

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт
Высшая школа прикладной математики и вычислительной физики

Курс лекций «Моделирование турбулентности»
(http://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/turb_models)

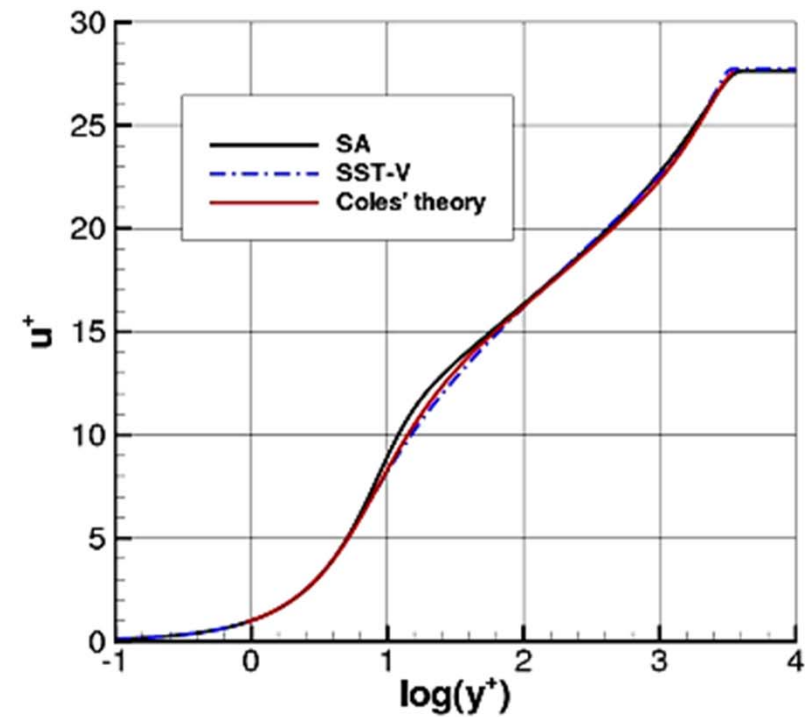
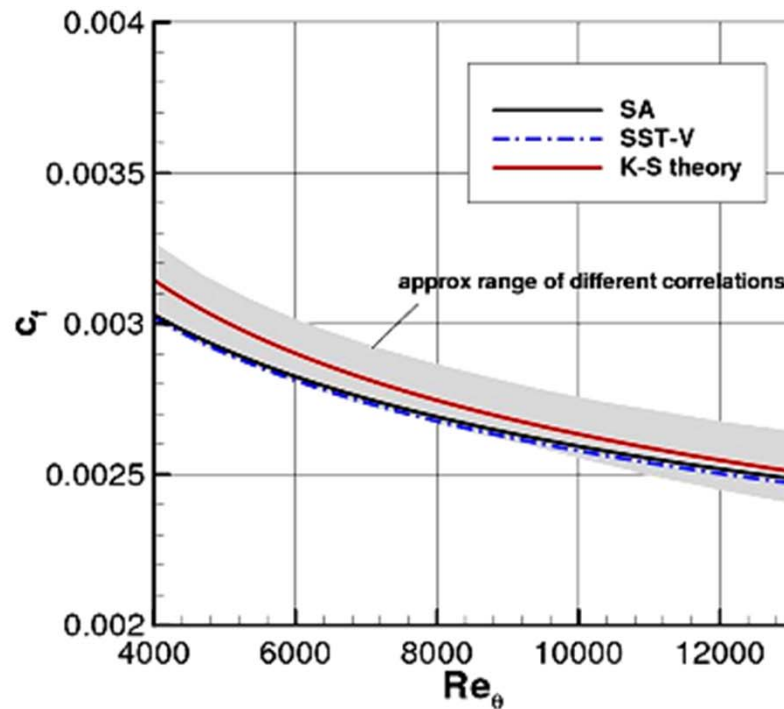
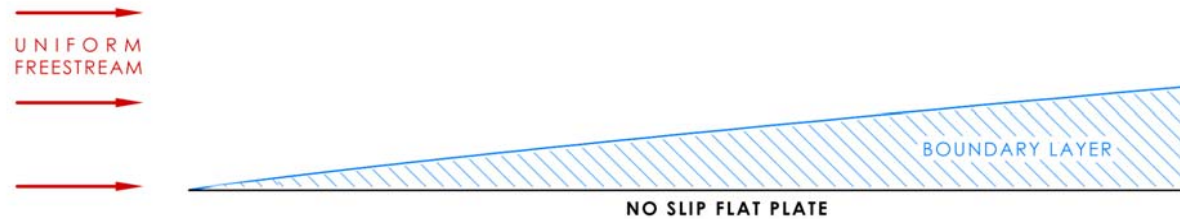
Лекция 10

