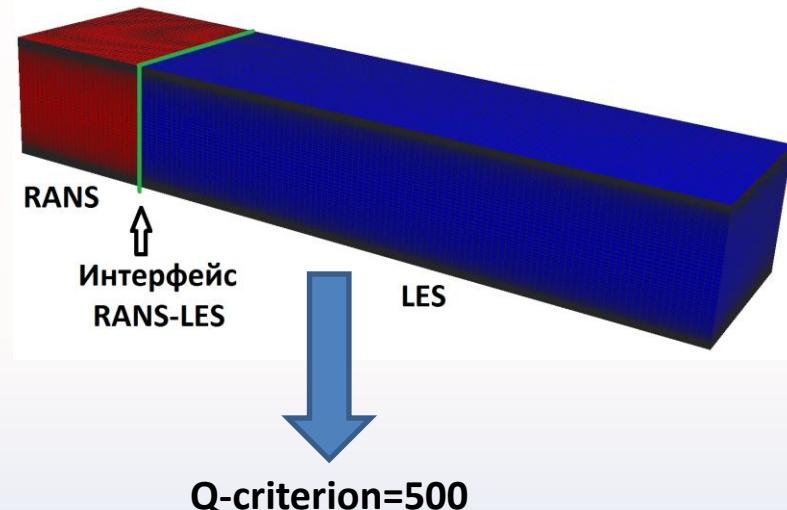
Эффективен для течений с любым размером отрывной зоны  
(задачи внутренней гидродинамики)



- Требует использования алгоритмов генерации турбулентных пульсаций

# Зонный RANS-LES подход

## Технология реализации



- **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:

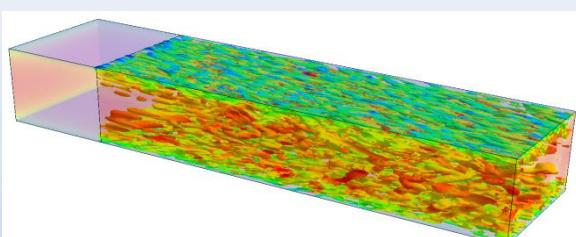
- **Этап 1 – стационарный RANS расчет**

Определяются параметры турбулентности на границе областей.

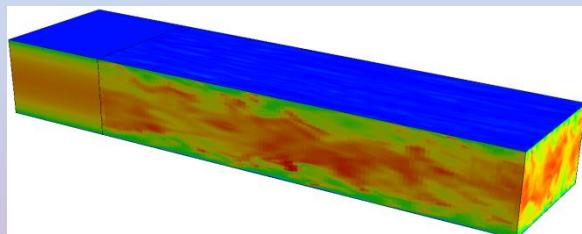
Интерфейс работает как внутренние грани

- **Этап 2 – нестационарный расчет**

Интерфейс работает как вход с генерированием турбулентных пульсаций

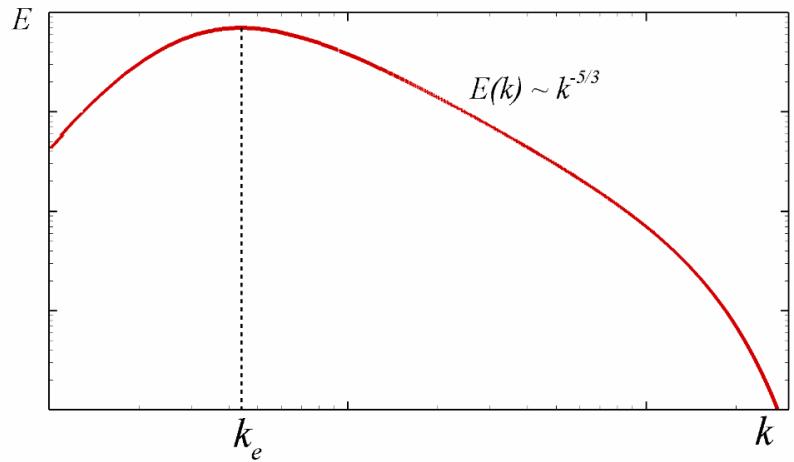


Velocity



# 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  $\tau_{ij}^t$  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 реинольдсовских напряжений

Неверное предсказание тензора  $\tau_{ij}^t$



Значительная погрешность в генерации турбулентных структур на входе в LES область

# Базовая модель

## Модель SST

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



## Модели класса RSM

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \end{cases}$$

$\left( \begin{array}{ccc} \tau_{ii} & \tau_{ij} & \tau_{ik} \\ \tau_{ji} & \tau_{jj} & \tau_{jk} \\ \tau_{ki} & \tau_{kj} & \tau_{kk} \end{array} \right)$

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

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

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  $a_{ij}$**

$$\tau_{ij}^t = \overline{u'_i u'_j} = k_t \left( a_{ij} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \right), a_{ij} = \frac{\overline{u'_i u'_j}}{k_t} - \frac{2}{3} \delta_{ij}$$

**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  $\beta_i$  определяются по формулам и являются функциями тензорных инвариантов**

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

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

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

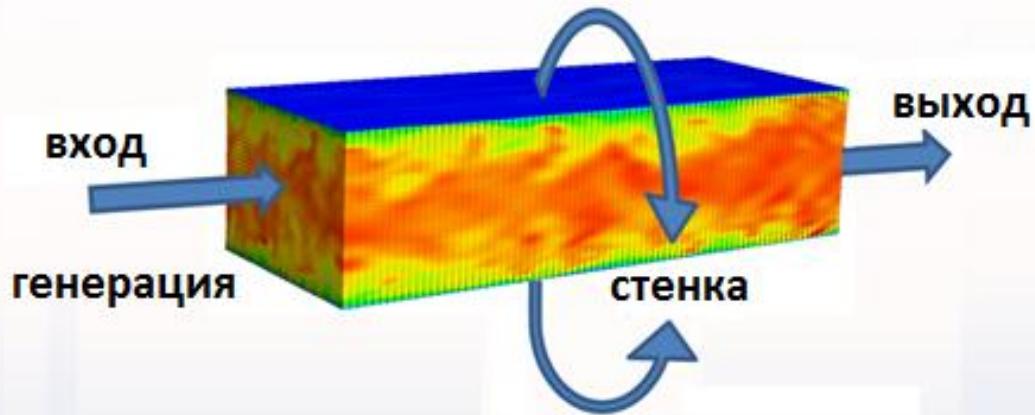
**Использованы константы модели**  $A_1 = 1.2$ ,  $C_1' = \frac{9}{4}(C_1 - 1)$ ,  $C_1 = 1.8$

