

РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЯ NASA0012
В ПОСТАНОВКЕ IDDES С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СХЕМ
ВЫСОКОГО ПОРЯДКА АППРОКСИМАЦИИ ТИПА МР

В.А. Шорстов
В.Е. Макаров
А.А. Осипов
А.В. Грачева

Центральный институт авиационного моторостроения,
Москва, shorstov@ciam.ru

Создание программного комплекса нового поколения для аэродинамических и аэроакустических расчетов, обеспечивающего:

- Использование высококачественных (ортогональных, слабоменяющихся по размеру) сверхмощных гибридных расчетных сеток с числом ячеек $10^9 - 10^{10}$
- Высокий порядок аппроксимации по пространству (не менее 5-го) и по времени (не менее 4-го)
- Использование современных вихреразрешающих методов моделирования турбулентности
- Обеспечение высоких эксплуатационных характеристик за счет массированного (10^3-10^4 ядер) распараллеливания, экономного вычислительного алгоритма и эффективного использования памяти
- Распределенный пре- и постпроцессинг (подготовка данных и обработка результатов) расчета
- Динамический мониторинг состояния задачи, в том числе и на удаленных ресурсах)
- ...

- Задачи текущего этапа
- Конечноразностная схема
- Метод моделирования турбулентности
- Модельные задачи:
 - Распад изотропной турбулентности
 - Периодическое течение в плоском канале
 - Пластина с генерацией синтетической турбулентности
 - Двумерный источник звука в однородном потоке
- Основные задачи:
 - Течение в следе за профилем NACA012
 - Шум задней кромки профиля NACA012
- Заключение
- Благодарности

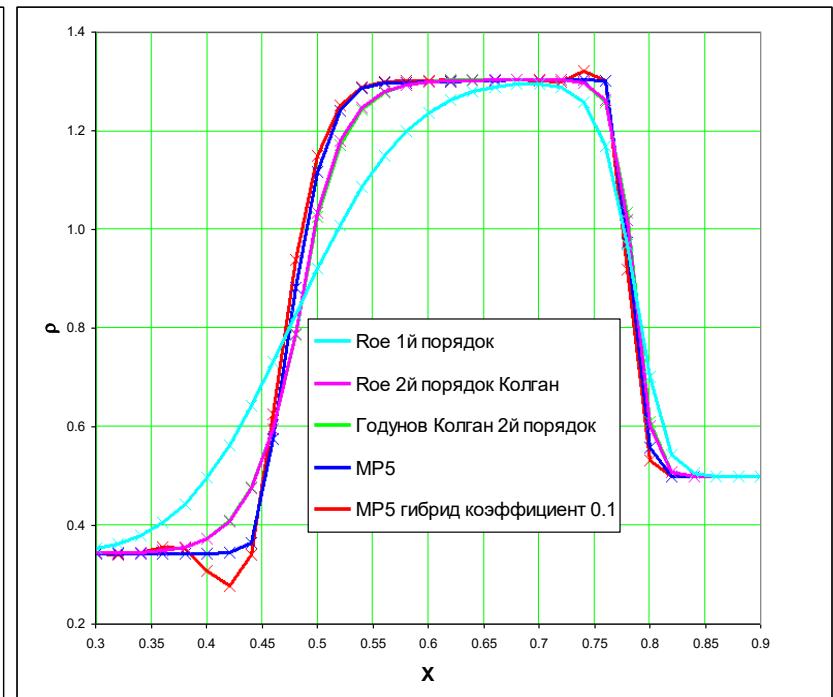
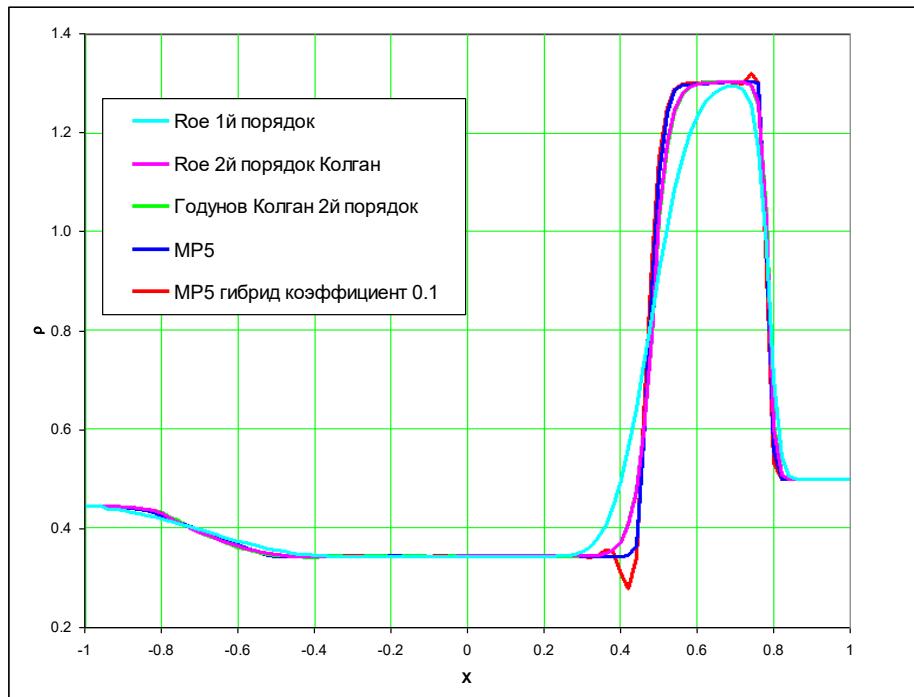
- Совершенствование расчетной методики, основанной на выбранных конечноразностной схеме высокого порядка аппроксимации, относящейся к типу MP (Monotonicity Preserving), и вихреразрешающем методе моделирования турбулентности IDDES на примере решения одной из наиболее известных задач аэроакустики - определение шума задней кромки обтекаемого дозвуковым потоком без угла атаки профиля NACA0012
- Разработку методики анализа результатов расчетов, характерной для рассматриваемого класса задач
- Анализ профилей средней скорости и пульсаций скорости в следе
- Сопоставление полученного расчетным путем спектра акустических возмущений от профиля в дальнем поле с опубликованными экспериментальными данными

Схема MP (Monotonicity Preserving) 5-го порядка аппроксимации по пространству и 4-го порядка по времени (Рунге-Кутта)

Гибридный вариант схемы с параметром (весом) противопоточности k
(при $k=1$ получаем схему MP)

$$F = \frac{1}{2} \left(F \begin{pmatrix} \rho_R \\ \rho_R u_R \\ e_R \end{pmatrix} + F \begin{pmatrix} \rho_L \\ \rho_L u_L \\ e_L \end{pmatrix} \right) - \frac{1}{2} L \cdot |\Lambda| \cdot R \cdot \begin{pmatrix} (\rho_R - \rho_L) \cdot k \\ (\rho_R u_R - \rho_L u_L) \cdot k \\ (e_R - e_L) - \left(\frac{\rho_R u_R^2}{2} - \frac{\rho_L u_L^2}{2} \right) \cdot (1 - k^2) \end{pmatrix}$$

Сравнение результатов решения модельной задачи о распаде произвольного разрыва



Метод IDDES (Improved DDES)¹ расширяет область применимости DES на расчет присоединенных течений, то есть на LES с пристеночным моделированием (WMLES)

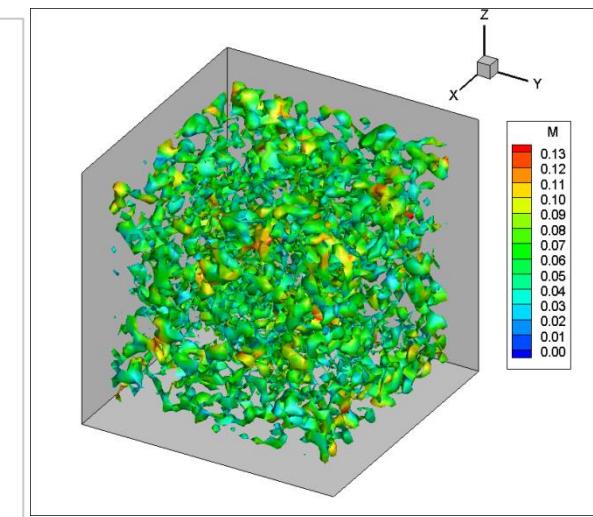
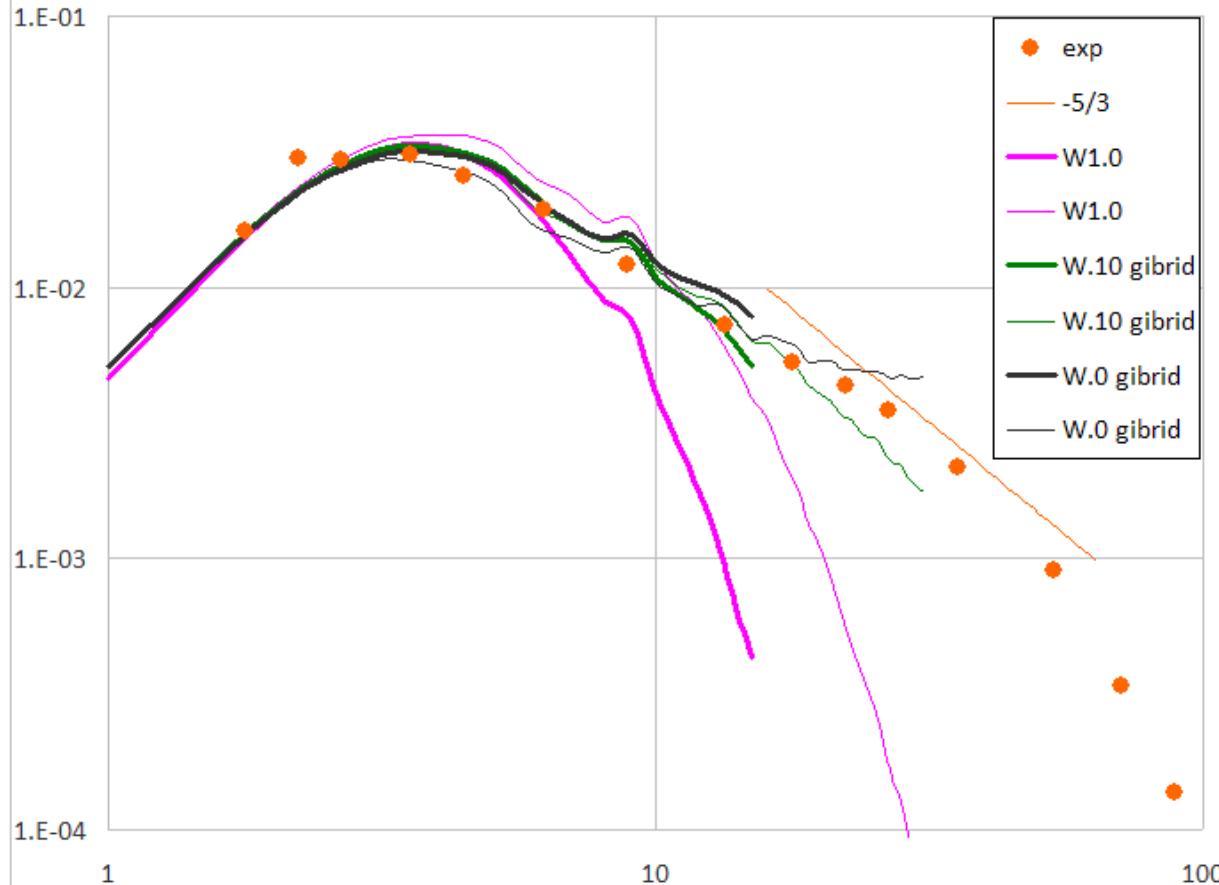
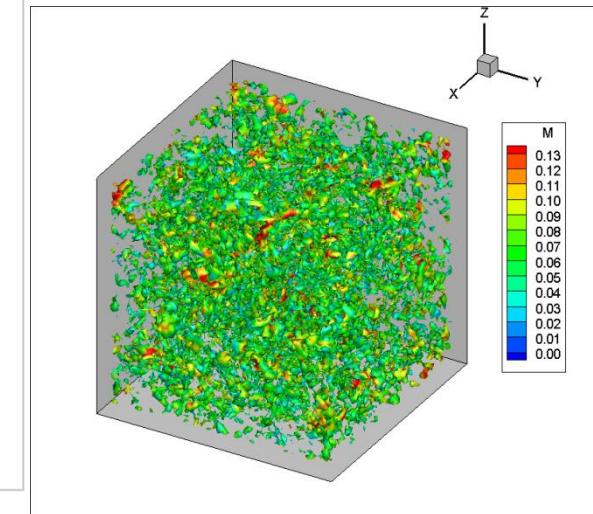
В основу IDDES положена идея о возможности объединения DDES с другой гибридной RANS-LES моделью, предназначеннной для WMLES, и обеспечения автоматического выбора той или иной модели, в зависимости от рассматриваемого течения и целей расчета