Примеры применения моделей турбулентности

Гарбарук Андрей Викторович (agarbaruk@mail.ru)
2023

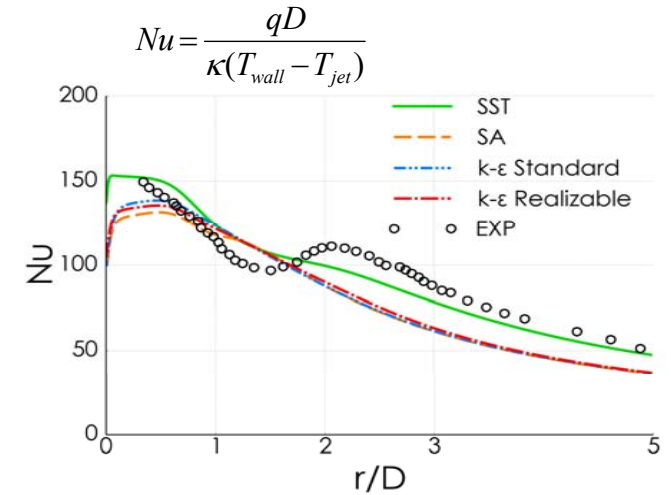
Присоединённые течения

Пограничный слой на плоской пластине

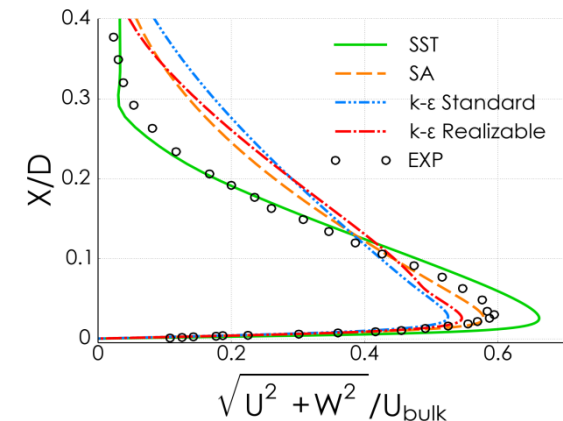
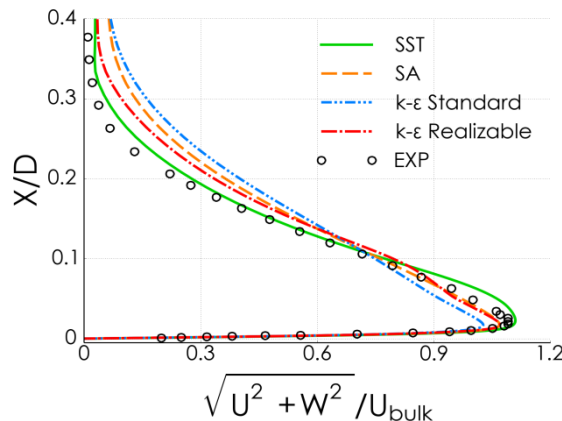
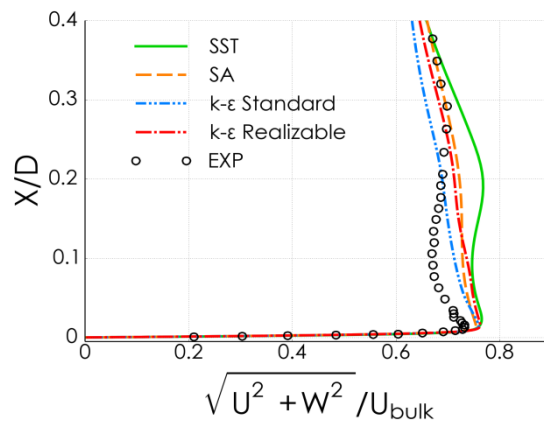


