

Обтекание крыловых профилей NACA0012 и NACA0021

Эксперимент

- Swalwell, K., Sheridan, J., Melbourne, W., “Frequency Analysis of Surface Pressures on an Airfoil After Stall”, AIAA-2003-3416.

Крыловые профили семейства NASA 4-digits:

$$\frac{y}{c} = \frac{t}{0.2} \left(0.2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.1260 \frac{x}{c} - 0.3516 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0.2854 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right)$$

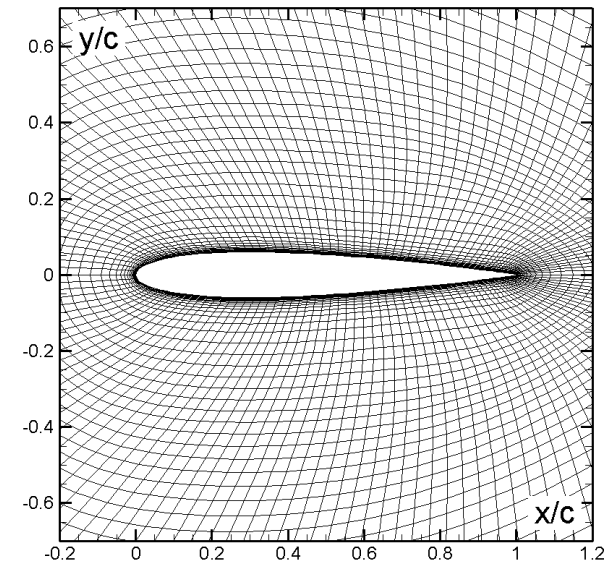
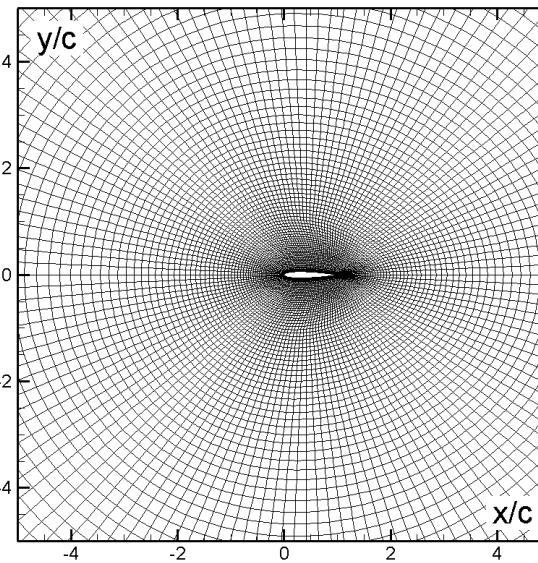
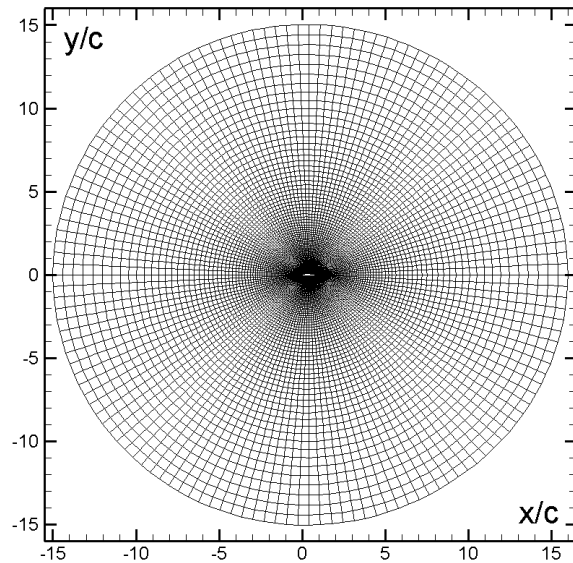
Условия эксперимента

- $Re_c = 2.7 \cdot 10^5$
- $M_\infty = 0.11$
- Рабочий газ – воздух

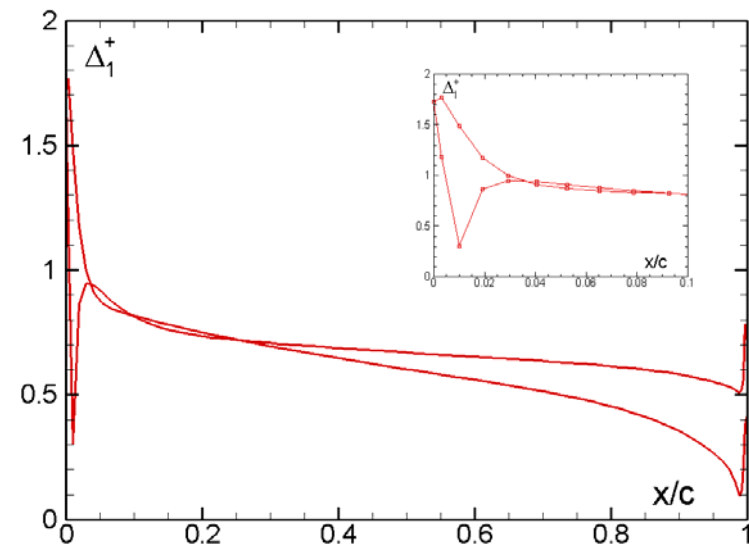
Наиболее интересные характеристики

- Распределение давления по поверхности профиля
- Коэффициенты сопротивления и подъемной силы
- Спектры коэффициентов сопротивления и подъемной силы

