

Турбулентный пограничный слой на плоской пластине

Эксперимент

- Wieghardt, K., Tillmann, W., “On the turbulent friction layer for rising pressure”, NASA TM-1314, 1951.
- Данные доступны в Стэнфордской базе данных (<http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/JFE/data/JFE/DB96-243/d1/f0612>)
 - Stanford'68: case 1400
 - Stanford'80: case 0612

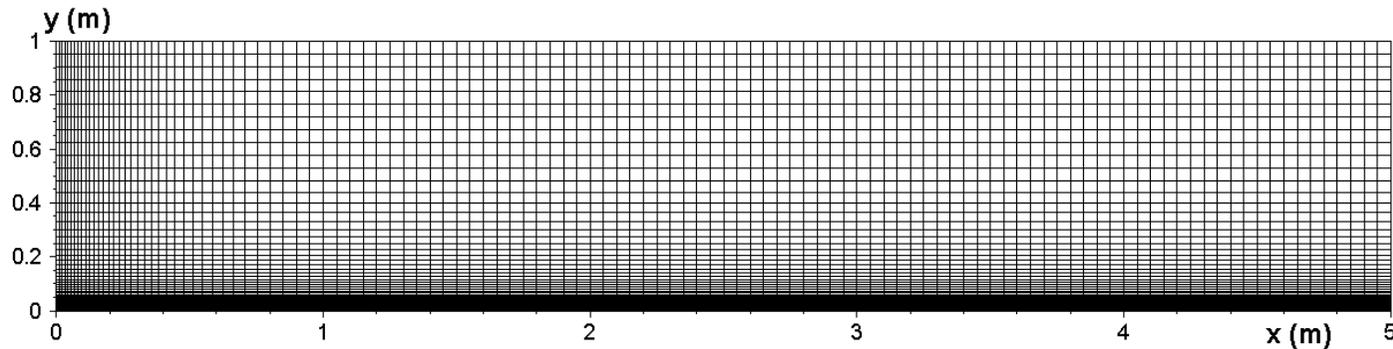
Условия эксперимента

- Длина пластины – 5 м
- Рабочий газ – воздух
- Скорость набегающего потока – 33 м/с
- Кинематическая вязкость – $1.51 \cdot 10^{-5}$ м²/с
- Степень турбулентности набегающего потока < 0.25%

Наиболее интересные характеристики

- Коэффициент трения
- Профили скорости в переменных закона стенки

Постановка задачи: расчетная область и сетка

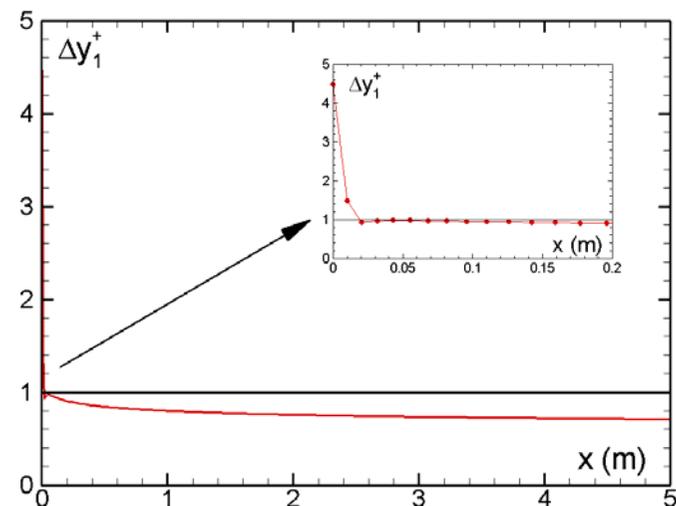


- Расчетная область – 5x1 м
- Расчетная сетка – 118x101
- Шаги сетки определяются геометрической прогрессией с ограничением

$$\Delta x_{\min} = 10^{-2} \text{ м}, \Delta x_{\max} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \Delta x_n / \Delta x_{n-1} = 1.05$$

$$\Delta y_{\min} = 10^{-5} \text{ м}, \Delta y_{\max} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \Delta y_n / \Delta y_{n-1} = 1.05$$

- $\Delta y_1^+ < 1.0$ везде, за исключением первых двух узлов



Постановка задачи: граничные условия

- Задача решается в приближении несжимаемой жидкости
 - Это оправдано, поскольку $M \approx 0.1$
 - Использование $p - P_0$ вместо давления повышает точность
- Для модели SA значение $\tilde{\nu}$ пересчитывается из заданного значения турбулентной вязкости