**Базовая модель – BSL**

# Зонный RANS-LES подход

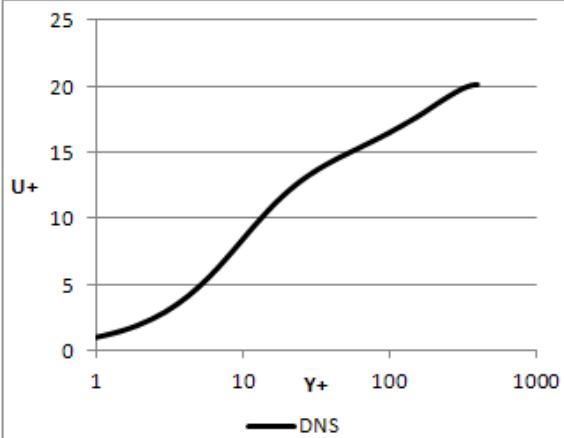
## Генератор турбулентных пульсаций

Пример генерации – развитое турбулентное течение в плоском канале

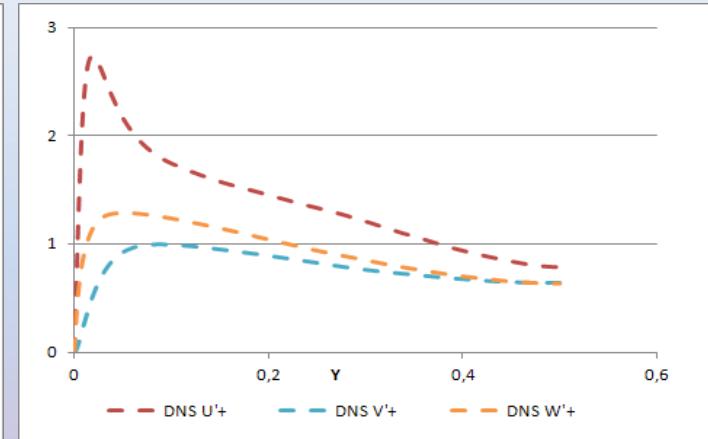
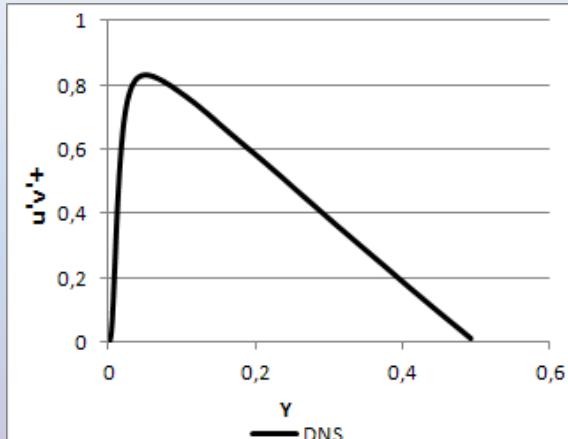


- По известному DNS решению\* на входе генерируются турбулентные структуры
- Проводится LES-расчет
- Оцениваются осредненные характеристики, форма турбулентных структур