Таким образом в IDDES:

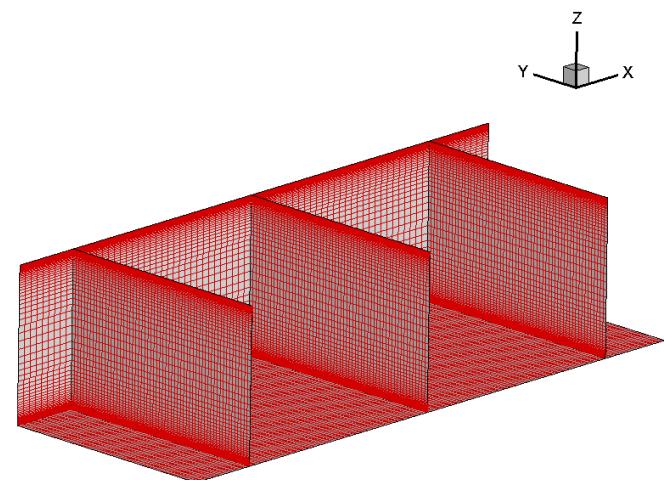
- В отрывных зонах реализуется LES (как в DDES)
- В присоединенном пограничном слое
 - При наличии турбулентного контента и достаточно мелкой сетки реализуется WMLES
 - В противном случае реализуется RANS (как в DDES)

¹Andrey K. Travin, Mikhail L. Shur, Philippe R. Spalart, and Mikhail Kh. Strelets IMPROVEMENT OF DELAYED DETACHED-EDDY SIMULATION FOR LES WITH WALL MODELLING, European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD 2006

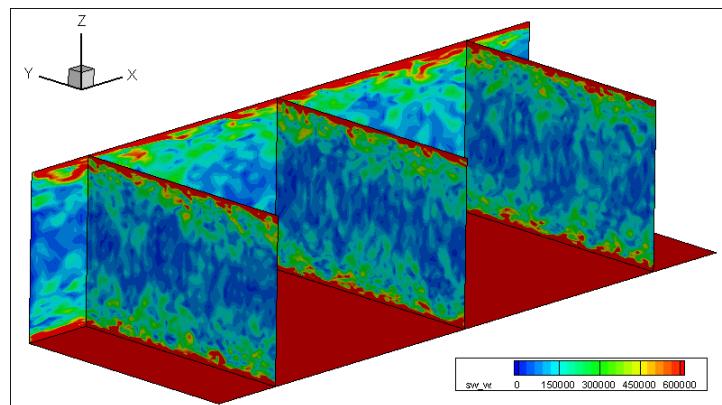
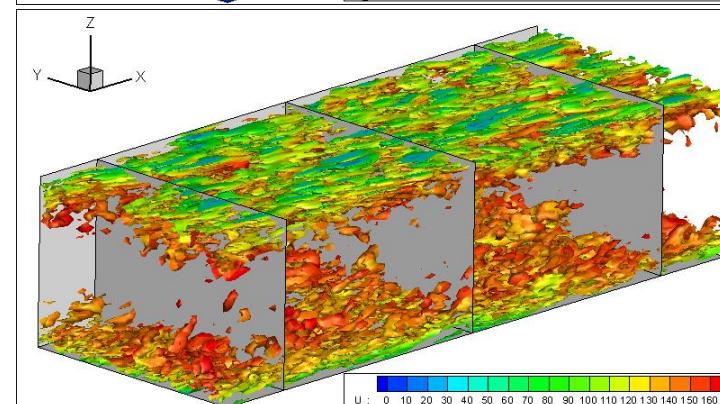
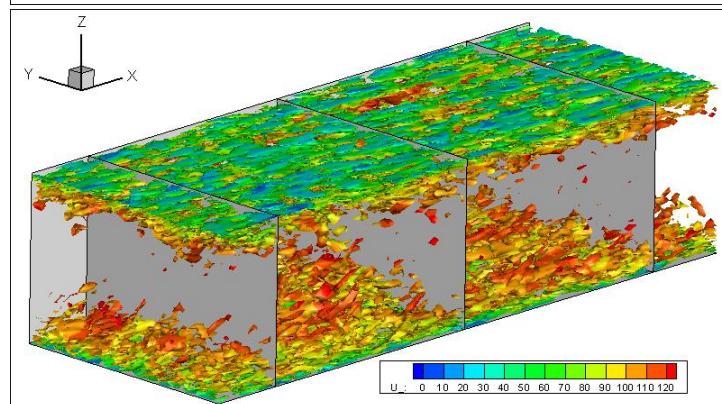
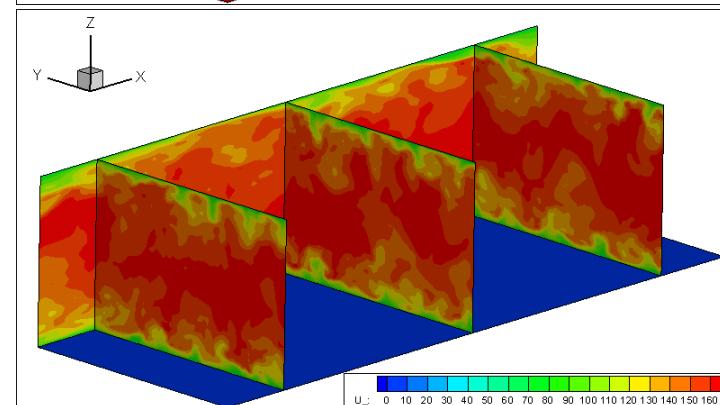
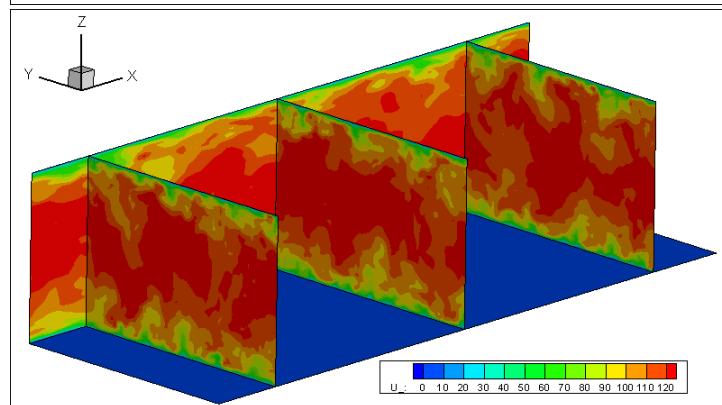
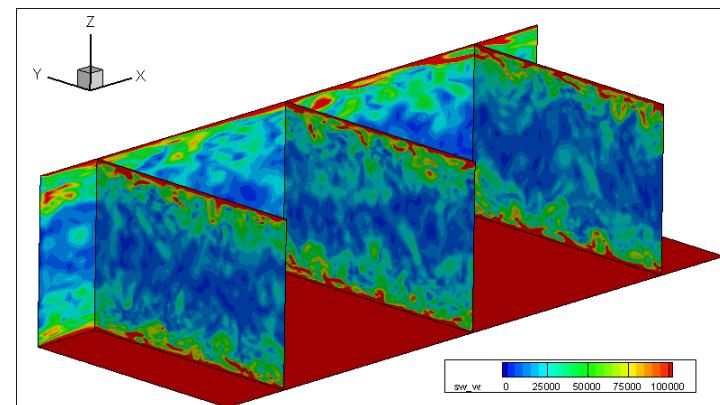
- **Распад однородной изотропной турбулентности**
- **Развитое турбулентное течение в плоском периодическом канале**
- **Пластина с генерацией синтетической турбулентности**
- **Двумерный источник звука в однородном потоке**

Размер куба $2\pi L$, $Re_L = 1618$ Безразмерный энергетический спектр в момент времени $.87L/U$ Сетка $32^3=32\ 768$ Толстые линии - сетка $32^3=32\ 768$, тонкие линии – сетка $64^3=262\ 144$ Сетка $64^3=262\ 144$

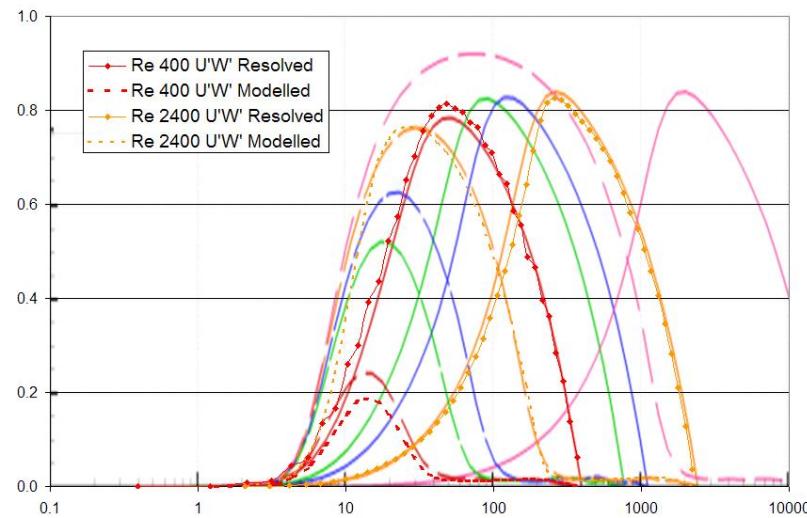
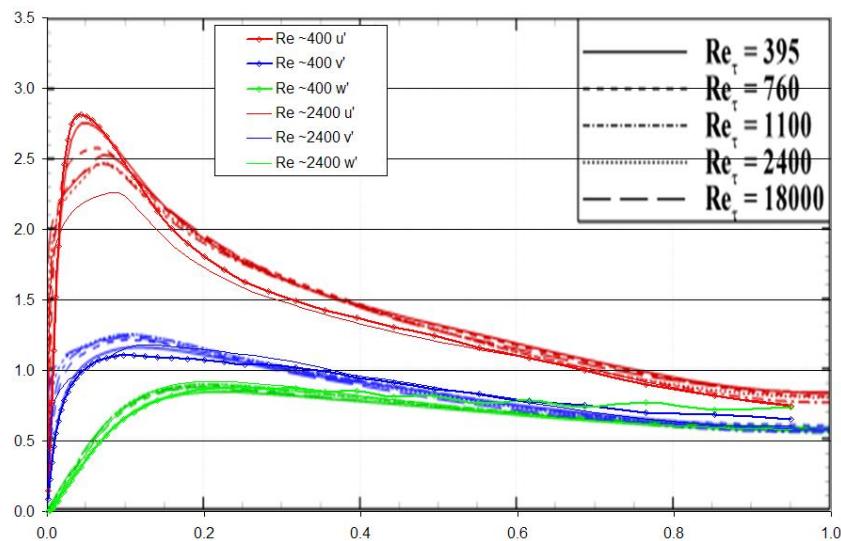
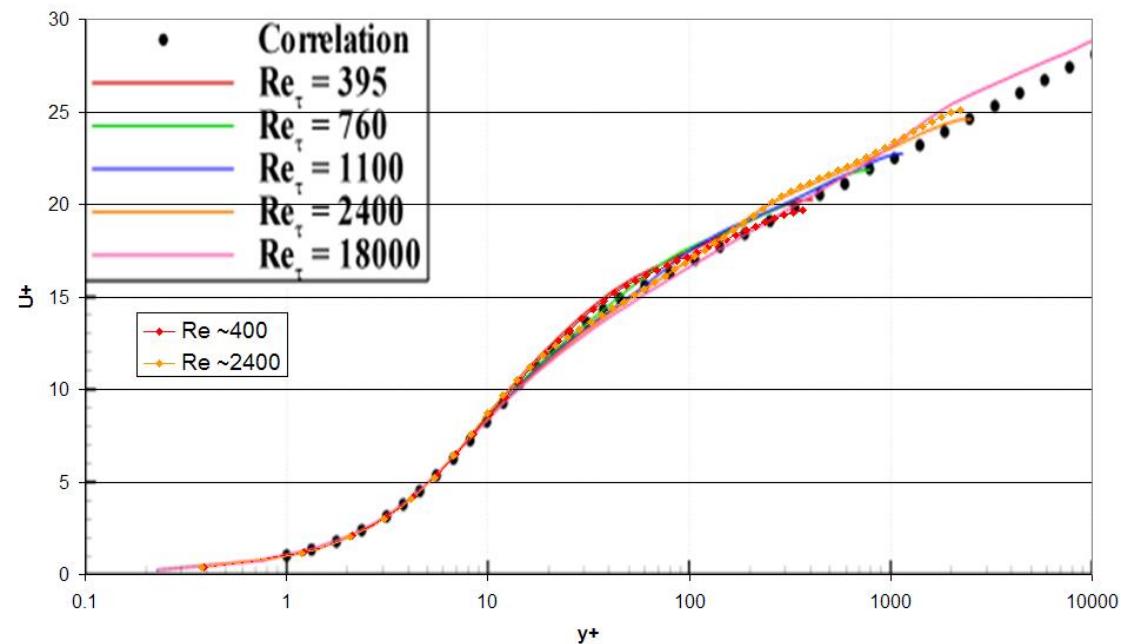
- Высота канала – H
- Основной параметр $Re_{H/2}=0.5 \cdot U_\tau \cdot H / \nu$, где $U_\tau = (\tau_w / \rho_w)^{1/2}$
- Расчетная область – параллелепипед $4H \times 1.5H \times H$
- Сетка равномерная по x и y с шагами $0.05H$ и $0.025H$ в направлении z , сгущающаяся к стенкам с коэффициентом 1.11 и обеспечивающая для первой ячейки $y^+ \approx 1$
- Границные условия:
 - периодичность по x и y
 - прилипание на стенках ($z=0$ и $z=H$)
- Дополнительно:
 - в области задавался объёмный источник импульса $(2/H) \cdot \tau_w \cdot \Delta V$, обеспечивающий заданное напряжение на стенке τ_w
 - рассматривались два разных канала, отвечающих $Re_{H/2}=400$ и $Re_{H/2}=2400$