Постановка задачи: расчетная область и сетка



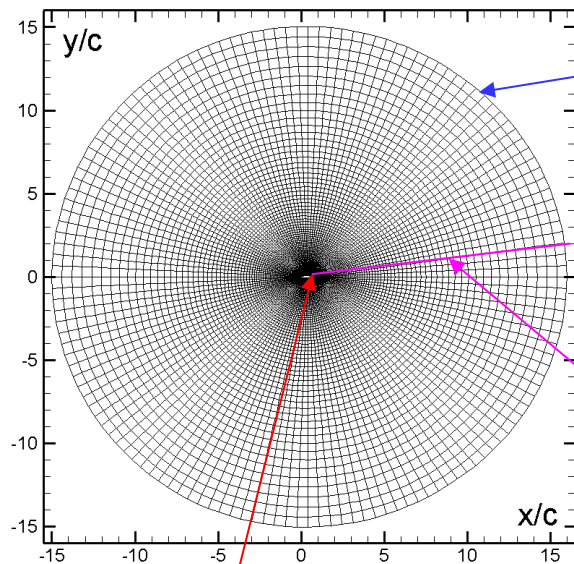
- Расчетная область – $R \approx 15c$
- Расчетная сетка – 142×101
- $\Delta y_1 = 5.0 \cdot 10^{-5}$ (почти везде $\Delta y_1^+ < 1.0$)
- Для трехмерных расчетов
 - $L_z = c$
 - $\Delta z = 0.03$



Постановка задачи:

граничные условия

- Задача решается в приближении несжимаемой жидкости
 - Это оправдано, поскольку $M \approx 0.1$
- Для модели SA значение $\tilde{\nu}$ пересчитывается из заданного значения турбулентной вязкости



Твердая стенка: условия прилипания

$$u = 0, v = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0, v_t = 0, K_t = 0, \omega_t = 10 \frac{6\nu}{\beta_1 \Delta y_1^2}$$

Свободная граница:
автоматическое переключение

Входная
граница

$$u = U_0 \cdot \cos(\alpha),$$

$$v = U_0 \cdot \sin(\alpha),$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0,$$

$$v_t = v,$$

$$K_t = 3.7 \cdot 10^{-5} U_0^2,$$

$$\omega_t = \frac{K_t}{v_t}$$

Выходная
граница

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0,$$

$$p = P_0,$$

$$\frac{\partial v_t}{\partial n} = \frac{\partial K_t}{\partial n} = \frac{\partial \omega_t}{\partial n} = 0$$

Периодические ГУ

Постановка задачи:

комментарии к граничным условиям

- Входная граница

- ГУ соответствуют высокому уровню турбулентности (полностью турбулентный режим обтекания)
- Размер расчетной области должен быть достаточно большим, иначе искажается поле давления
- Возможно использование «характеристических» ГУ

- Периодические ГУ

- Приводят к потере порядка точности схемы

- Периодические ГУ по z (для трехмерных расчетов)

- Размер расчетной области влияет на решение
 - Минимальный размер $L_z=1$
- На границе происходит потеря порядка точности

Постановка задачи:

начальное приближение и вычислительные параметры

- Начальное приближение RANS: однородный поток
 - Программа работает гораздо устойчивей, если плавно уменьшать скорость к стенке (синус или парабола)
- Число Куранта $CFL=5$
- На первых итерациях необходимо использовать специальные методы для предотвращения развала
 - В HTC коде используется пониженное число Куранта
- В областях сгущения сетки необходимо локально увеличивать шаг по псевдовремени (число Куранта)
 - В HTC коде ограничивается шаг по псевдовремени снизу

Постановка задачи:

численная схема для RANS

- Невязкие потоки в уравнении движения
 - Противопоточная схема Роджерса-Квака третьего порядка точности
- Невязкие потоки в уравнениях переноса турбулентных характеристик
 - Противопоточная схема первого порядка точности
- Вязкие потоки
 - Симметричные разности второго порядка точности.