Скорость



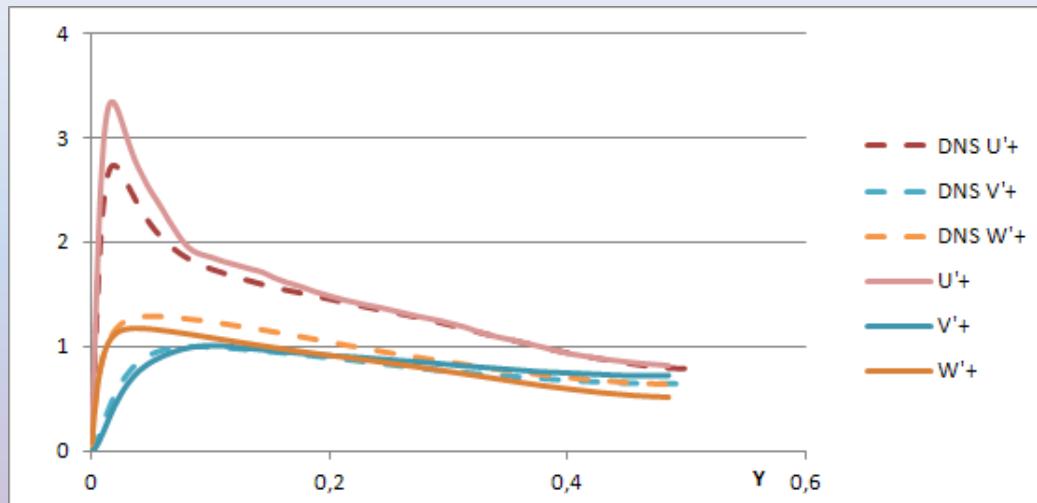
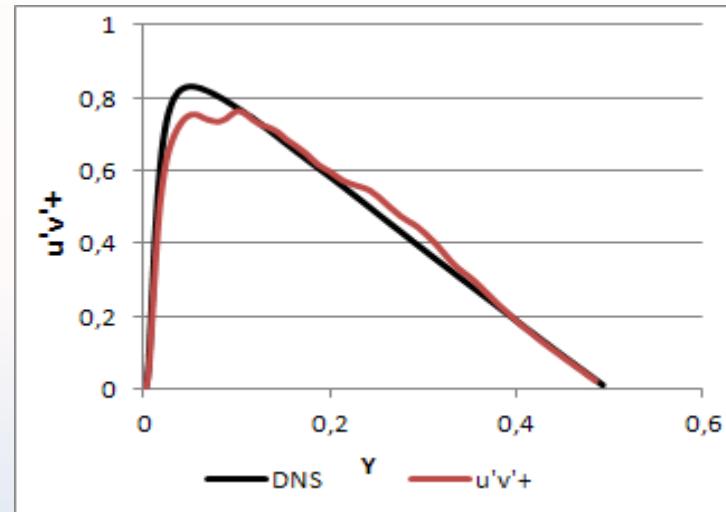
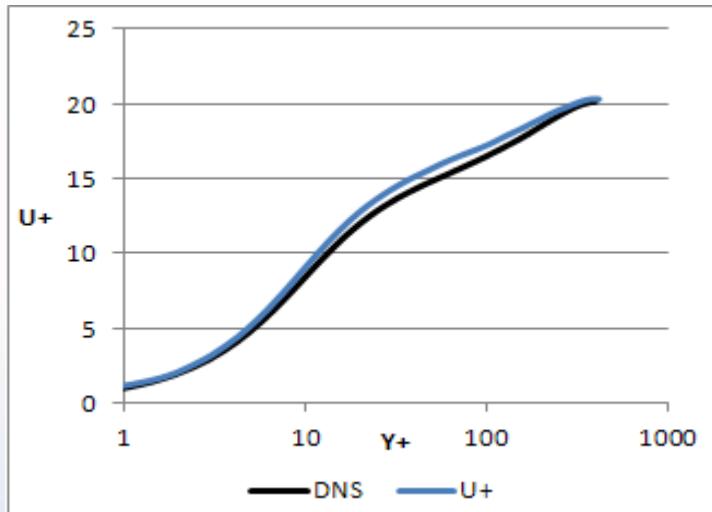
Компоненты тензора напряжений Рейнольдса



# Зонный RANS-LES подход

## Генератор турбулентных пульсаций

Пример генерации – развитое турбулентное течение в плоском канале



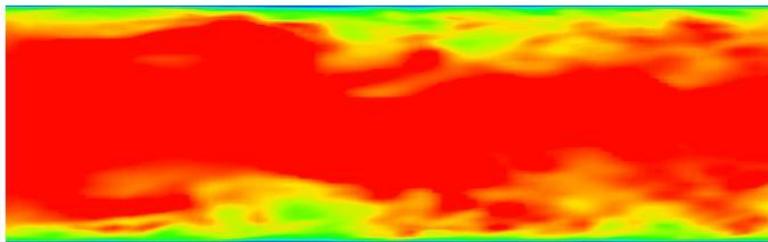
# Зонный RANS-LES подход

## Генератор турбулентных пульсаций

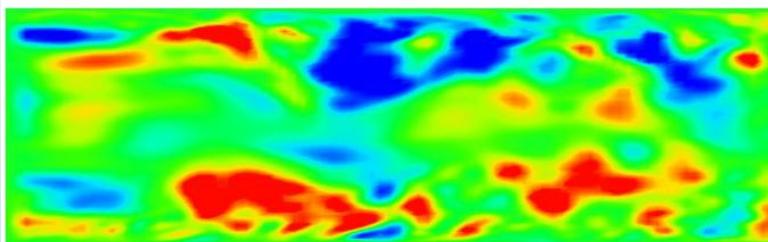
Пример генерации – развитое турбулентное течение в плоском канале