Сеточные линии на стенке $z=0$,
боковой границе $y=0.75$ и
внутри расчетной области в
сечениях $x=\text{const}$

$Re_{H/2} \sim 400$  $Re_{H/2} \sim 2400$ 

Сравнение параметров течения с расчетами IDDES SST Fluent полученными в работах
M.S. Gritskevich, A.V. Garbaruk, J. Schutze & F.R. Menter



Появление турбулентных структур

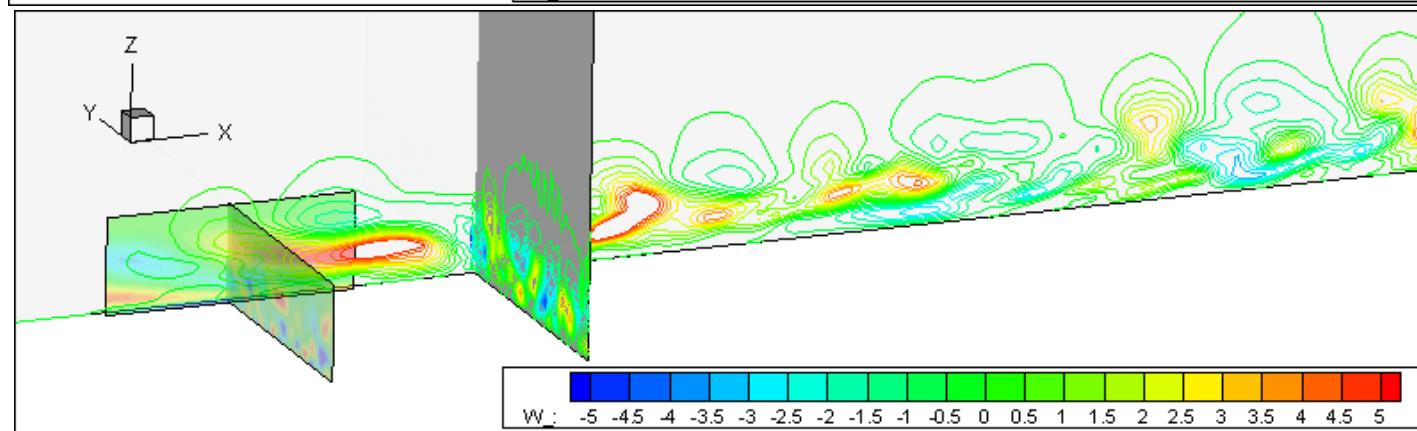
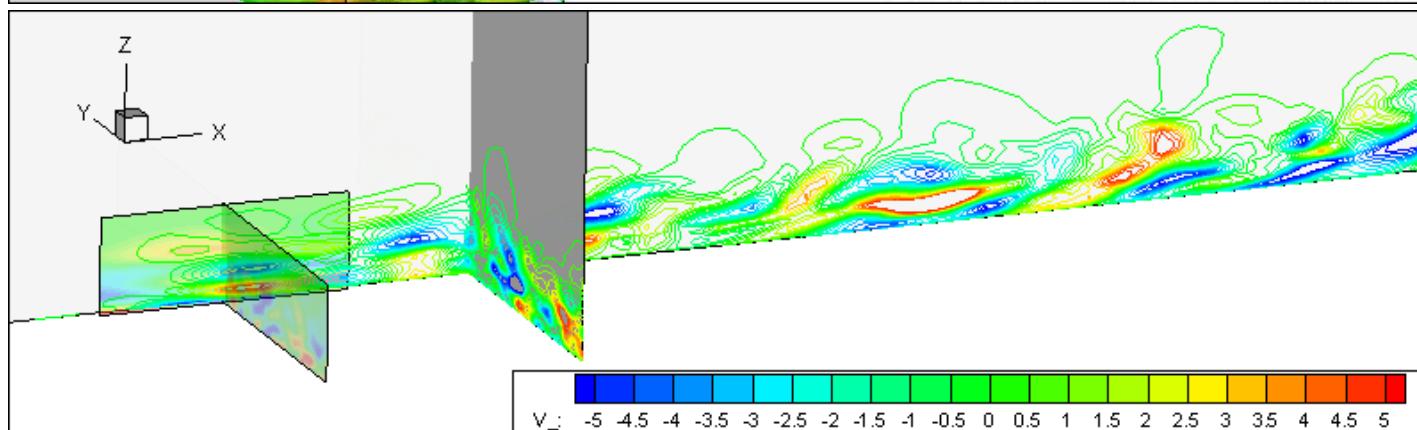
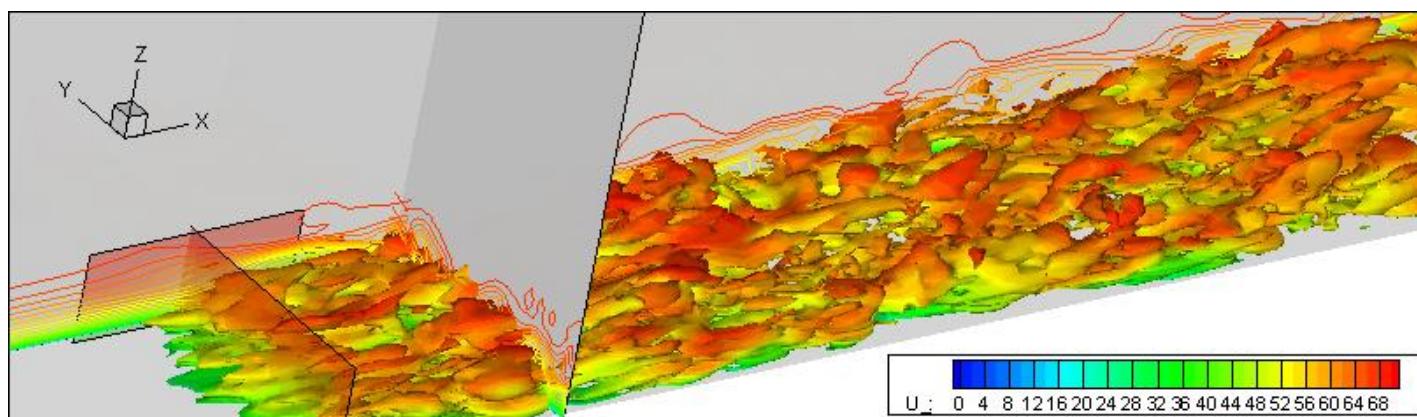
За счет естественной неустойчивости