Постановка задачи:

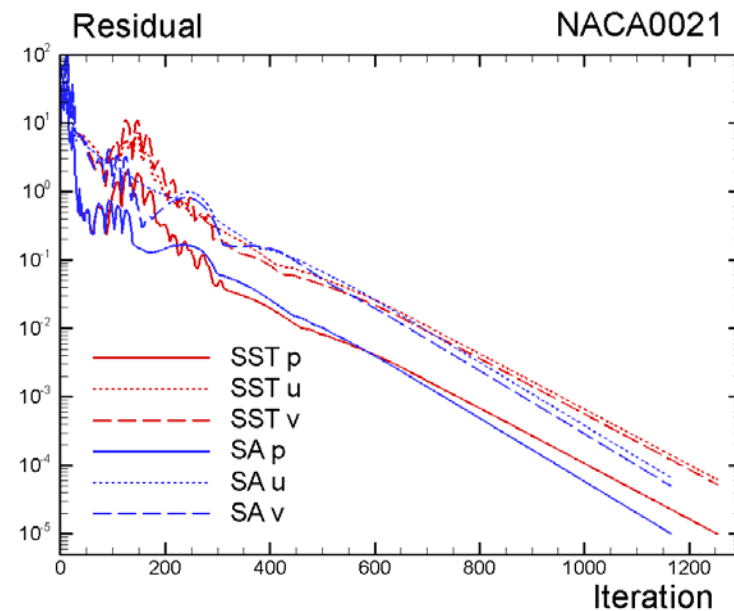
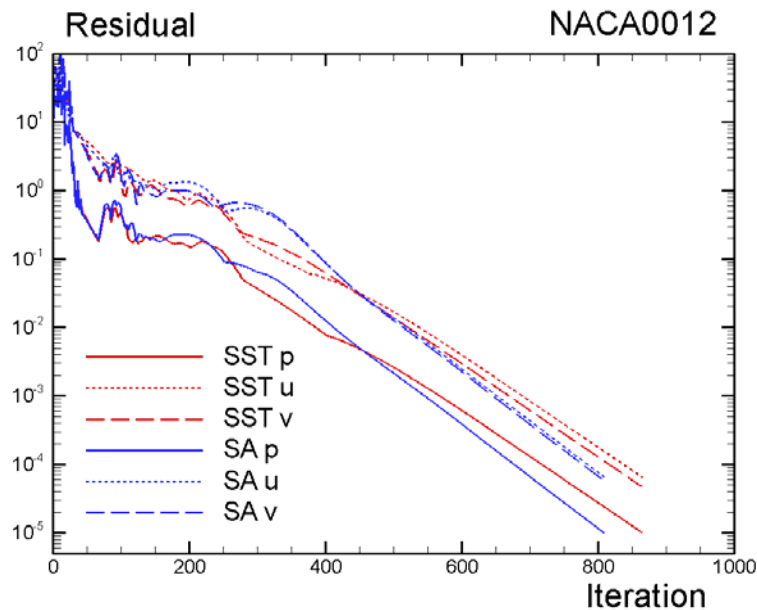
особенности расчета методом DDES

- Невязкие потоки в уравнении движения
 - Гибридная схема Роджерса-Квака («взвесь» противопоточной схемы третьего порядка с центральноразностной схемой четвертого порядка точности)
- $\Delta t = 0.03 \cdot c / U_0$
- 10-15 внутренних итераций на шаг по времени
- Начальное приближение
 - RANS решение при $\alpha = 3^\circ$
 - однородный поток при $\alpha = 60^\circ$

Результаты $\alpha=3^\circ$:

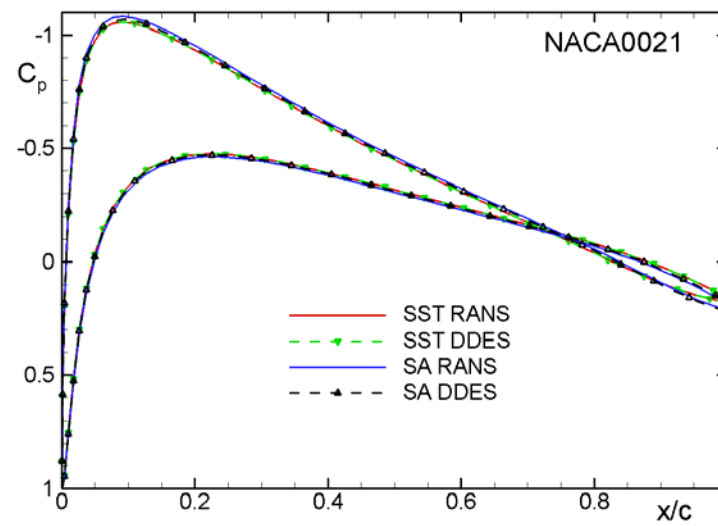
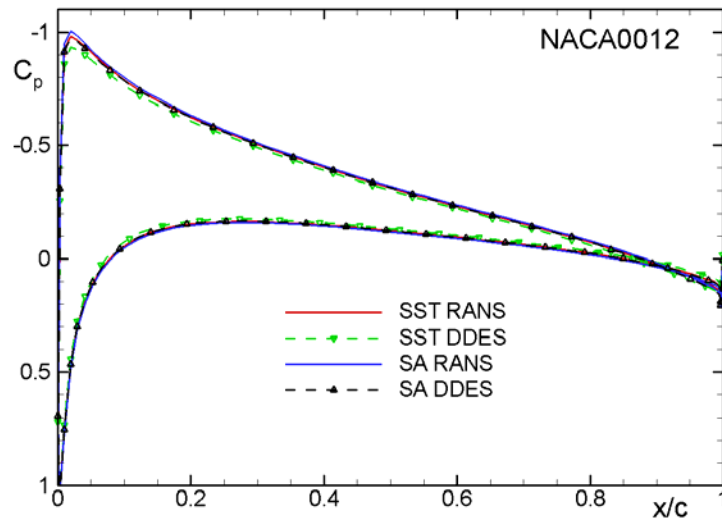
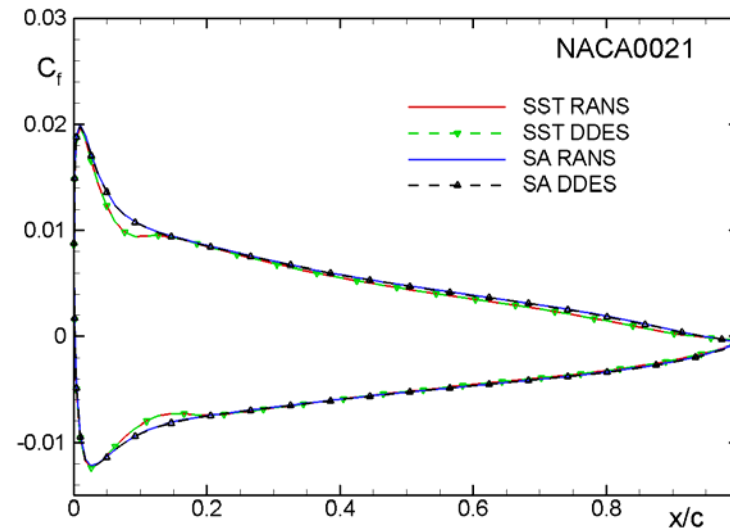
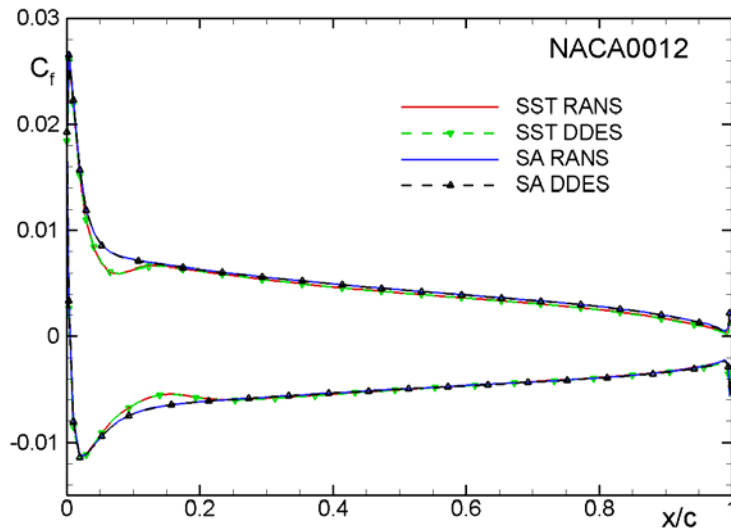
СХОДИМОСТЬ

- Для достижения невязки уравнения неразрывности 10^{-5} необходимо около 1000 итераций