Генератор

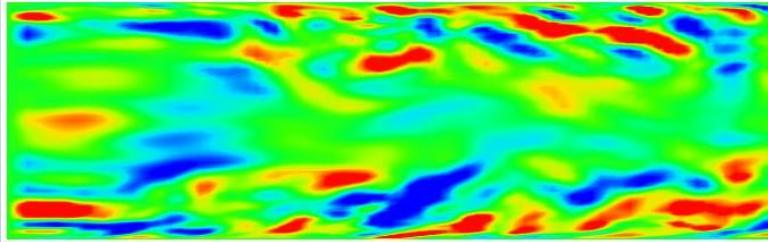
$U$



$V$

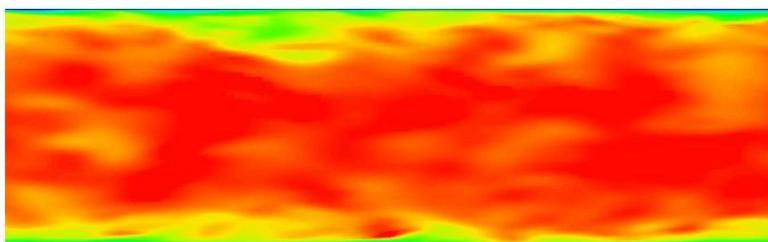


$W$

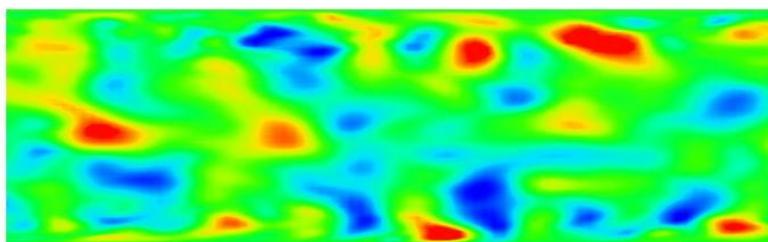


Решение LES

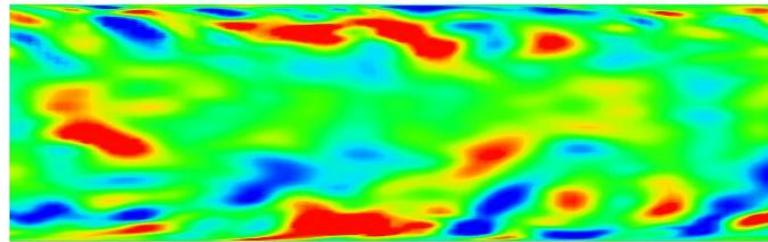
$U$



$V$

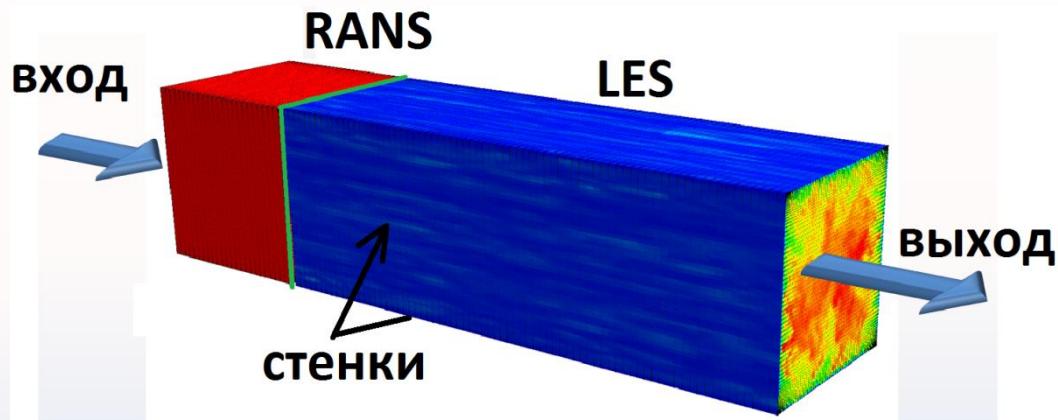


$W$



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

### Границные условия

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

### Параметры расчета

Схема BCD с  $j=0.9$

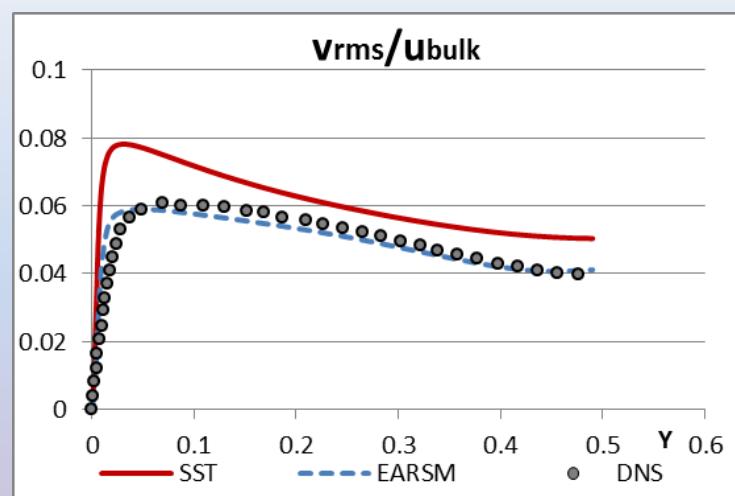
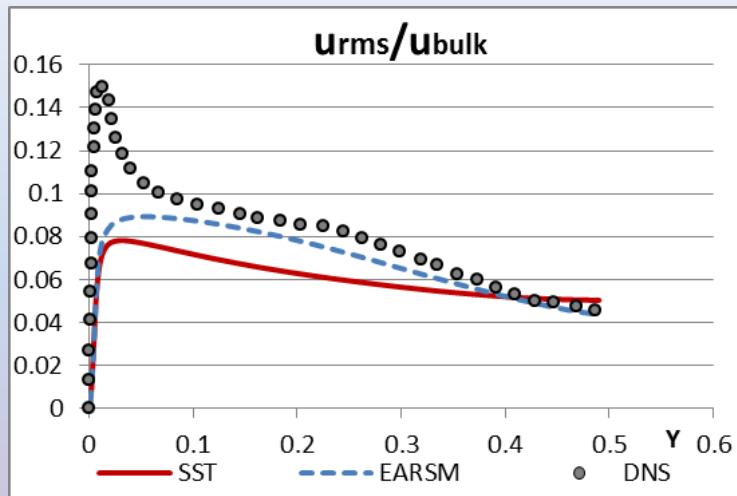
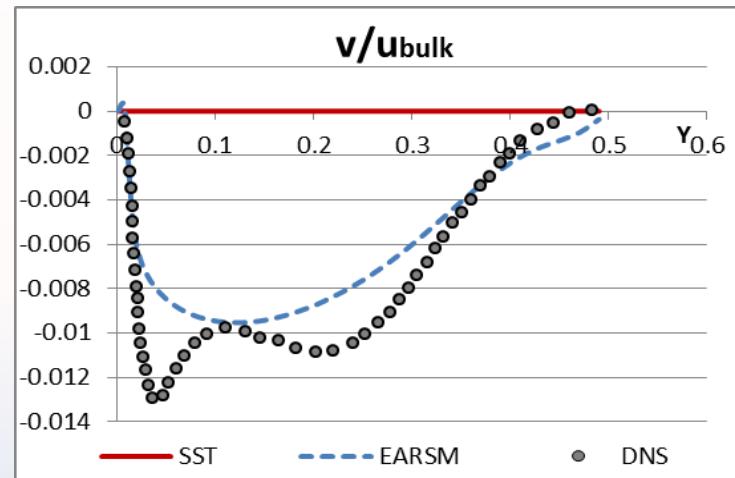
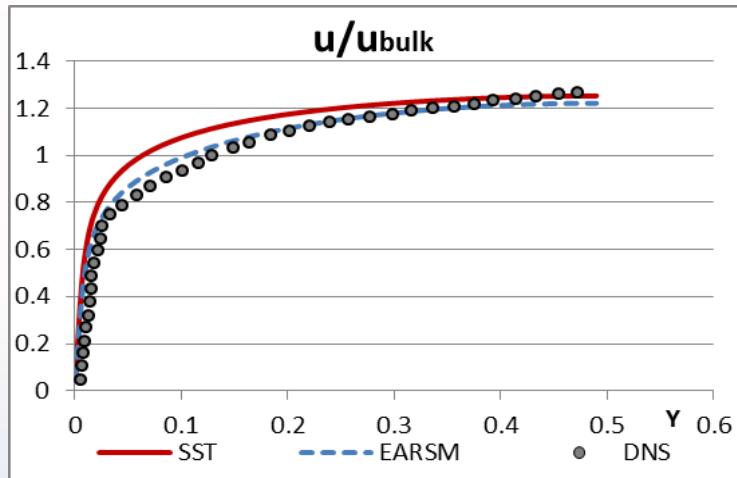
Схема Адамса-Бешфорта