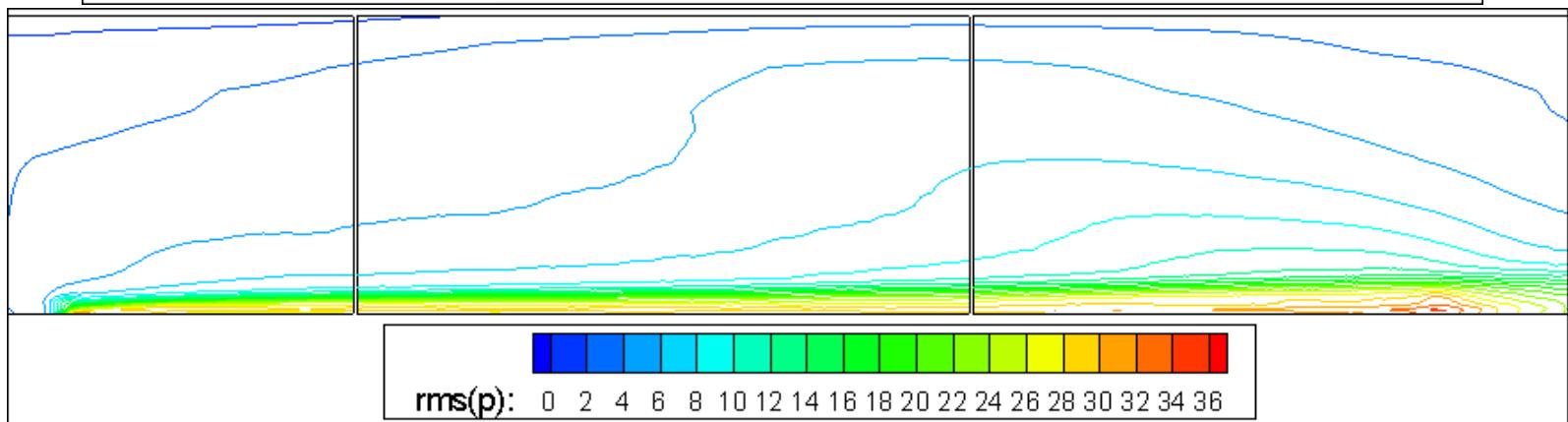
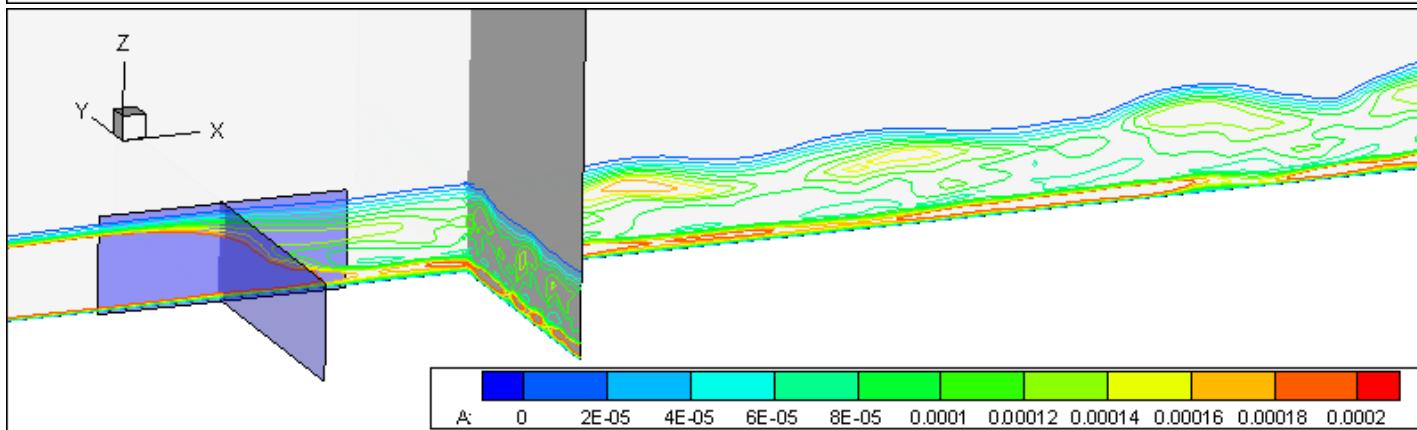
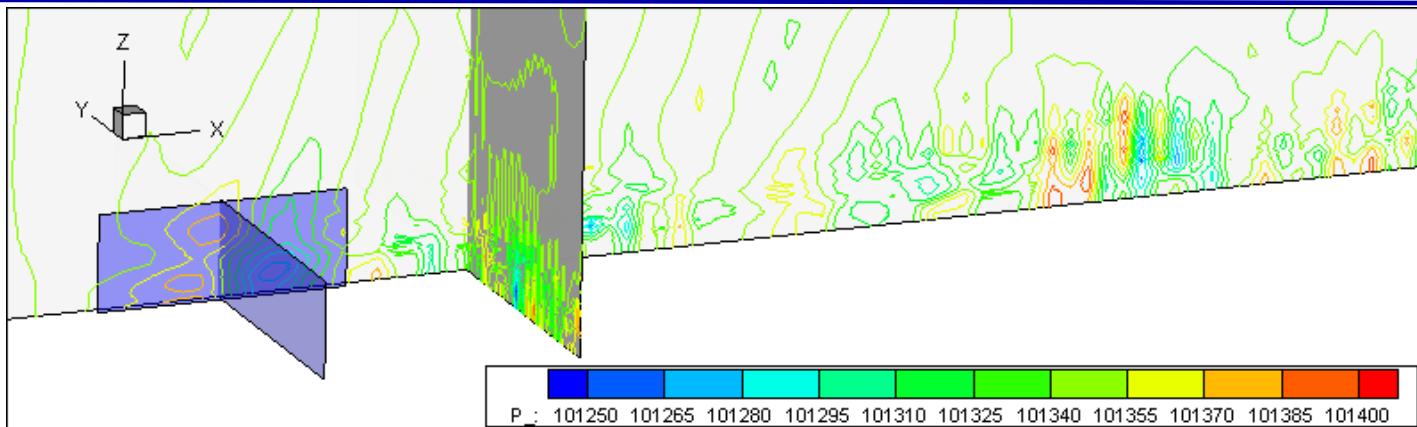
- Зависит от схемы и сетки
- В случае WMLES пограничного слоя сложно рассчитывать на правильное формирование структур в правильном темпе при отсутствии структур меньшего размера

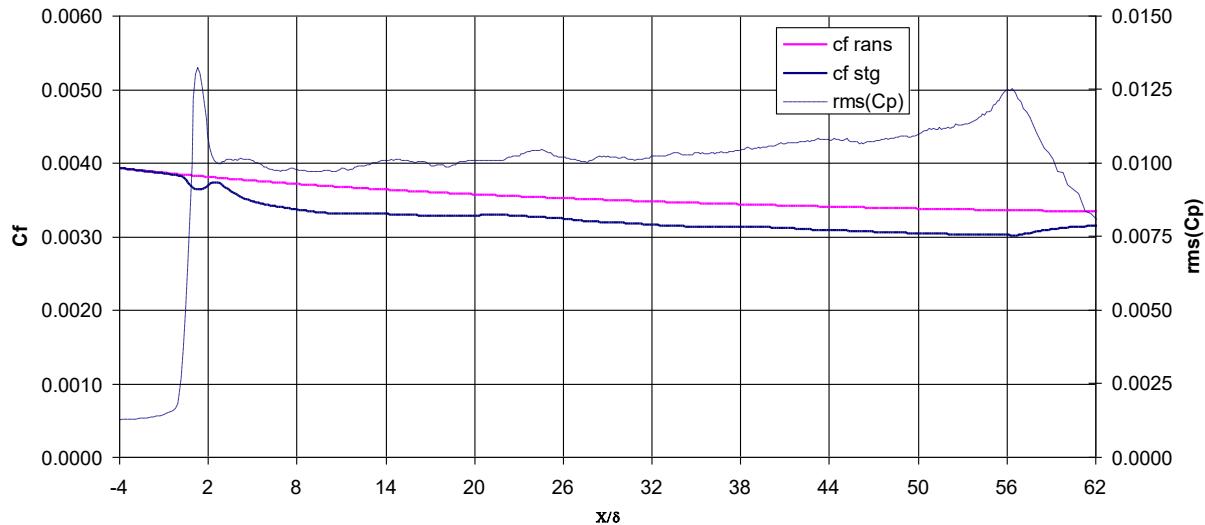
Можно сгенерировать, опираясь на локальные характеристики турбулентности
Могут быть получены из RANS-решения в окрестности границы RANS-LES (встроенный LES или ELES)

В настоящей работе был использован способ задания турбулентности – STG генератор с объемным источником, предложенный в статье Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., & Travin, A. K. (2014) Synthetic Turbulence Generators for RANS-LES Interfaces in Zonal Simulations of Aerodynamic and Aeroacoustic Problems. *Flow, Turbulence and Combustion*, 93(1), 63–92

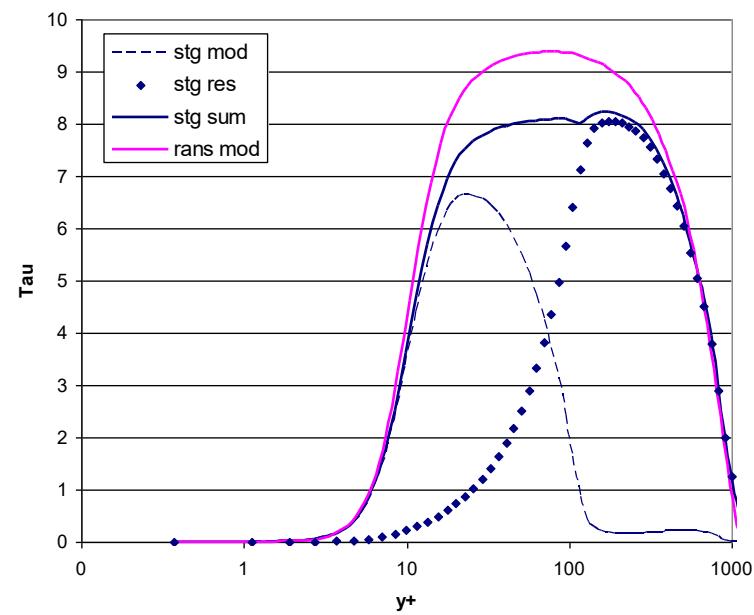
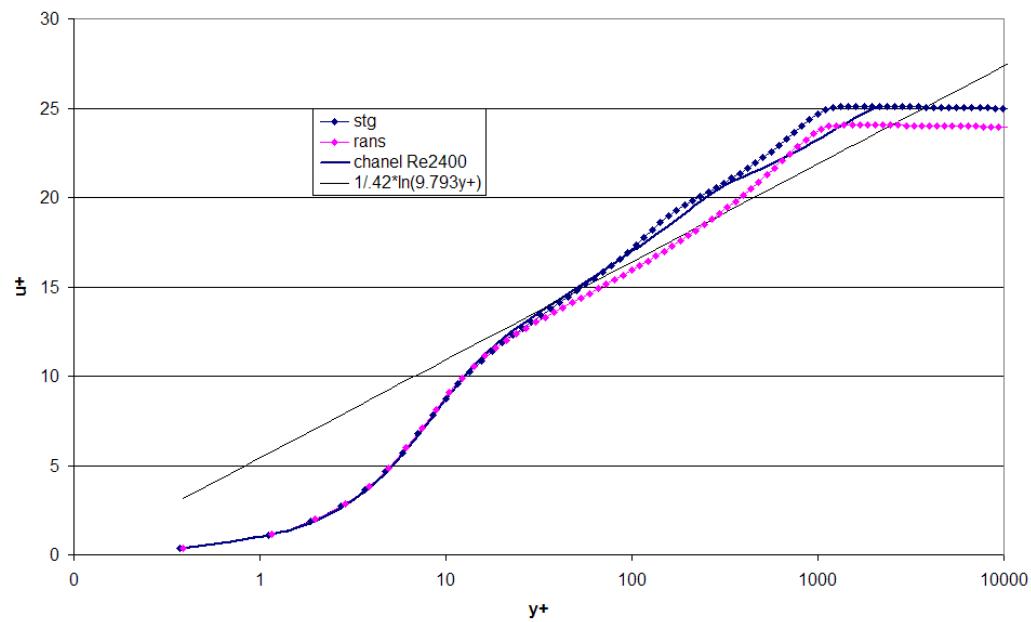
Сетка в пограничном слое идентична используемой в канале при $Re_h=2400$
Набегающий поток $p=101325$ Па, $Ro=1.225$ kg/m^3 $M=0.20$



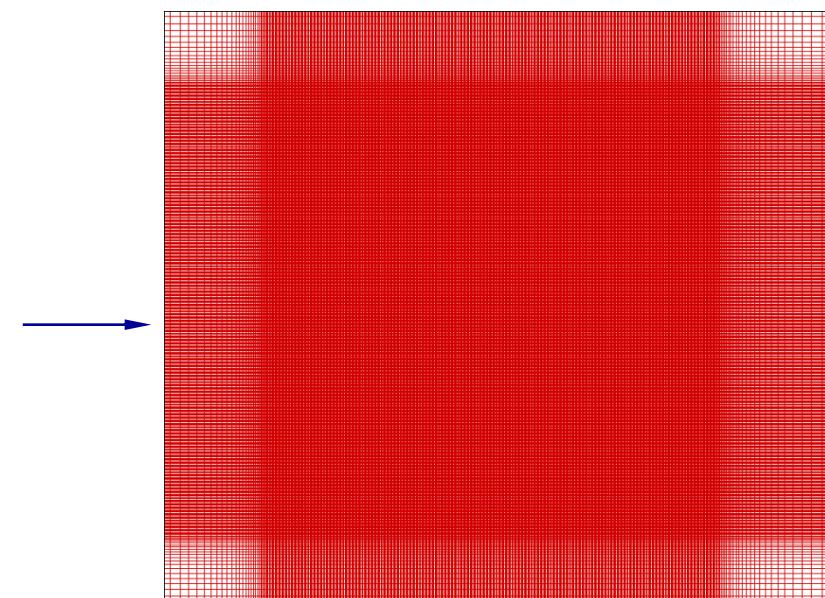




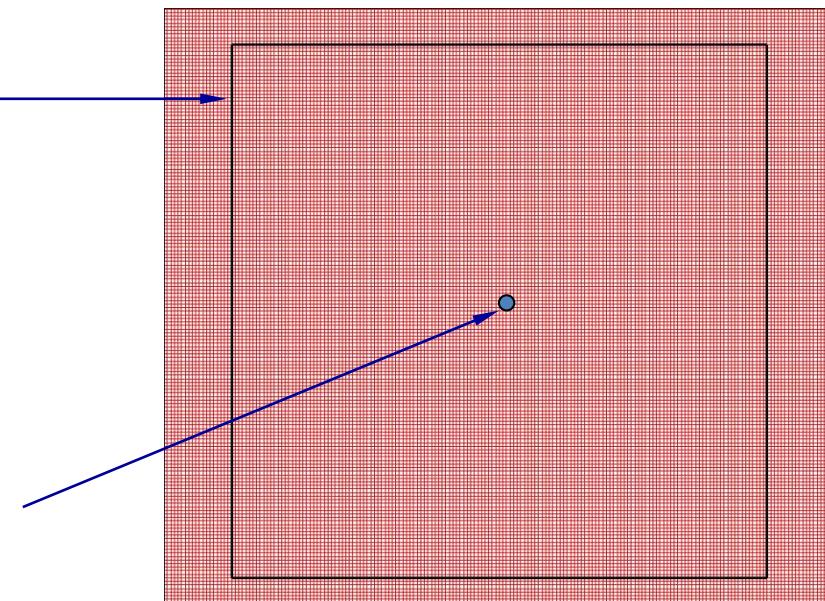
Занижение C_f на ~10%
предположительно связано
со слишком близким
расположением “серой”
области $y^+ \sim 100-200$ к
окончанию
логарифмического профиля
 $y^+ \sim 300-500$