Входная
граница

$$u = U_0, v = 0,$$

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

$$v_t = 0.2 \cdot \nu,$$

$$K_t = 1.5 \cdot 10^{-4} U_0^2,$$

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

Свободная граница: условия симметрии

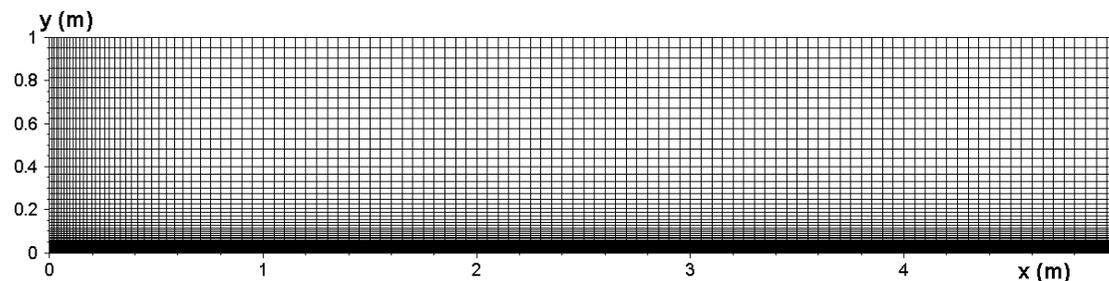
$$v = 0, \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial v_t}{\partial y} = \frac{\partial K_t}{\partial y} = \frac{\partial \omega_t}{\partial y} = 0$$

Выходная
граница

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

$$p = P_0,$$

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



Твердая стенка: условия прилипания

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

Постановка задачи:

комментарии к граничным условиям

- **Входная граница**

- Задание однородного профиля скорости приводит к зависимости решения от сетки («особая точка»)
- ГУ соответствуют уровню турбулентности 1%, что приводит к турбулизации ПС от его начала
- ✓ Оба обстоятельства влияют только на начальный участок ПС

- **Условия симметрии**

- Не соответствуют условиям эксперимента
- Ведут к ускорению потока из-за роста толщины вытеснения
- ✓ При высоте канала 1 м погрешность небольшая
- ✓ При использовании $U_e = U_{max}$ (а не U_0) в C_f и θ влияние на зависимость $C_f(\theta)$ отсутствует

- **Выходная граница**

- Граничные условия несколько искажают решение
- ✓ Не следует анализировать профили в выходном сечении

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)
 - Необходимо задать толщину «пограничного слоя»
- Число Куранта $CFL=20$
- 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

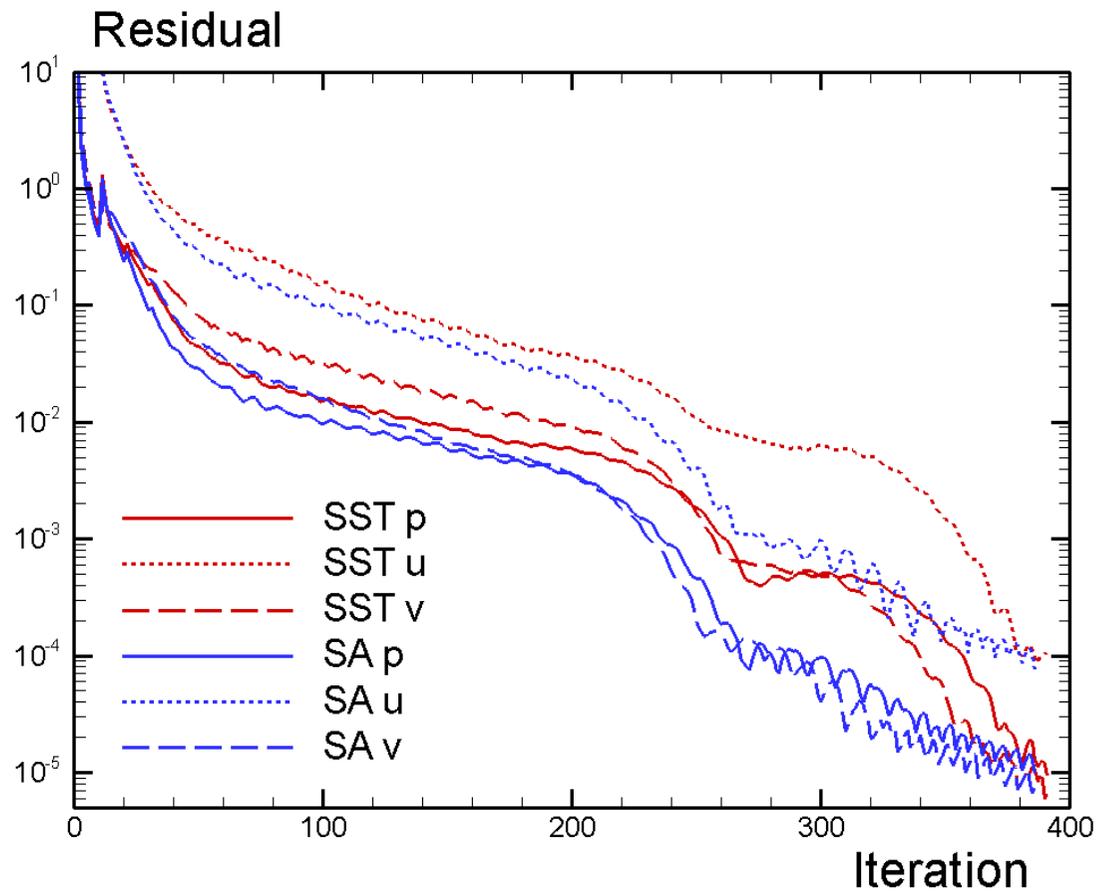
Постановка задачи:

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.

Результаты: сходимость

- Для достижения невязки уравнения неразрывности 10^{-5} необходимо около 400 итераций



Результаты:

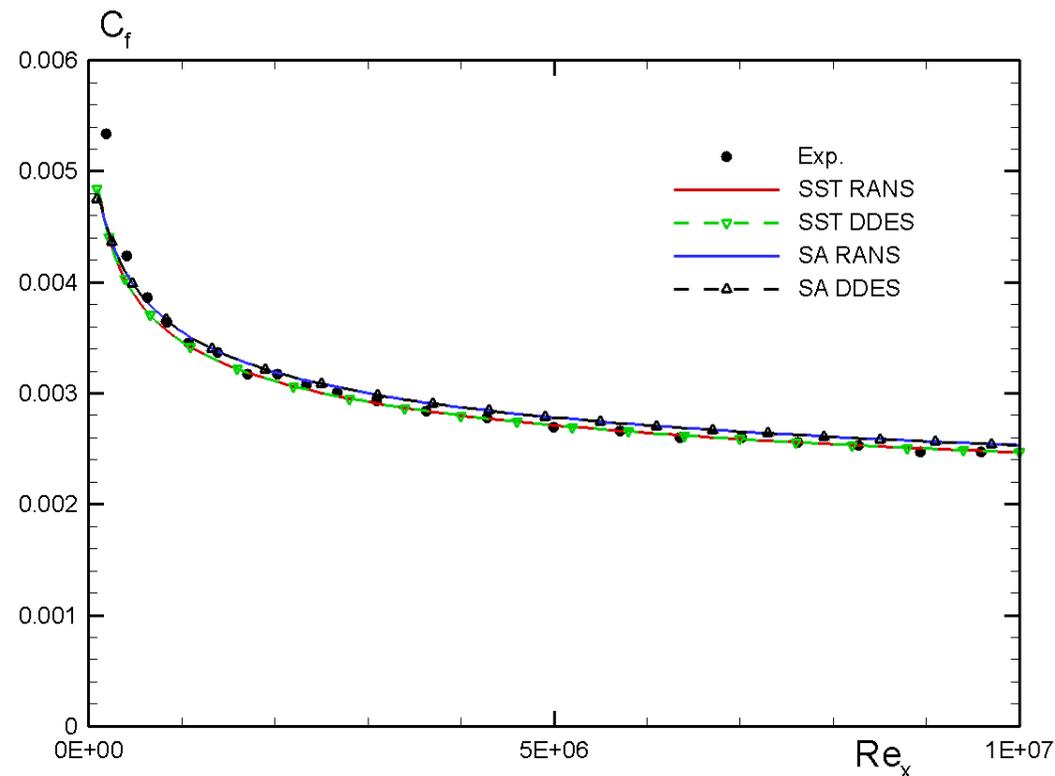
метод DDES

- Начальное приближение DDES: RANS решение
- Гибридная схема для конвективных потоков в уравнении движения
 - “Взвесь” противопоточной схемы третьего порядка и симметричной схемы четвертого порядка с весовой функцией, зависящей от решения
- $\Delta t = 0.05 \cdot 1\text{м} / U_0$
- 10 внутренних итераций на шаг по времени
- Решение стационарное и совпадает с RANS решением с точностью до различий в схеме