Число Куранта CFL = 1.1

LES Cs = 0.05

# Пример использования RANS-LES

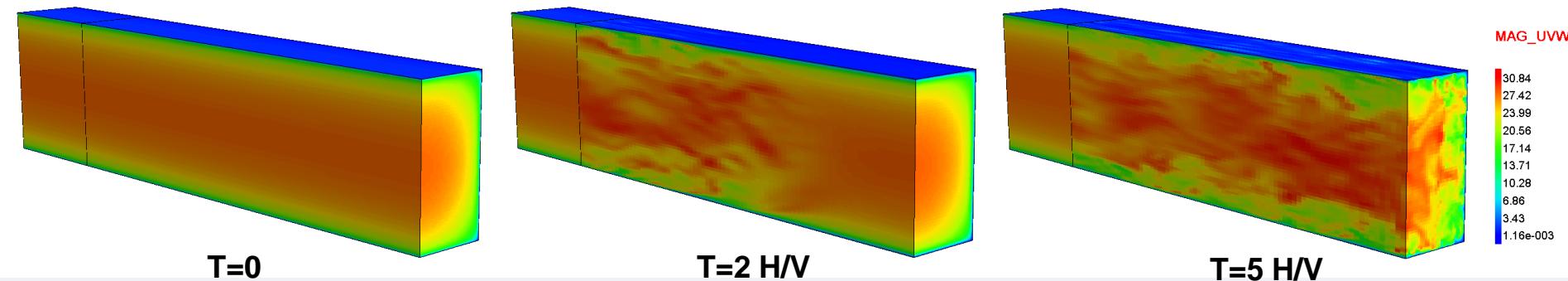
## Профили осредненной скорости



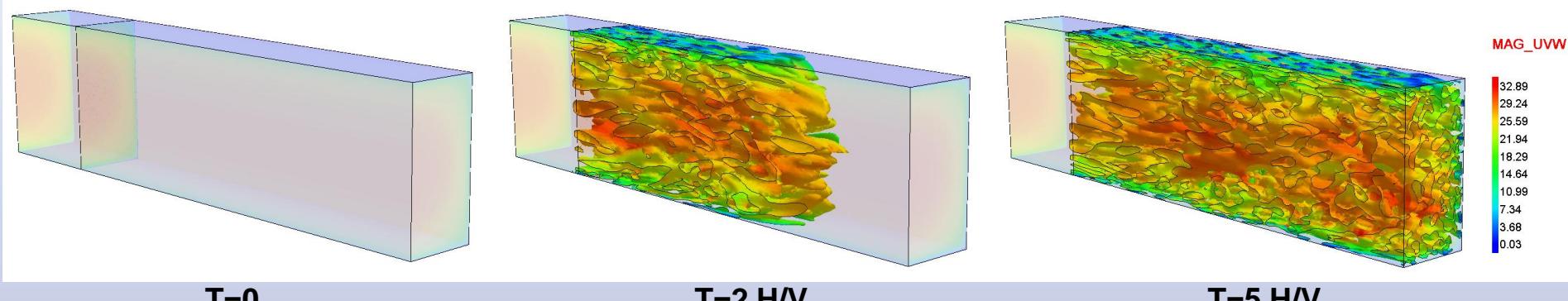
# Пример использования RANS-LES

Турбулентное течение в квадратном канале

Амплитуда скорости

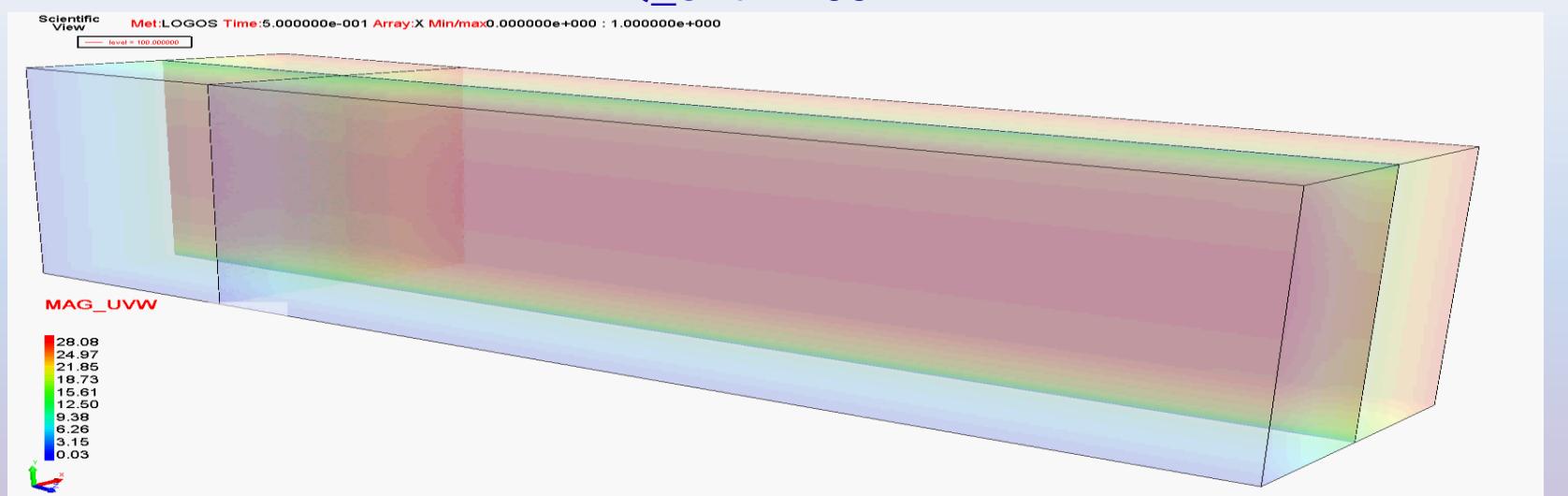
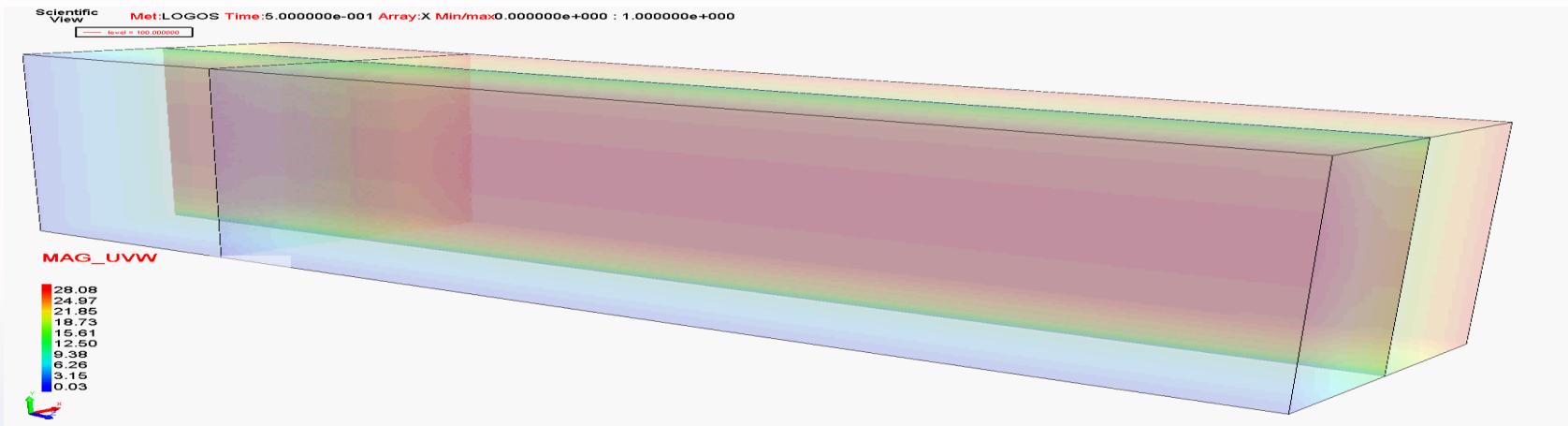