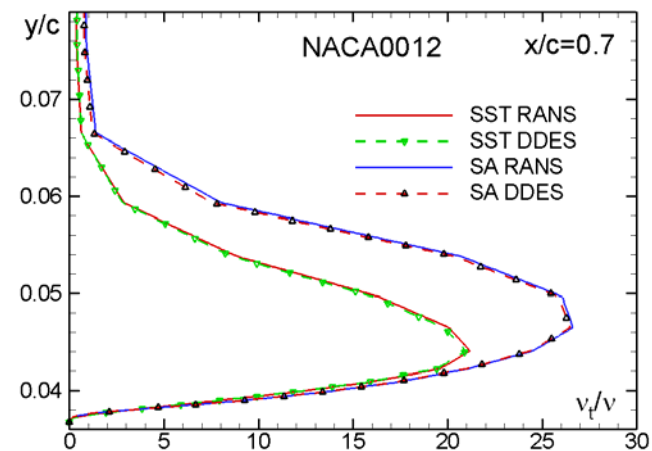
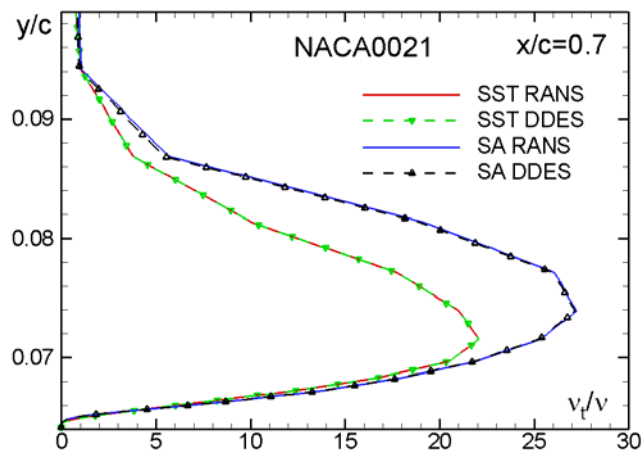
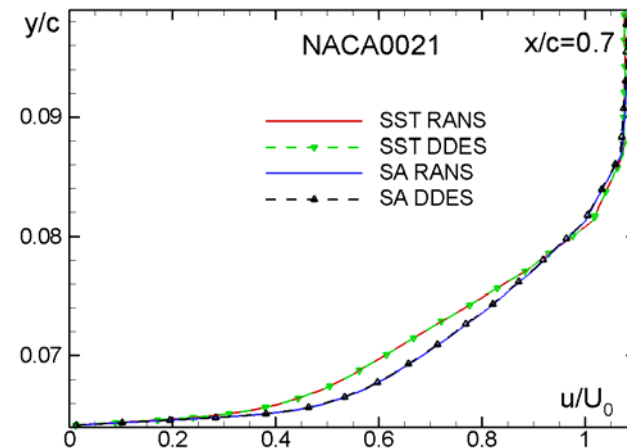
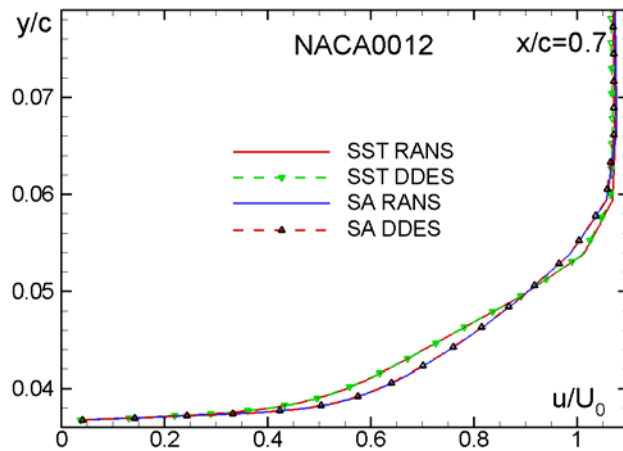


- Решение по методу DDES стационарное и совпадает с RANS решением с точностью до различий в схеме

Результаты $\alpha=3^\circ$: коэффициенты трения и давления



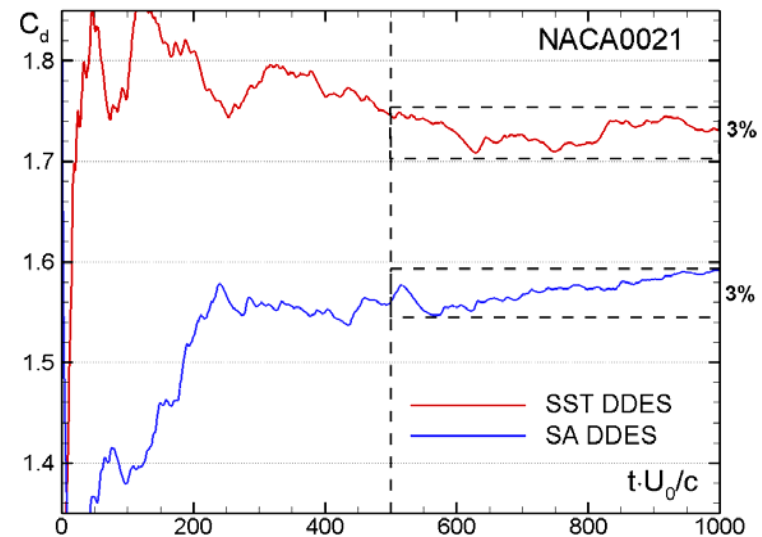
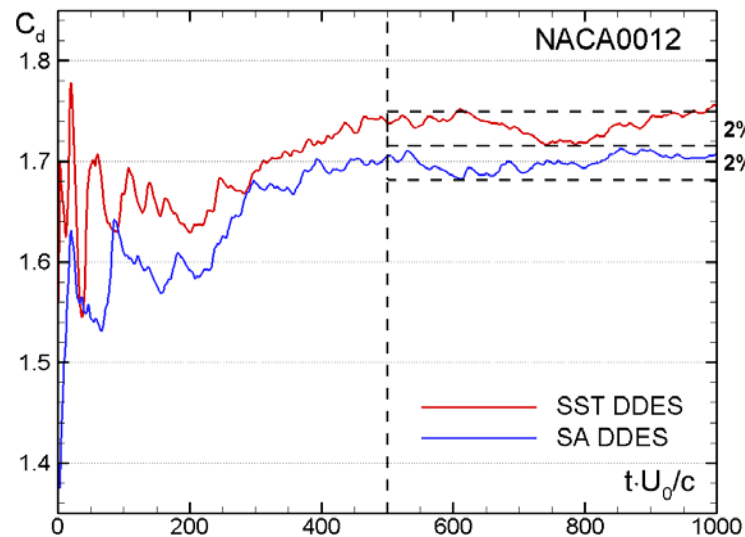
Результаты $\alpha=3^\circ$: профили скорости и турбулентной вязкости