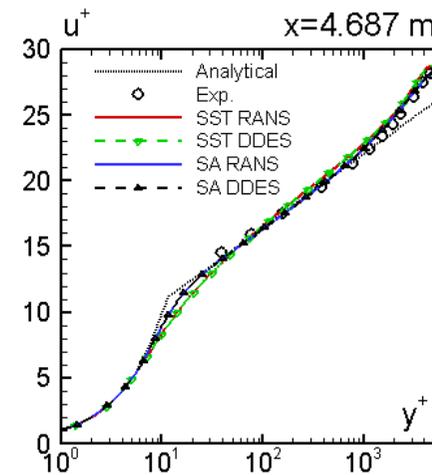
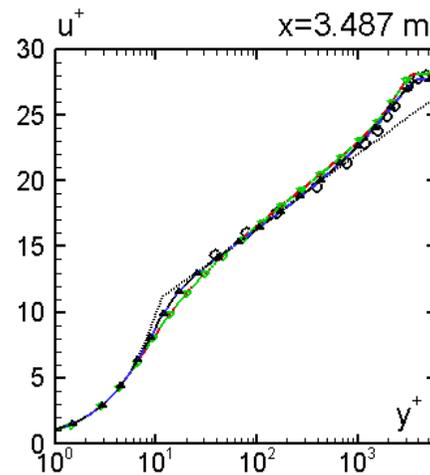
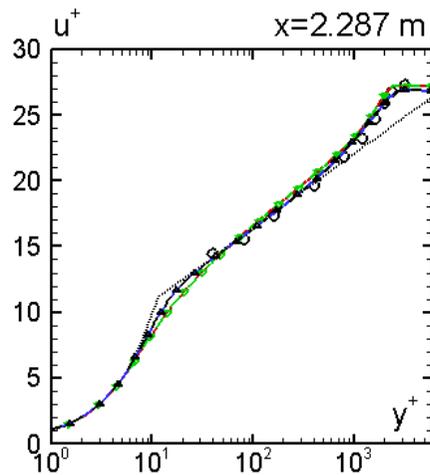
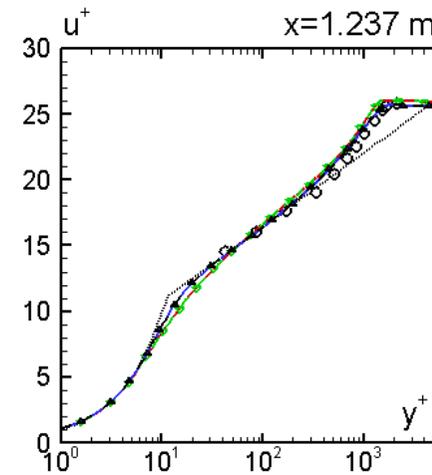
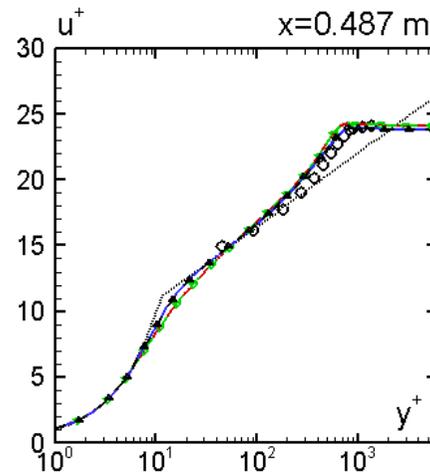
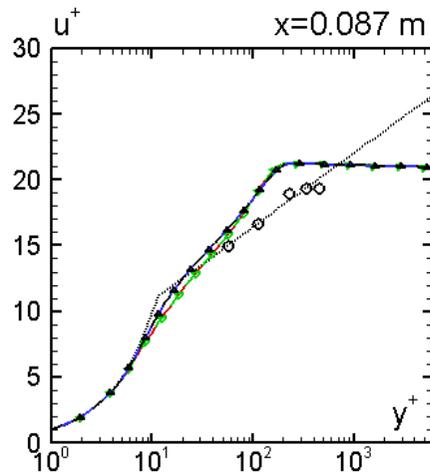
Результаты:

коэффициент трения

- Принято считать, что при $Re_\theta=10^4$ коэффициент трения $C_f=2.62 \cdot 10^{-3}$
 - В HTC коде на рассмотренной сетке
 - SA модель: $C_f=2.61 \cdot 10^{-3}$ (U_0 based $C_f=2.66 \cdot 10^{-3}$)
 - SST модель: $C_f=2.54 \cdot 10^{-3}$ (U_0 based $C_f=2.59 \cdot 10^{-3}$)



Результаты: профили скорости



Результаты: профили турбулентной вязкости