Коэффициент трения и профиль скорости в пограничном слое на плоской пластине

Натекание струи на стенку

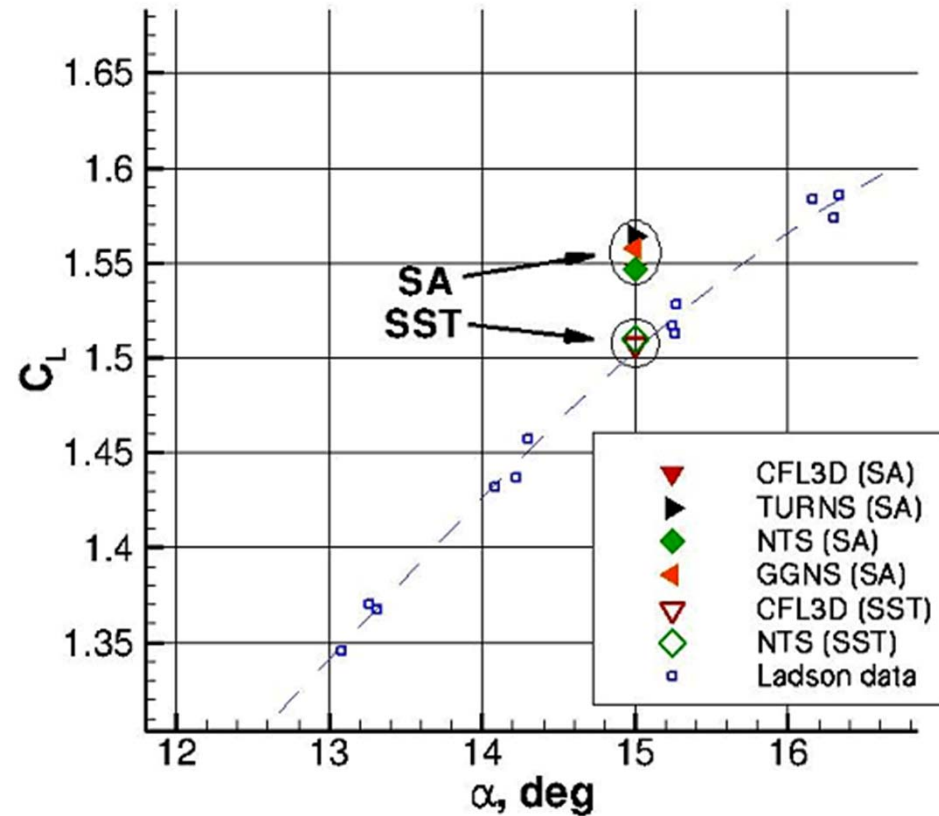


Распределение числа Нуссельта вдоль поверхности



Профили скорости в сечениях $x/D=0.5, 1.0, 1.5$

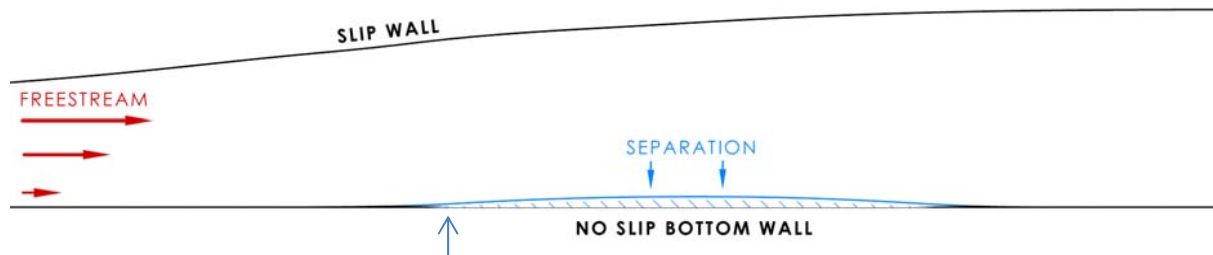
Безотрывное обтекание профиля НАСА0012