Результаты $\alpha=60^\circ$:

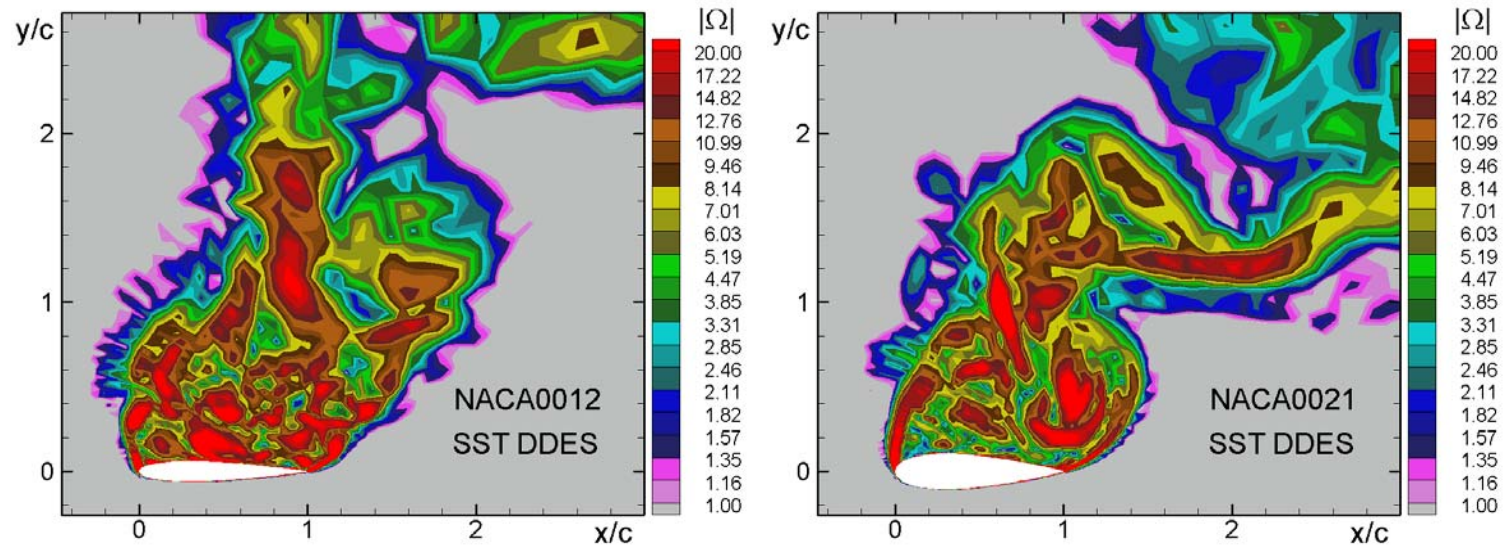
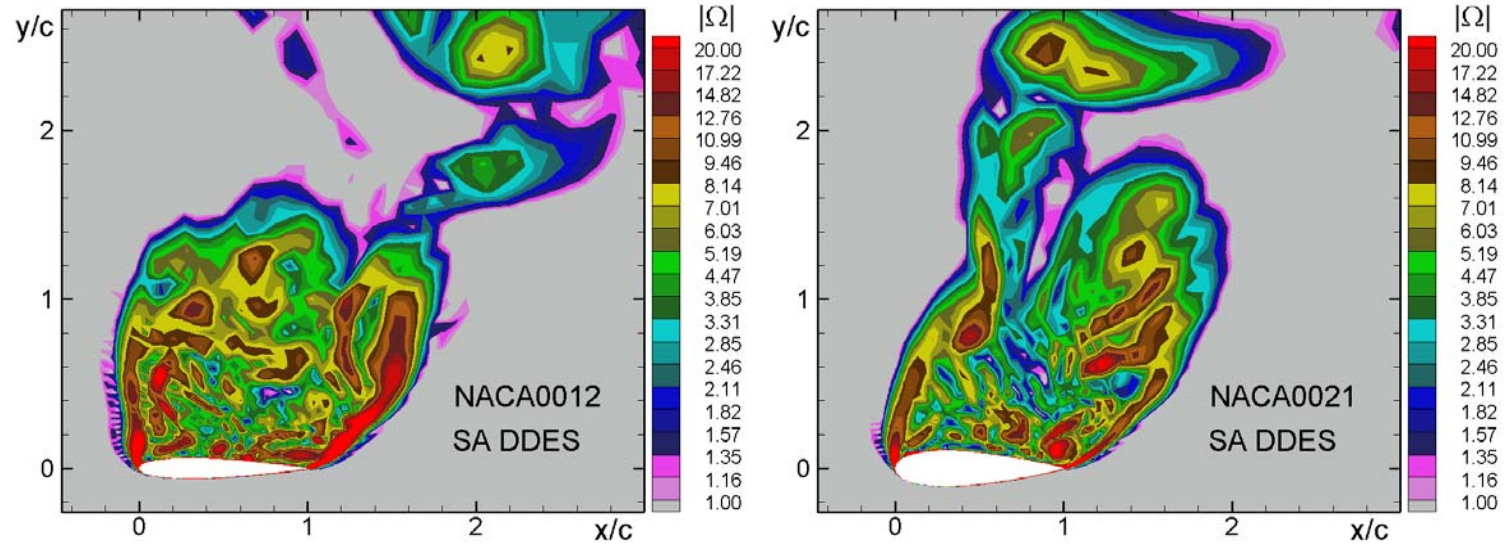
сходимость и накопление статистики