- Расчетная область - параллелепипед с периодичностью по третьему направлению, перпендикулярному плоскости рисунка
- Сетка с квадратными равномерными ячейками во внутренней области (квадрат $2 \text{ м} \times 2 \text{ м}$) и с нарастанием размера во внешней части области



- Поверхность Кирхгофа - квадрат со стороной 0.75 м
- Параметры набегающего потока: $P = 101325 \text{ Па}$, $\rho_0 = 1.225 \text{ кг/м}^3$, $M = 0.2$



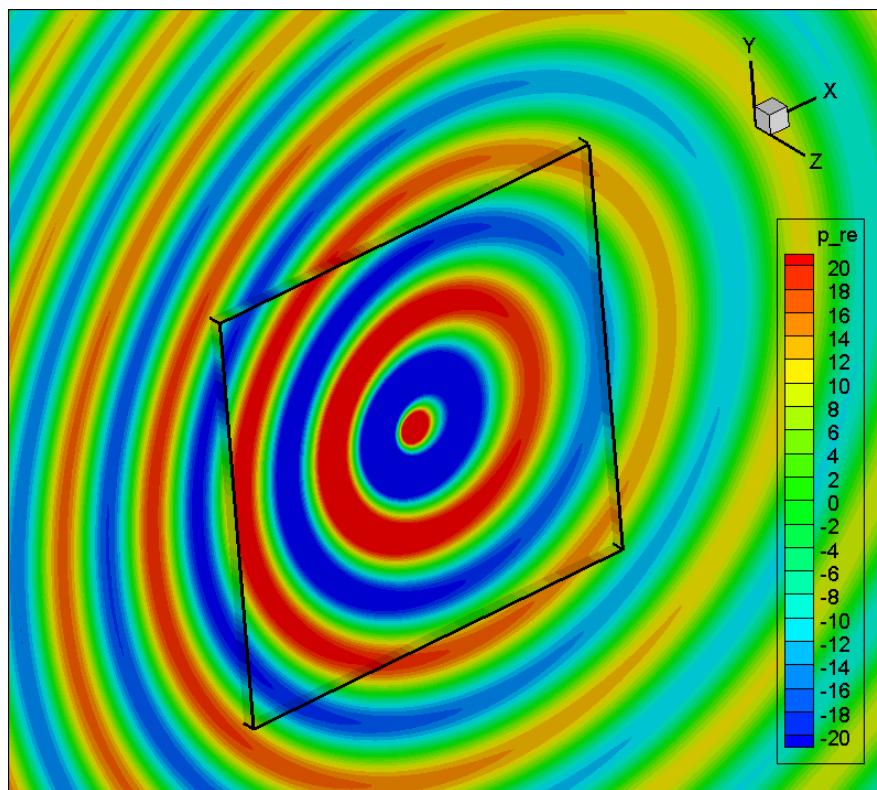
Двумерный источник

Расчет 1

Частота 1500 Гц

Количество ячеек на длину волны ~36

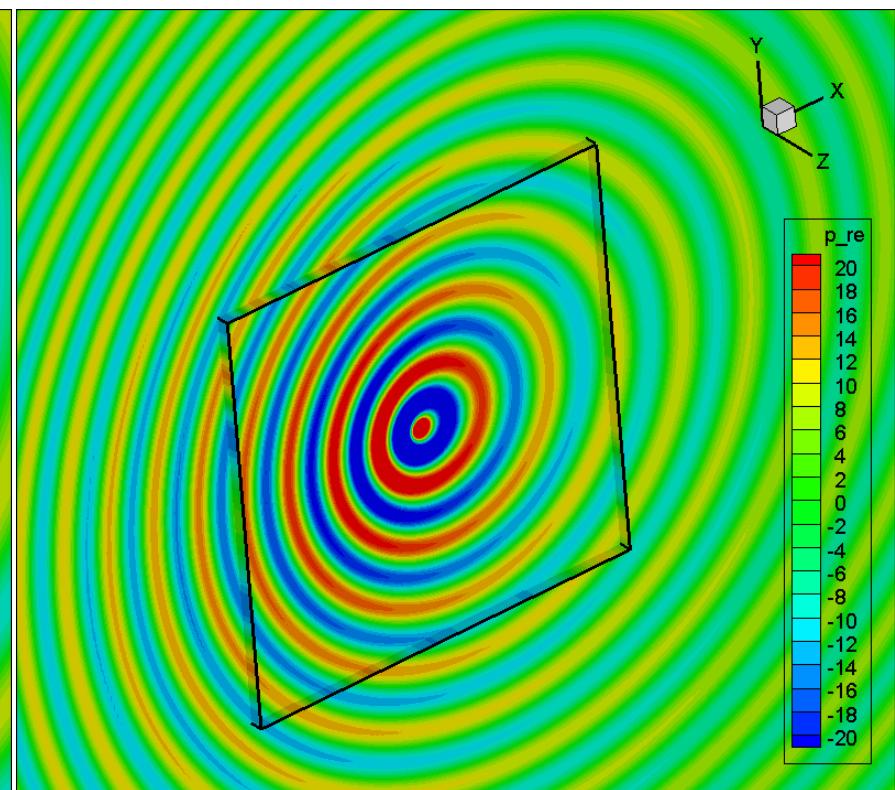
Удаленность от поверхности 2-2.8 длин волн

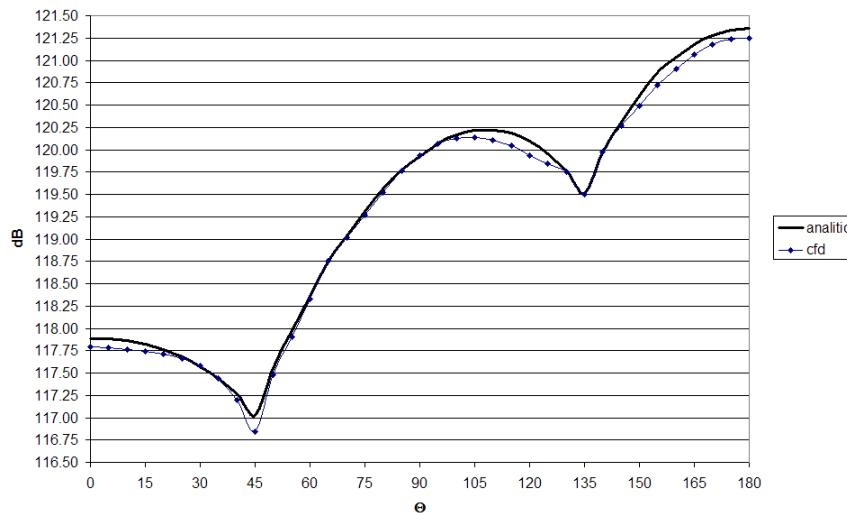
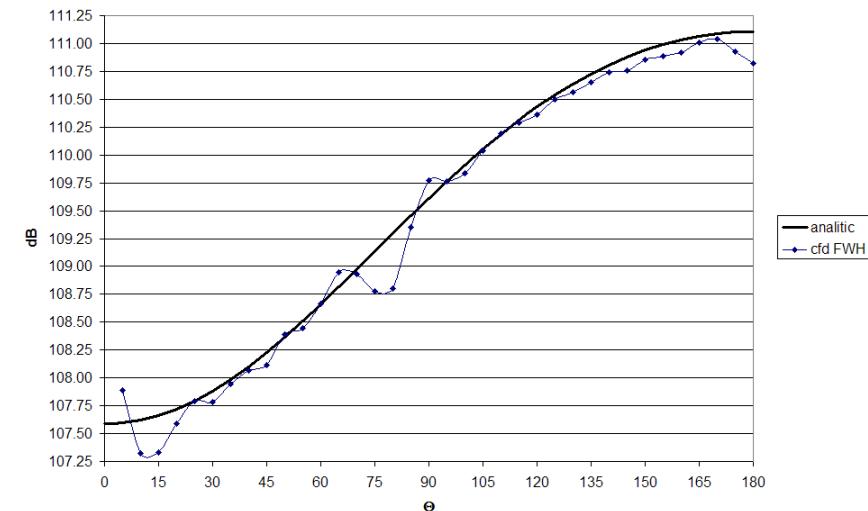
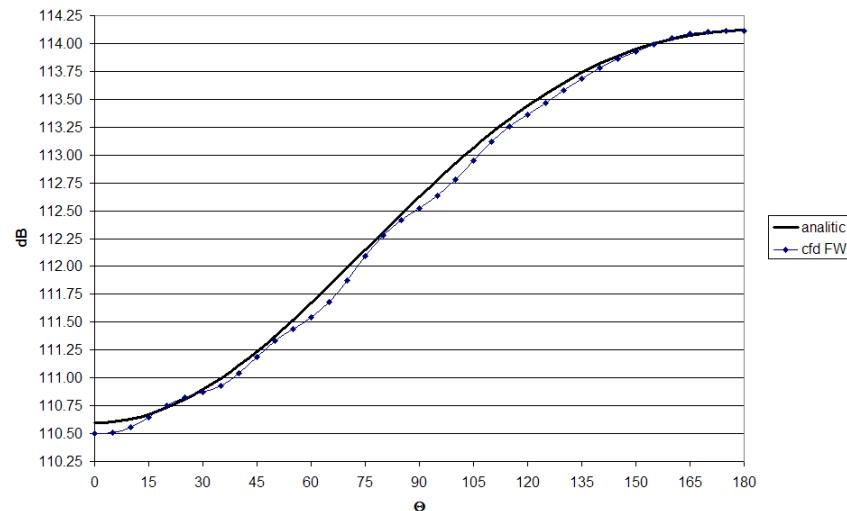
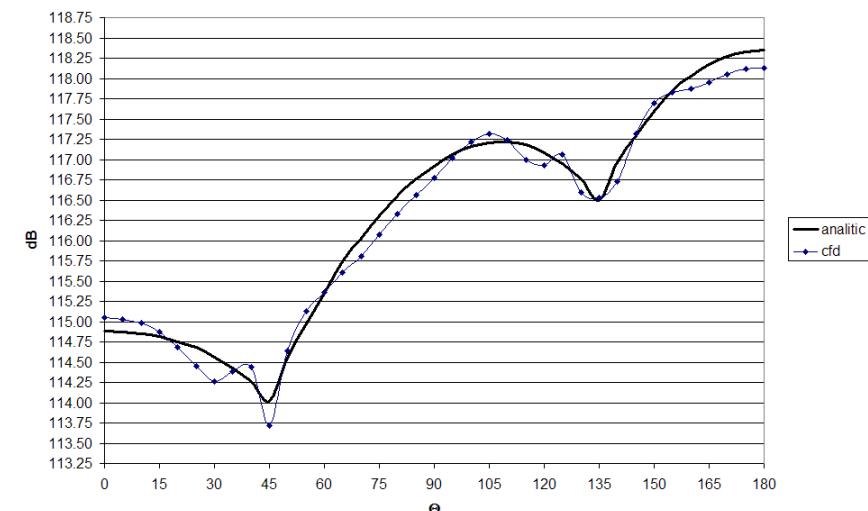
Расчет 2