Q\_crit = 100



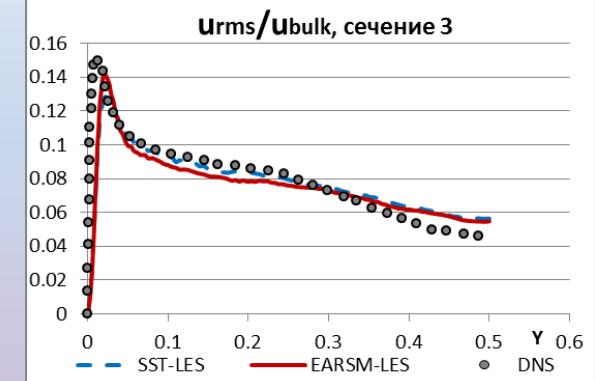
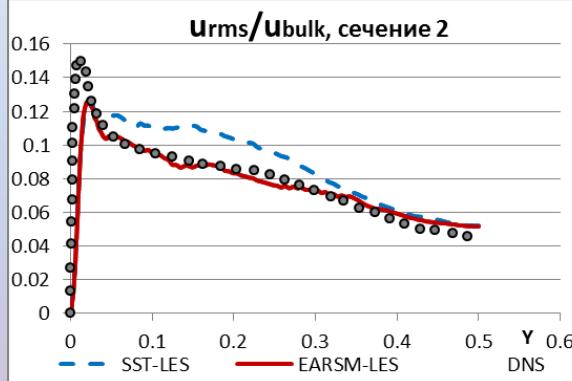
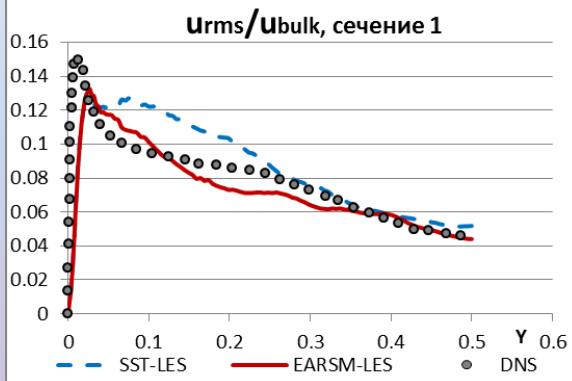
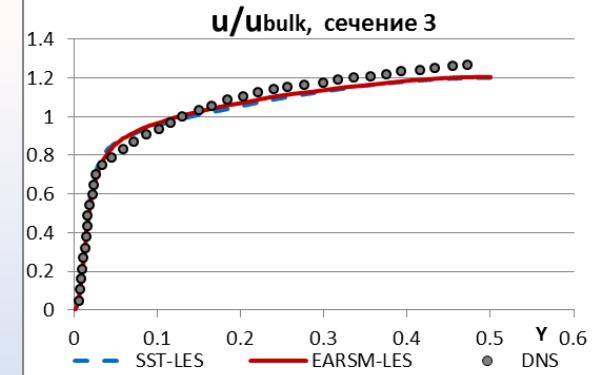
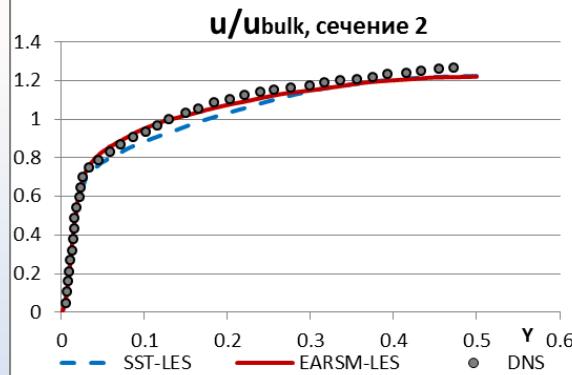
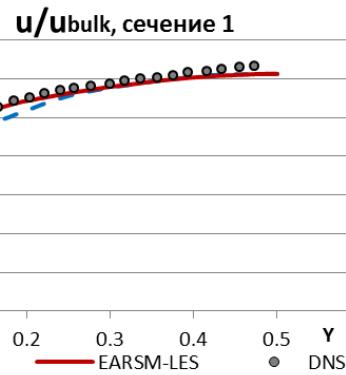
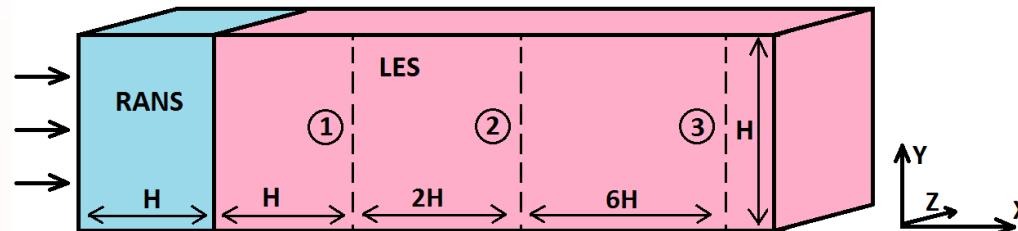
# Пример использования RANS-LES