- RANS
 - Практически невозможно получить сошедшееся решение
- DDES
 - Начальный период «выхода на режим» $T_{init} = 60c / U_0$
 - Статистическая обработка $T_{aver} = 1000c / U_0$

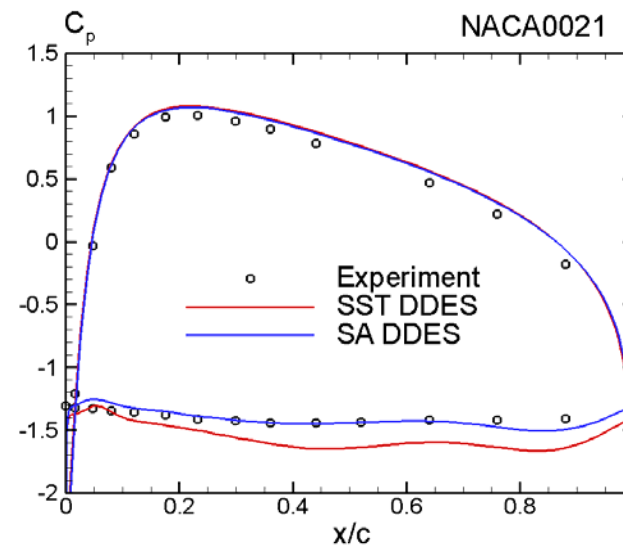
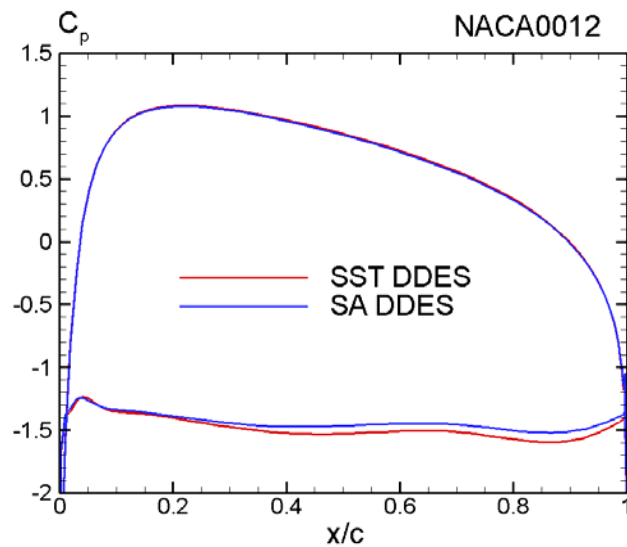
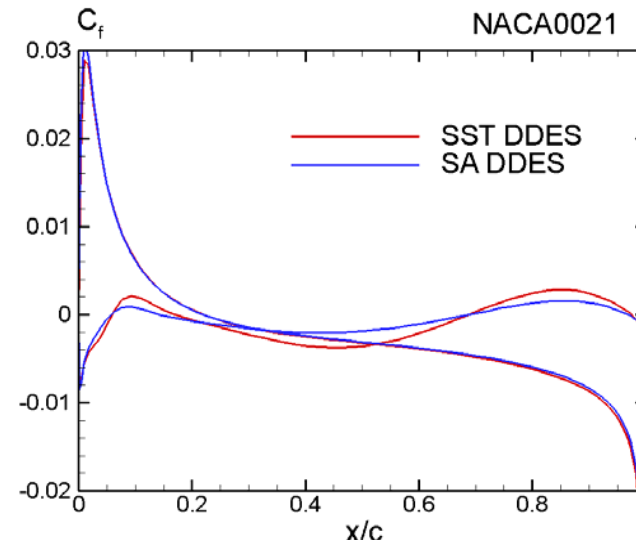
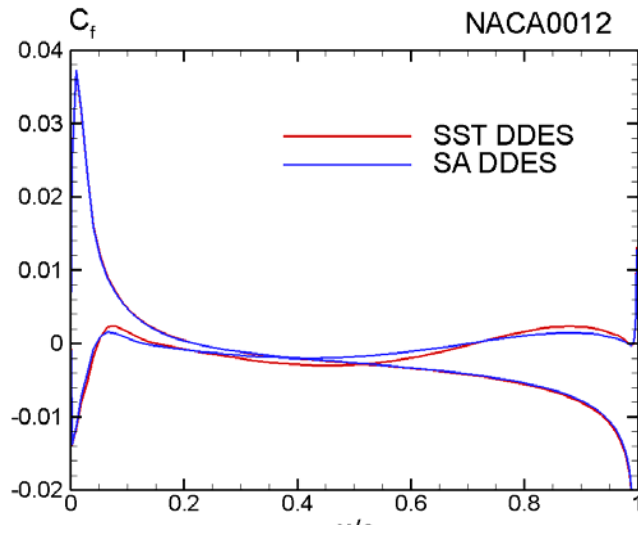