Частота 3000 Гц

Количество ячеек на длину волны ~18

Удаленность от поверхности 4-5.7 длин волн



Расчет 1: ошибка 0.2 dBРасчет 2: ошибка 0.5 dB

Расчет 1:

Частота 1500 Гц

Ячеек на длину

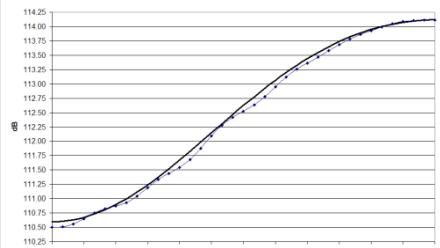
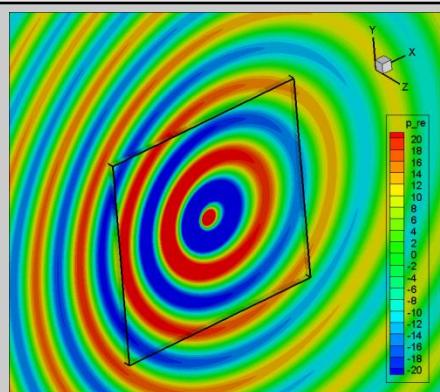
волны ~36

Удаленность

поверхности 2-2.8

длин волн

Ошибка 0.2 dB

Расчет 2:

Частота 3000 Гц

Ячеек на длину

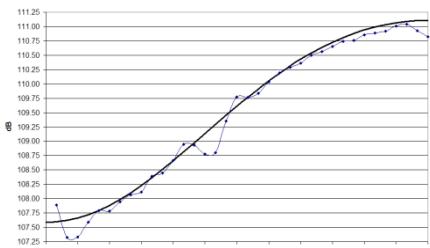
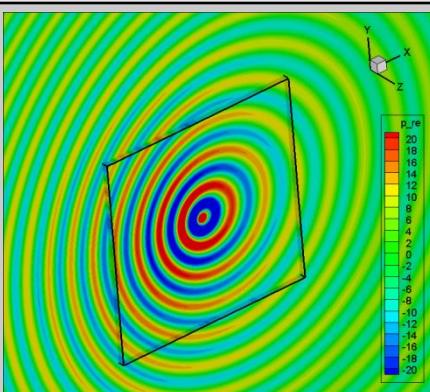
волны ~18

Удаленность

поверхности 4-5.7

длин волн

Ошибка 0.5 dB

Расчет 3:

Частота 4500 Гц

Ячеек на длину

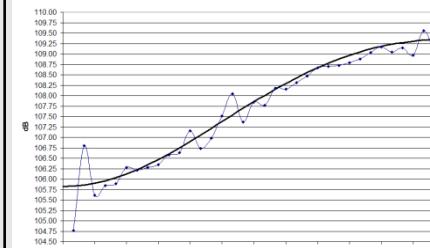
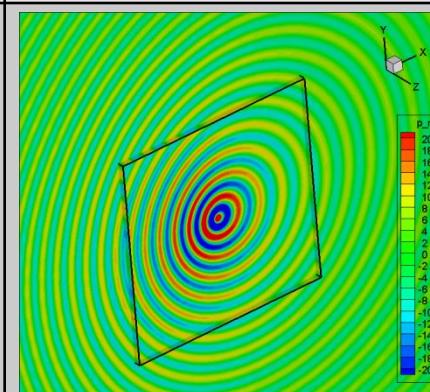
волны ~12

Удаленность

поверхности 6-8.5

длин волн

Ошибка 1.0 dB

Расчет 4:

Частота 6000 Гц

Ячеек на длину

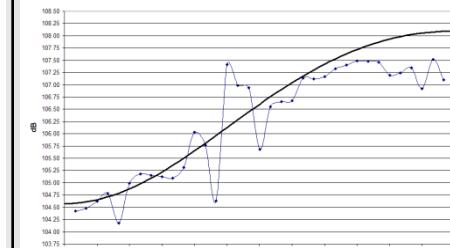
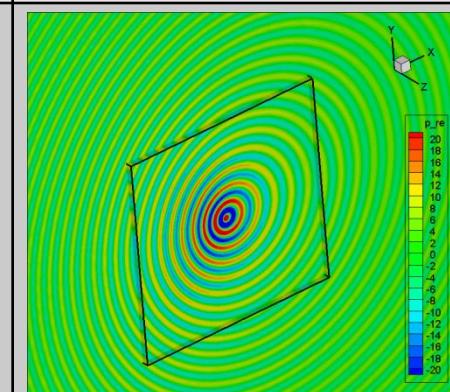
волны ~9

Удаленность

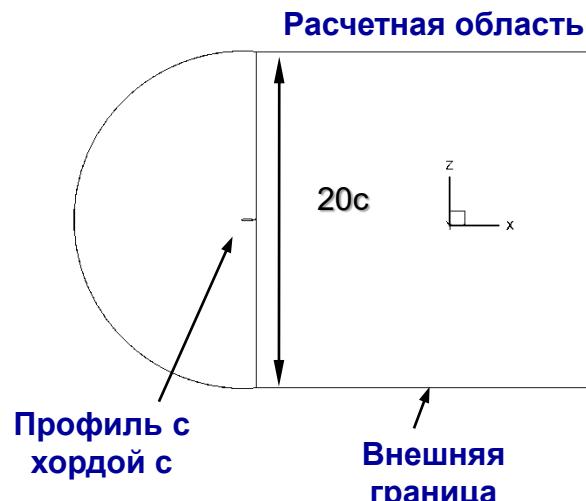
поверхности 8-11.3

длин волн

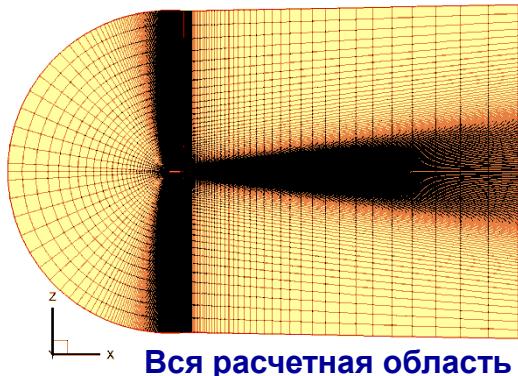
Ошибка 1.5 dB



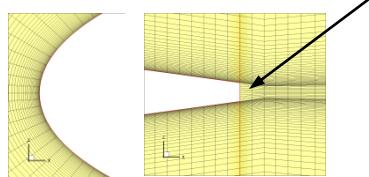
- Течение в следе за профилем NACA012
- Шум задней кромки профиля NACA012



Сетка: ~17 млн. ячеек



Вся расчетная область



Окрестность носика

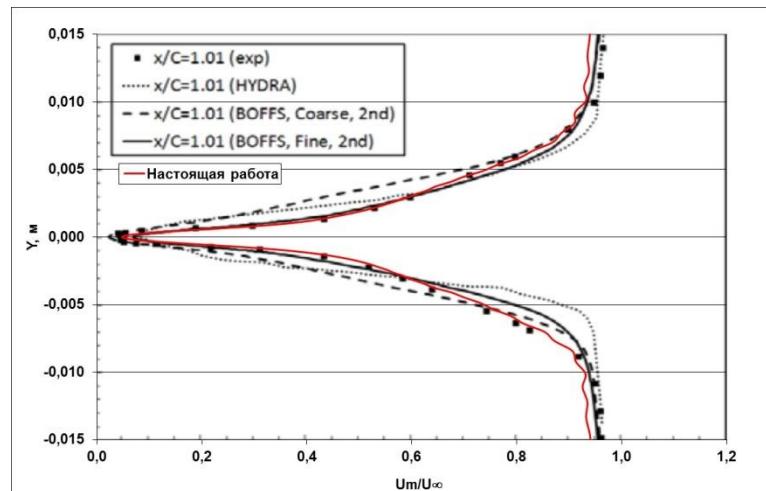
Окрестность задней кромки

Хорда: $c=0.03$ м

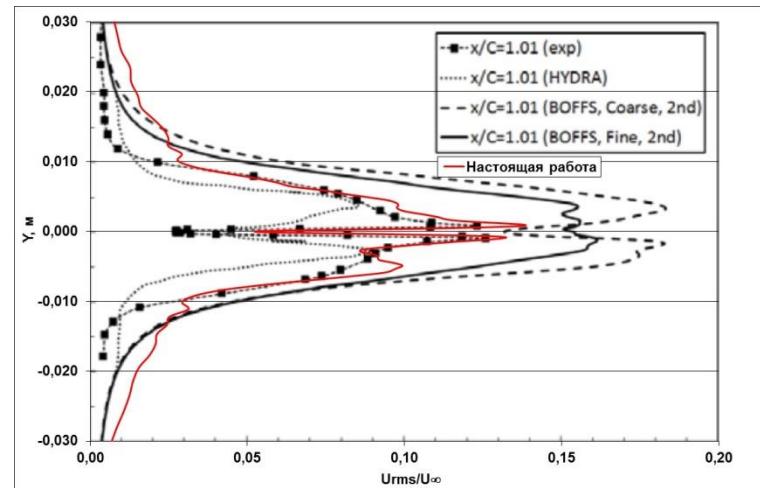
Режимные параметры: $U=100$ м/с, $p=101325$ Па, $T=288.15$ К

Число Рейнольдса по хорде $Re_c \sim 2 \cdot 10^5$

Параметры потока в следе за профилем при $x/c=1.01$

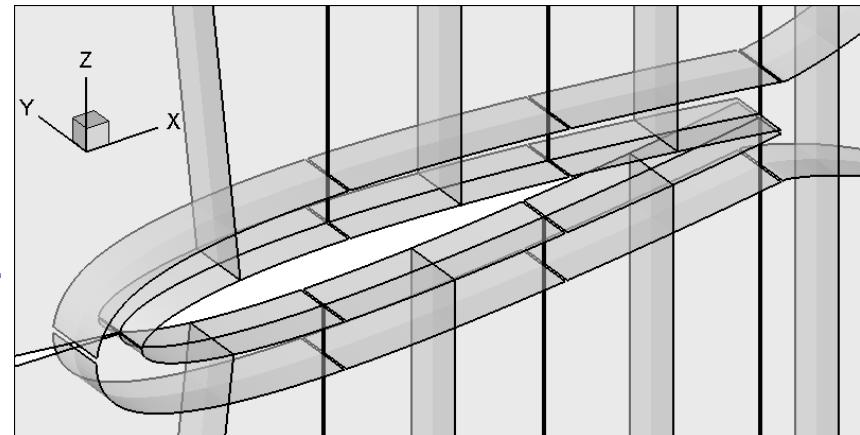
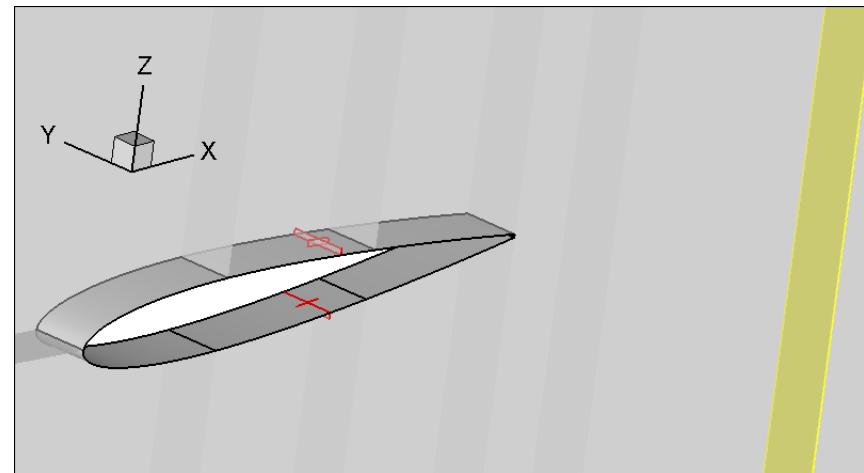