Подъемная сила при угле атаки 15° ,
рассчитанная с помощью различных CFD кодов

Отрывные течения

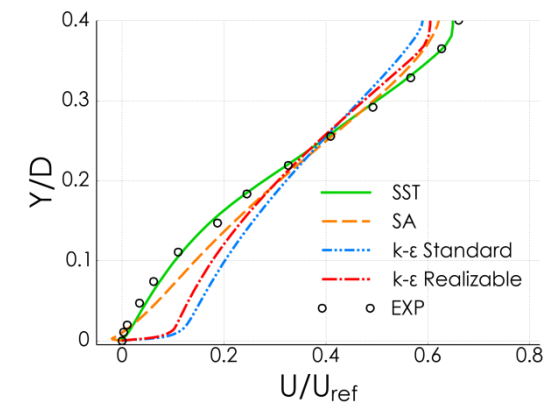
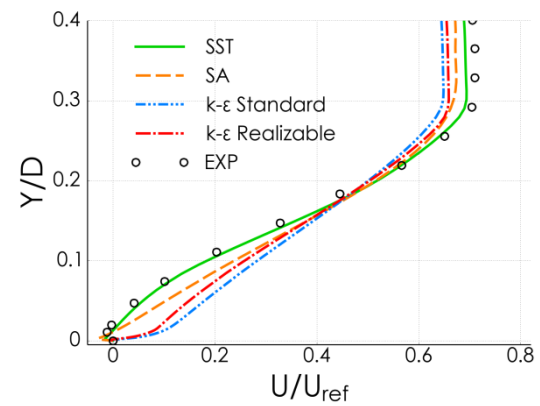
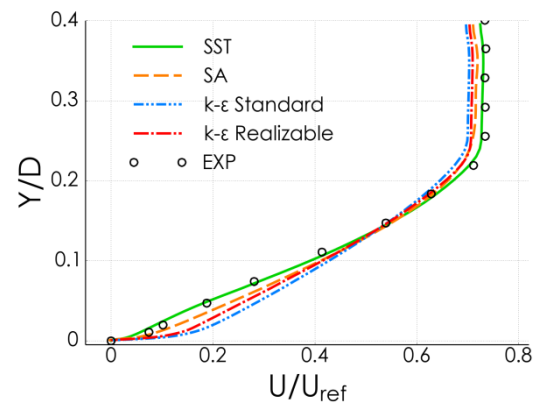
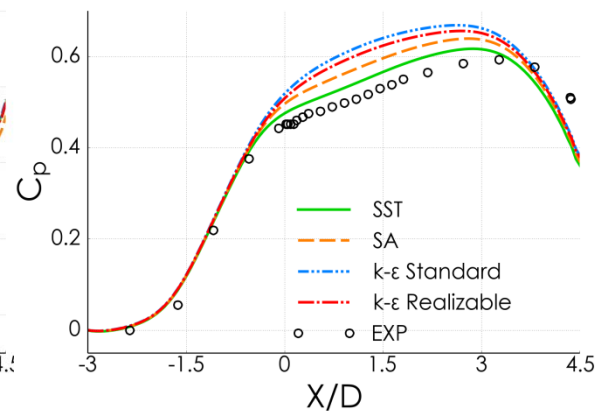
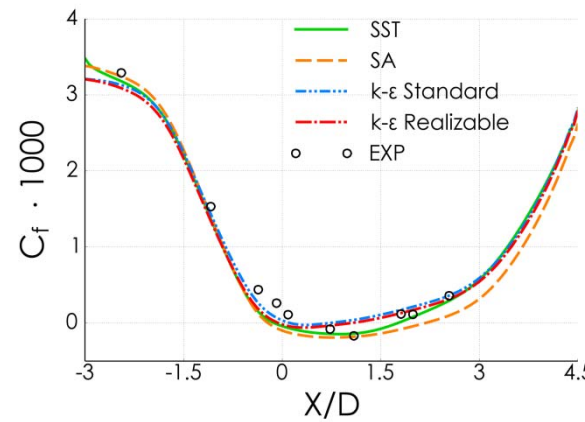
Течение в осесимметричном диффузоре