Изменение коэффициента сопротивления при увеличении времени осреднения от 500 до 1000 составляет 2-3%.

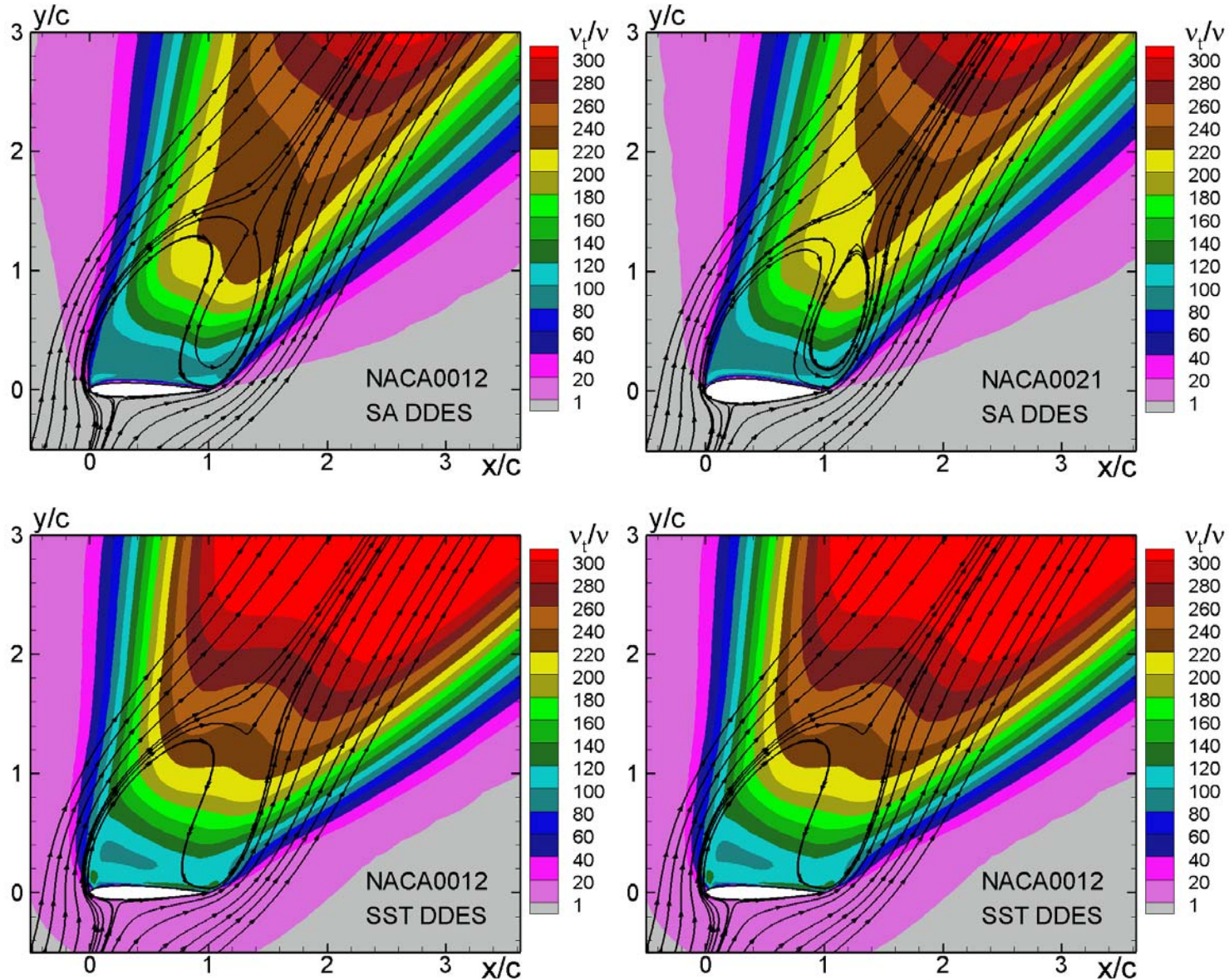
Результаты $\alpha=60^\circ$: поля завихренности



Результаты $\alpha=60^\circ$: коэффициенты трения и сопротивления



Результаты $\alpha=60^\circ$: поля турбулентной вязкости и линии тока



Результаты $\alpha=60^\circ$:

спектры коэффициентов сопротивления и подъемной силы