Средняя продольная скорость

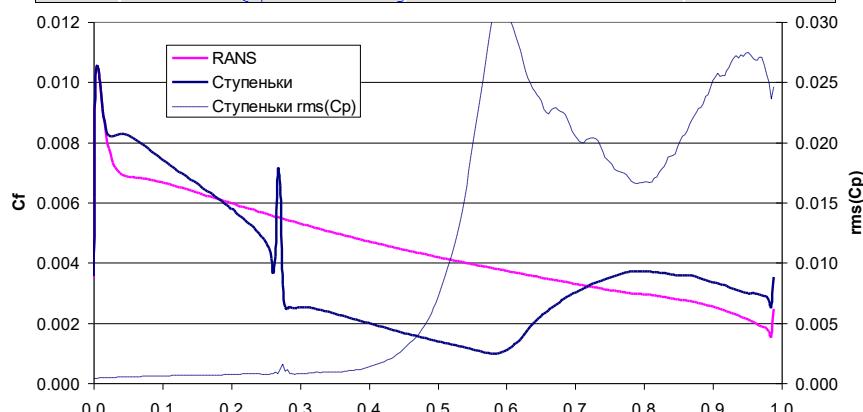
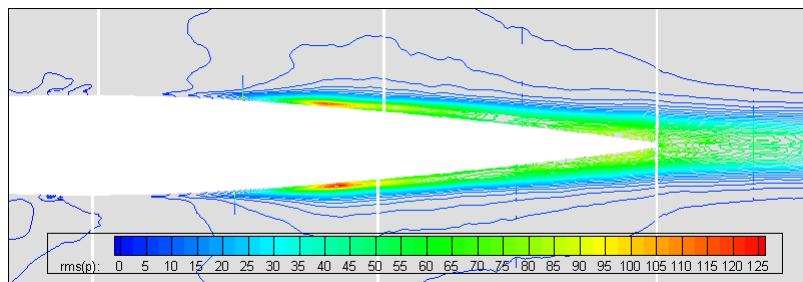
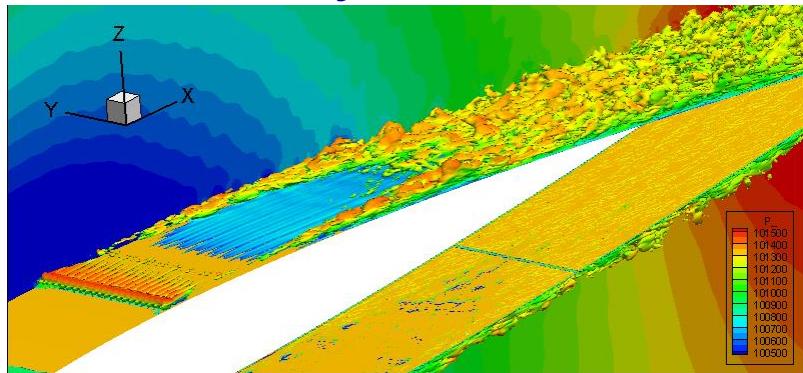


Среднеквадратичные пульсации продольной скорости

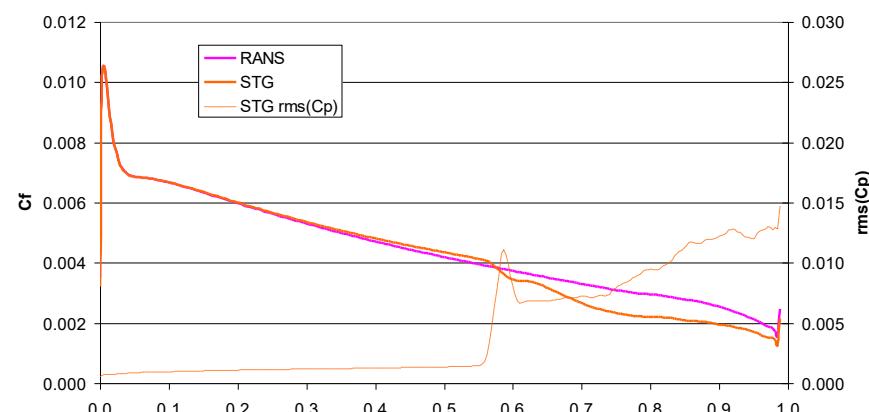
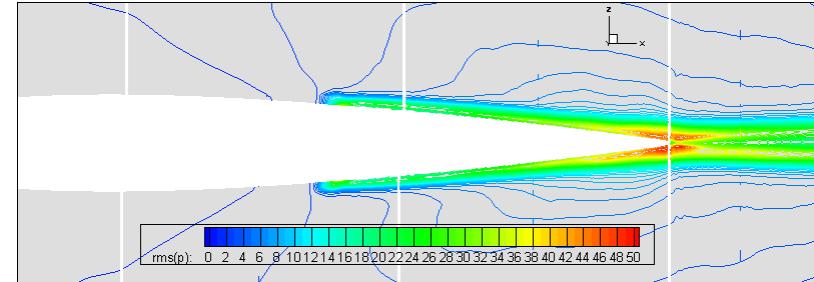
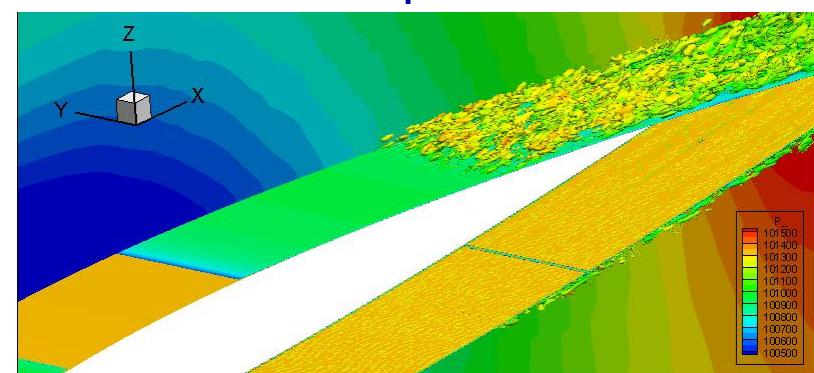
- Расчетная область – слой в 10% хорды по размаху, с условиями периодичности
- $Re_c=10^6$
- Параметры сетки в пограничном слое и метод идентичны используемым для канала при $Re_{H/2}=2400$ и пластины
- Сетка $\sim 6 \cdot 10^6$ ячеек
- На $\sim 55\%$ хорды установлен RANS-LES интерфейс и STG генераторы, либо ступеньки на 30% хорды
- Примерно в 40% хорды за профилем, где сетка перестаёт подходить для LES устанавливается или не устанавливался демпфер
- Набегающий поток (как для пластины): $P=101325$ Па, $Ro=1.225$ кг/м³, $M=0.20$
- На среднем по размаху сечении, стенке и поверхности, отстоящей на $\sim 8\%$ хорды от стенки, в процессе расчета собирались коэффициенты Фурье от параметров течения и комплексов, используемых в методе FWH



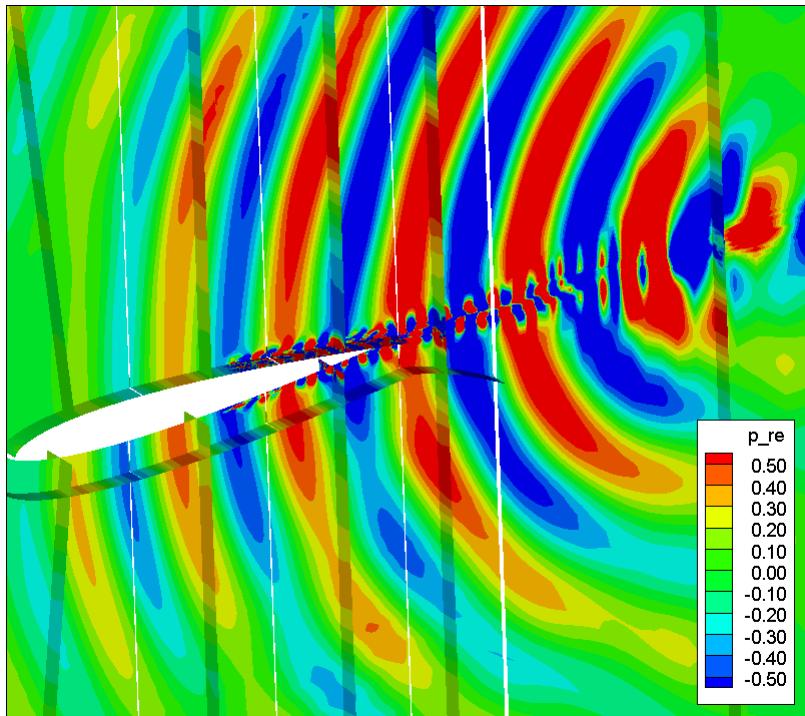
Неудачная турбулизация, создаваемая
ступеньками