## Амплитуда скорости



# Пример использования RANS-LES

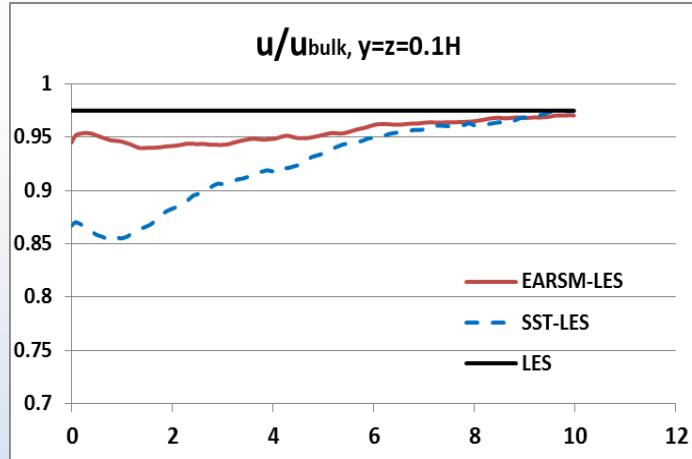
## Профили осредненной скорости



## 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)

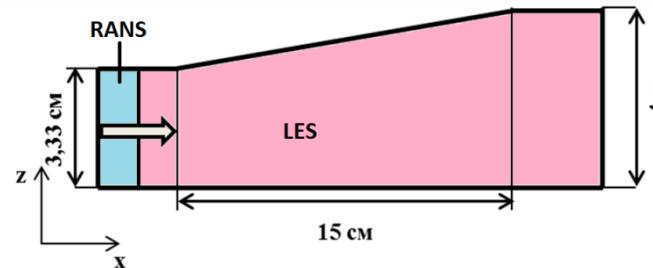
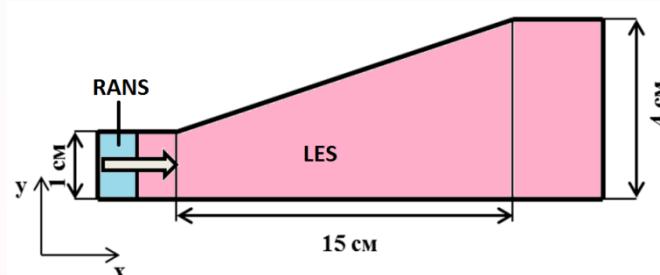


- Зонный RANS-LES на основе EARSM уже с самого начала интерфейса имеет отклонение от результатов LES расчета не более 5%,
- SST-LES достигает такого значения лишь на расстоянии  $5H$  от интерфейса.