Линия тока из эксперимента

Слабый отрыв

Распределение коэффициентов трения и давления



Профили скорости в сечениях $x/D=0.09, 0.36, 1.63$

Течение в плоском канале с обратным уступом

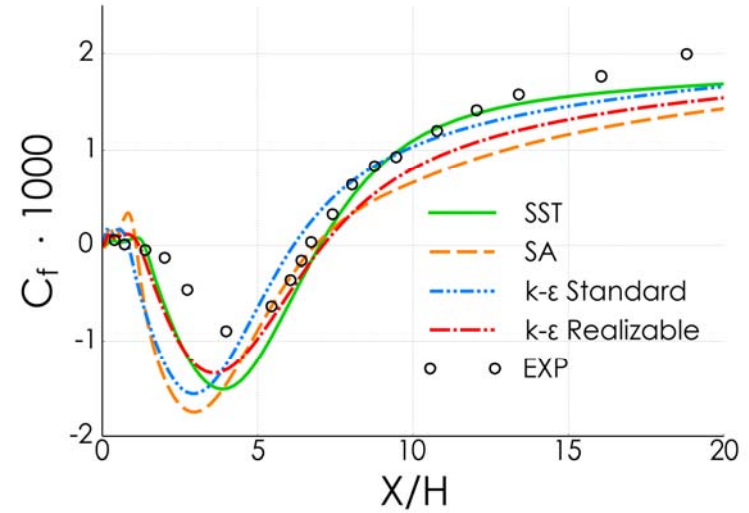
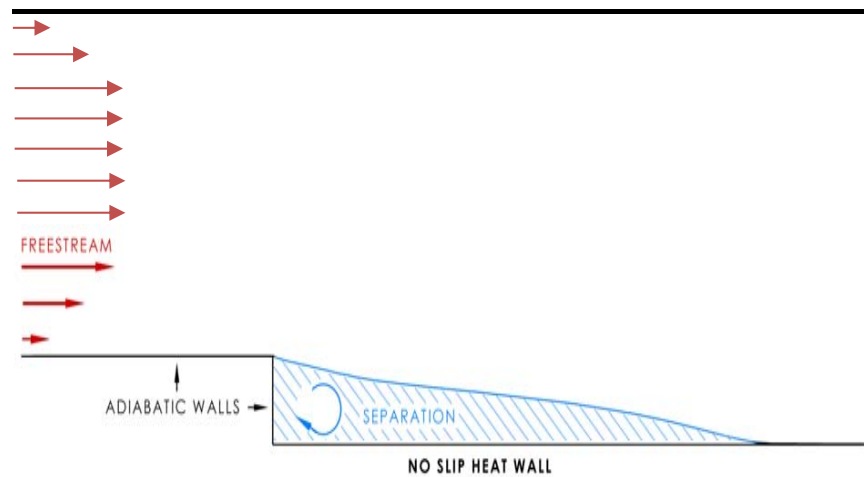
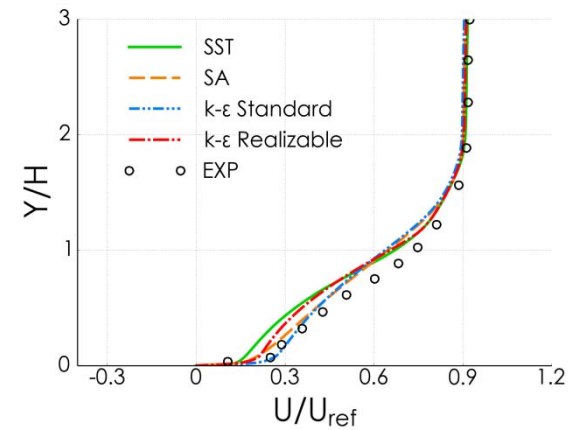
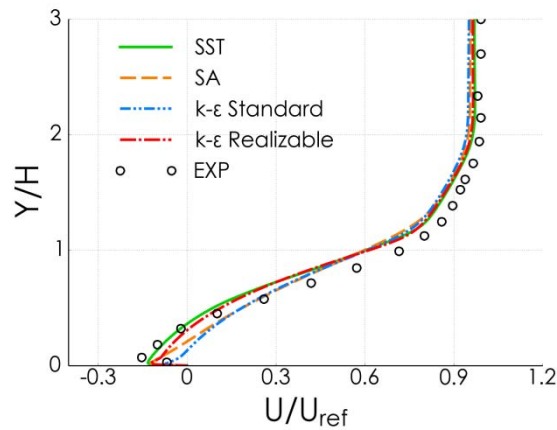
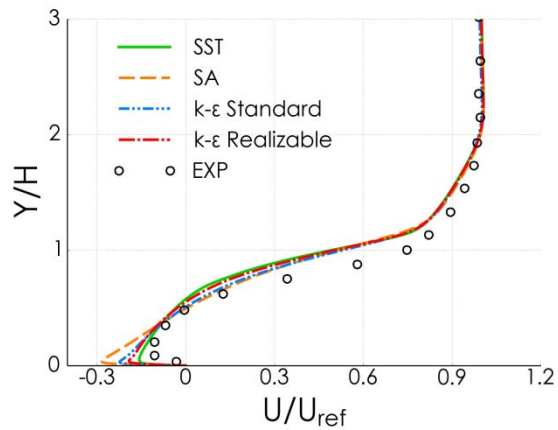