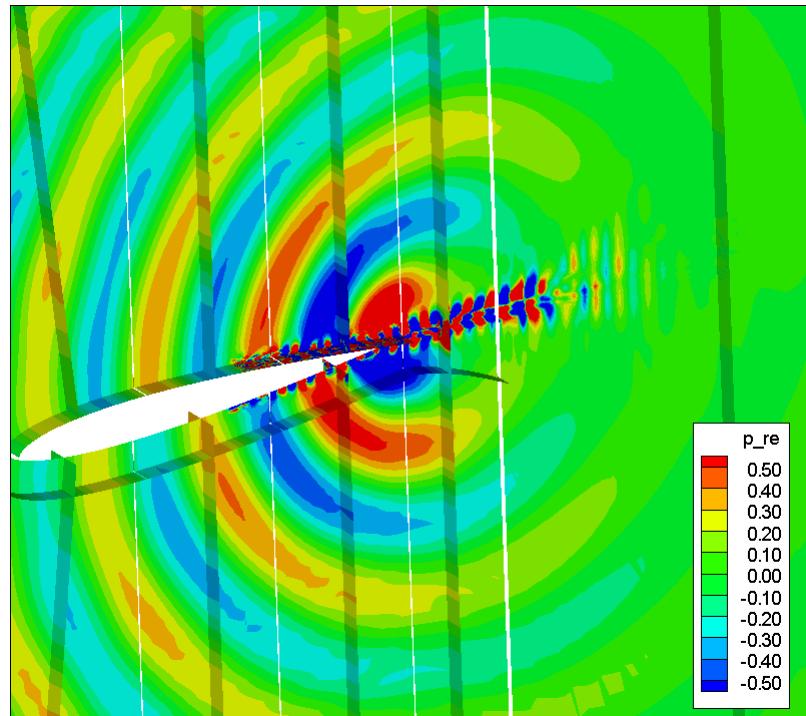
Турбулизация, создаваемая с
помощью STG



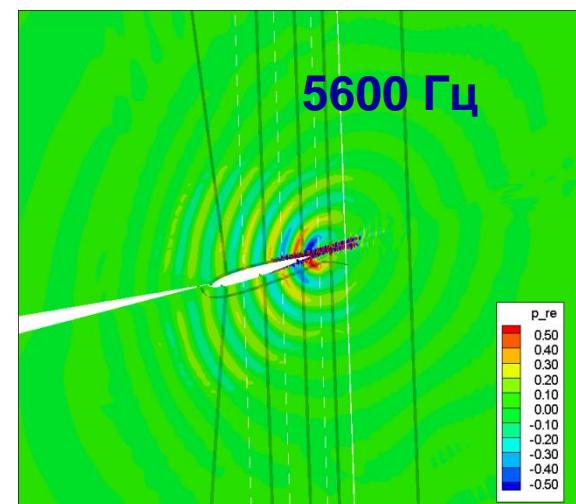
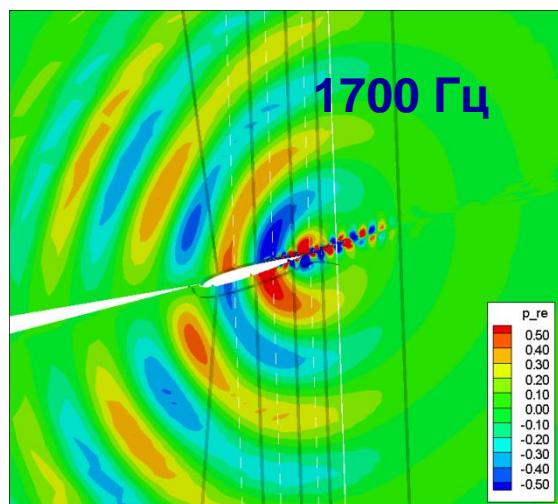
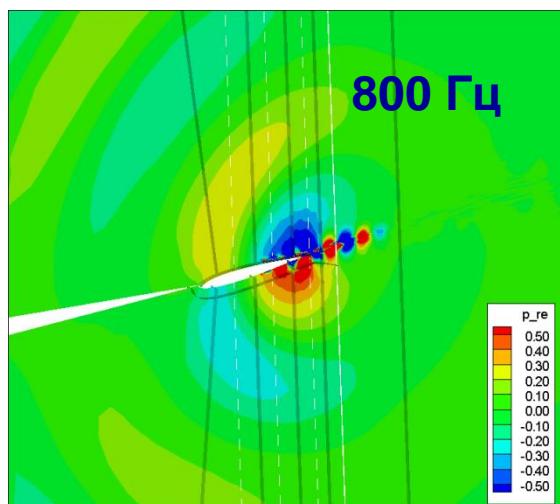
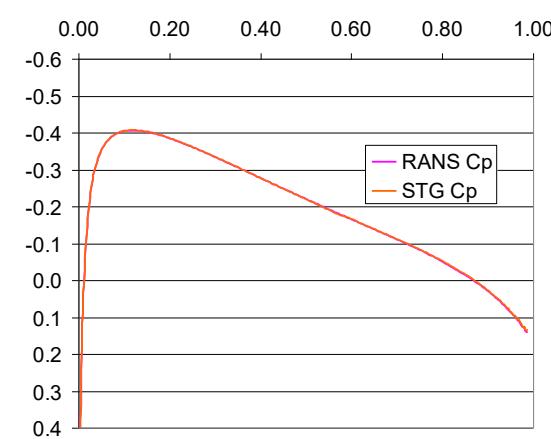
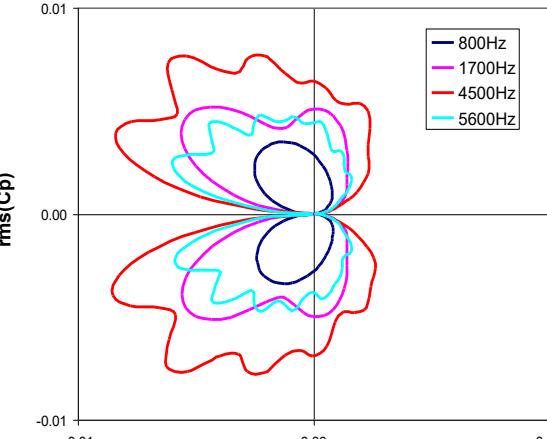
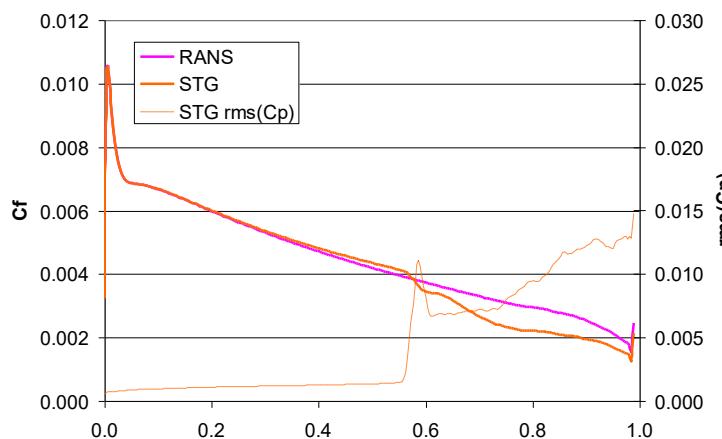
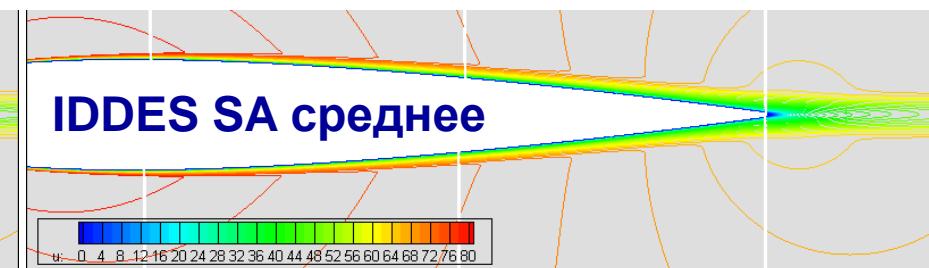
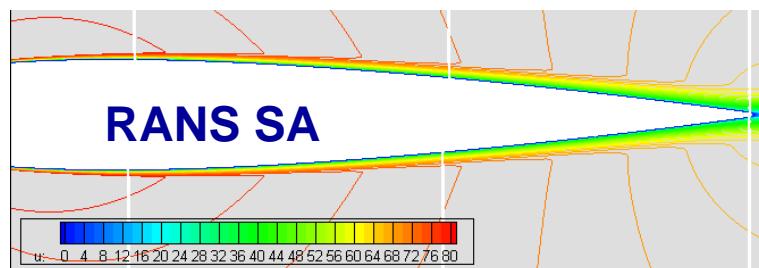
Поле $\text{Real}(p)$ с частотой 4500 Гц - область максимального расхождения расчетного спектра с экспериментальным

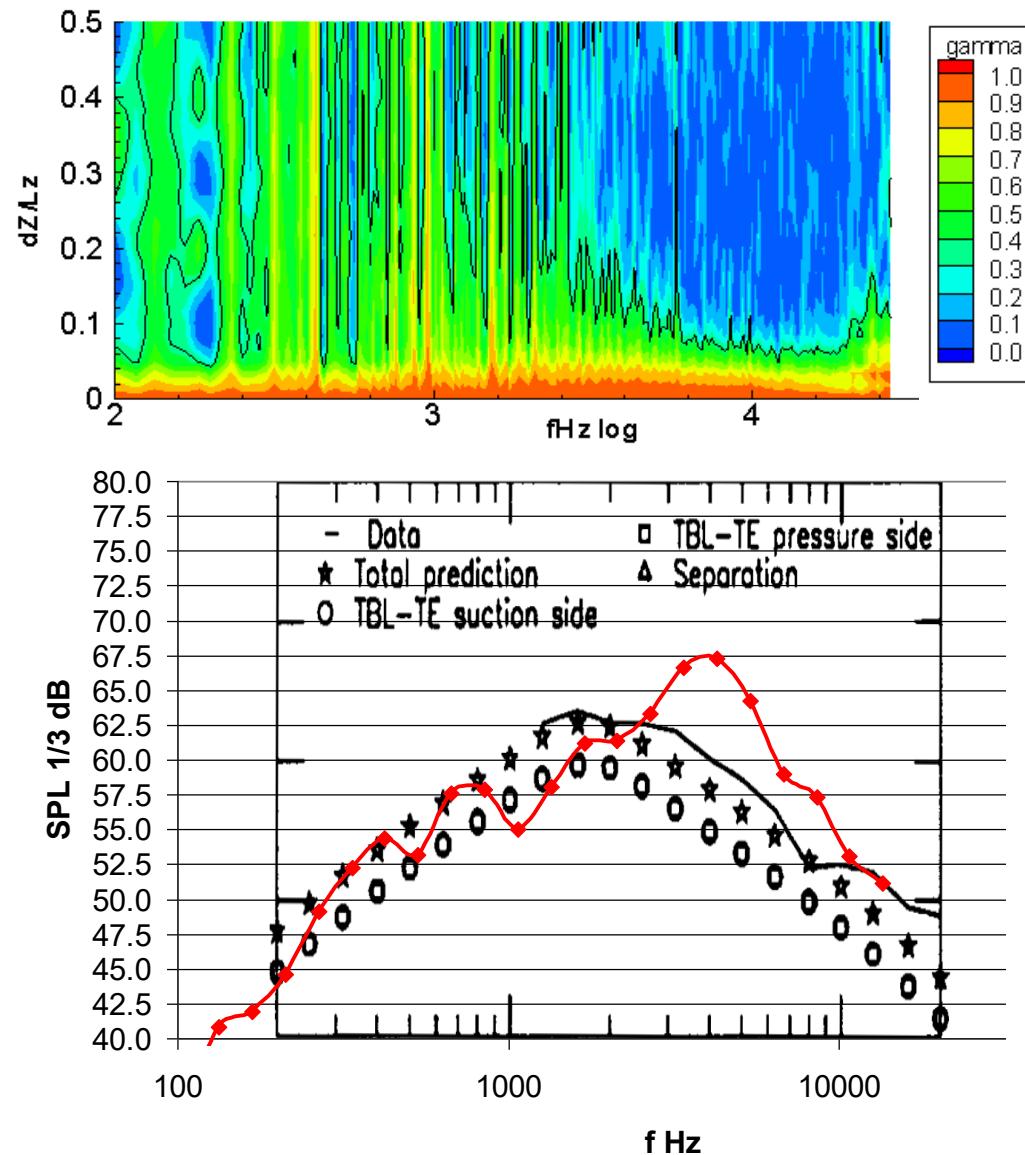


В случае отсутствия демпфера
наиболее интенсивным источником
шума становится место
перестроения решения из-за
загрубления сетки



Слишком близко поставленный
демпфер также может влиять на
решение и быть причиной ошибки,
что можно проверить при помощи
увеличения зоны мелкой сетки





Размах (ширина)
экспериментальной модели в $N=22$
раза больше, чем в расчете
В работе

J. H. Seo, K. W. Chang, and Y. J.
Moon

Aerodynamic Noise Prediction for
Long-Span Bodies

предложена поправка от $10\text{LOG}(N)$
до $20\text{LOG}(N)$ в зависимости от
параметра dZ/Lz

В представленном спектре
использовалась поправка
 $10\text{LOG}(N)$
Из анализа карты когерентности
видно, что шум на частотах до 2500
Гц может быть занижен

Для уточнения нужен расчет
профиля с большей шириной
(размахом)

На текущем этапе разработки эффективной расчетной методики, основанной на схеме MP5 и вихреразрешающем методе IDDES, выполнена следующая работа:

- При решении модельных задач о распаде изотропной турбулентности и о течении в плоском периодическом канале выполнена настройка разностной схемы посредством выбора локальных параметров гибридности
- При решении задачи о пограничном слое на пластине реализован генератор синтетической турбулентности, предложенный группой М.Х. Стрельца
- При решении модельной задачи излучения звука плоским источником, для которого имеется аналитическое решение, осуществлена верификация созданной реализации метода FWH и проверены свойства используемой схемы по распространению акустических возмущений с разными длинами волн
- Выполнены расчеты обтекания профилей NACA0012 дозвуковым однородным потоком воздуха без угла атаки с целью определения шума задней кромки (хорда 0.21 м, скорость 70 м/с, число Рейнольдса по хорде 10^6) и течения в следе за профилем (хорда 0.03 м, скорость натекания 100 м/с, число Рейнольдса по хорде $2 \cdot 10^6$). Полученные результаты свидетельствуют о том, что:
 - расчетный и экспериментальный спектры в низкочастотной части (слева от экспериментального максимума) хорошо совпадают между собой, однако в высокочастотной части (справа от этого максимума) расчет завышает уровень шума, при этом максимальное отличие в одной точке достигает 8 SPL dB, а в остальных точках оно не превосходит 5 SPL dB, что, на текущем этапе развития расчетной методики, следует признать удовлетворительным результатом
 - в следе на расстоянии 0.01 хорды от задней кромки профиля расчетные распределения (по нормали к хорде) осредненной продольной скорости и ее пульсаций хорошо совпадают с экспериментальными данными

- Авторы благодарят сотрудника кафедры "Гидроаэродинамика, горение и теплообмен" Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ) А.В. Гарбарука за проведенный курс обучения, предоставленные учебные материалы и консультации в процессе выполнения работы
- Авторы подчеркивают, что работа выполнена в рамках общих подходов к моделированию турбулентности, развиваемых школой М.Х. Стрельца

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