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

# Пример использования RANS-LES

## Турбулентное течение в ассиметричном 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 Cs = 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

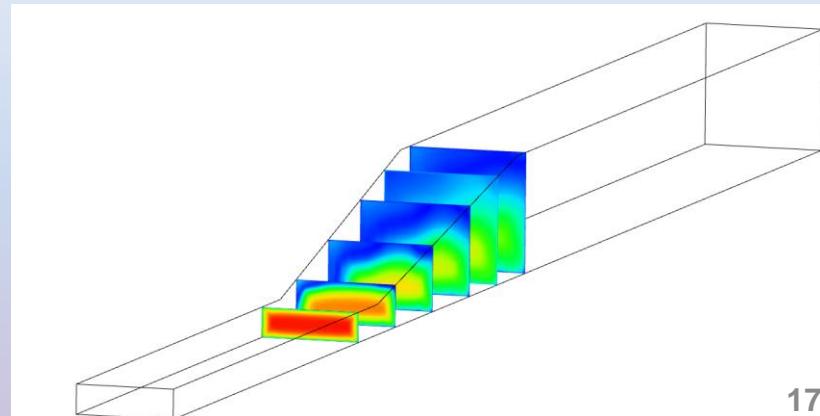
### Границные условия

На входе задавалась постоянная скорость

$U=1$  м/с

### Сравнение

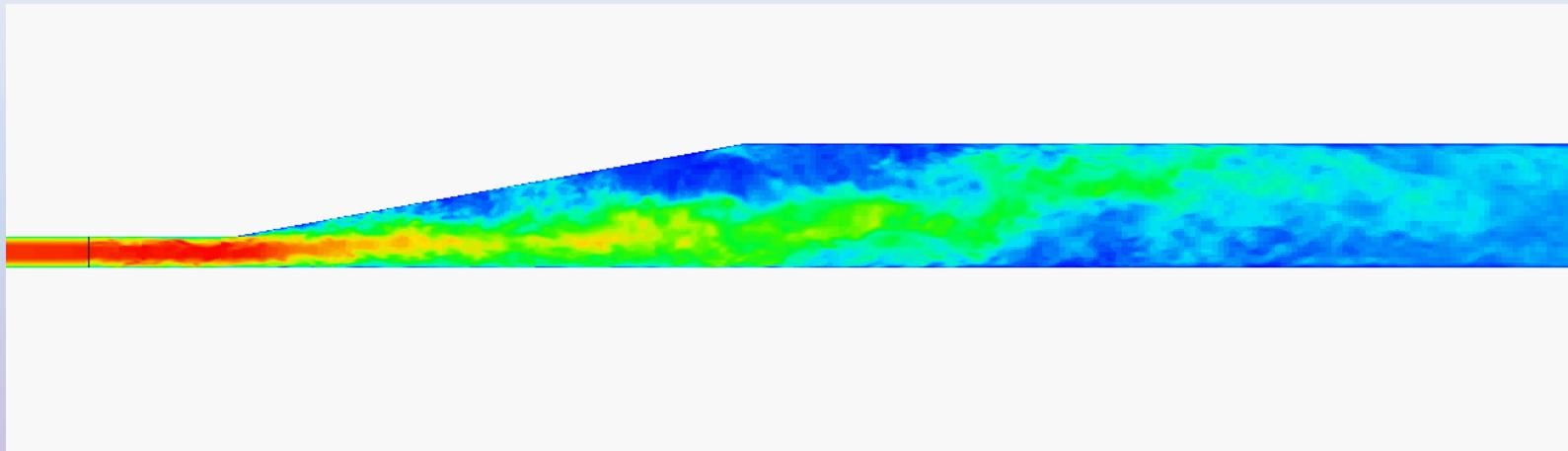
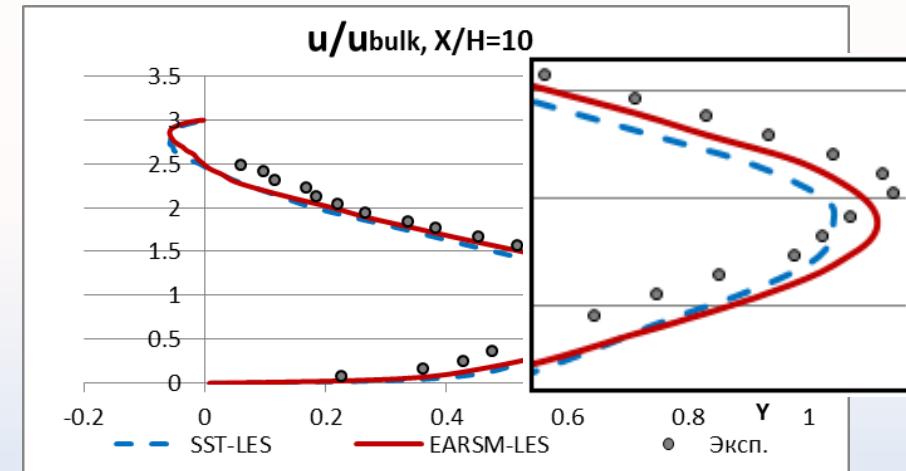
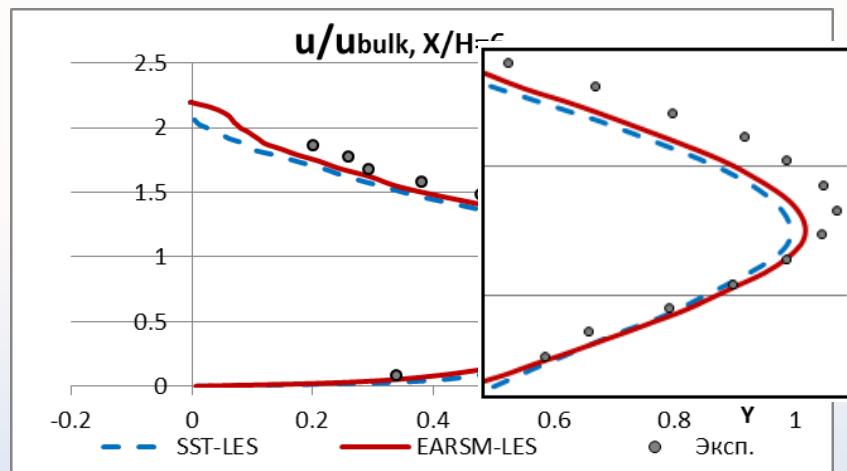
С экспериментом сравнивается продольная скорость, нормированная на средне-поточную скорость, в различных сечениях диффузора



# Пример использования RANS-LES

Турбулентное течение в ассиметричном диффузоре

Профили осредненной скорости



# ВЫВОДЫ

## Перспективы использования

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