Схема течения и коэффициент трения



Профили продольной скорости в сечениях $x/D=2.2, 4.76, 8.86$

Течение в плоском асимметричном диффузоре (диффузор Оби)

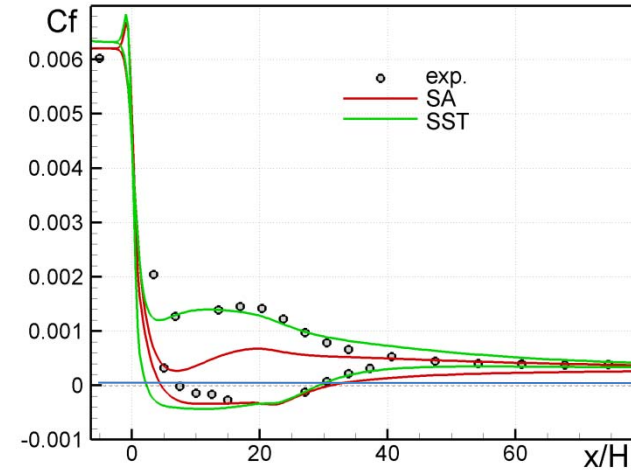
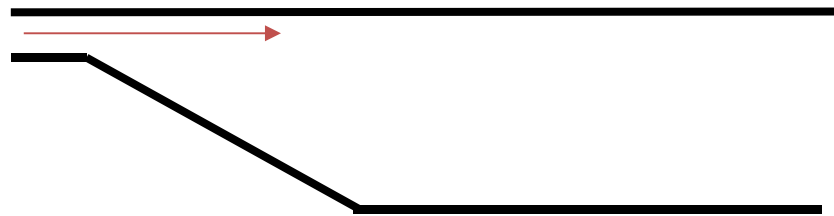
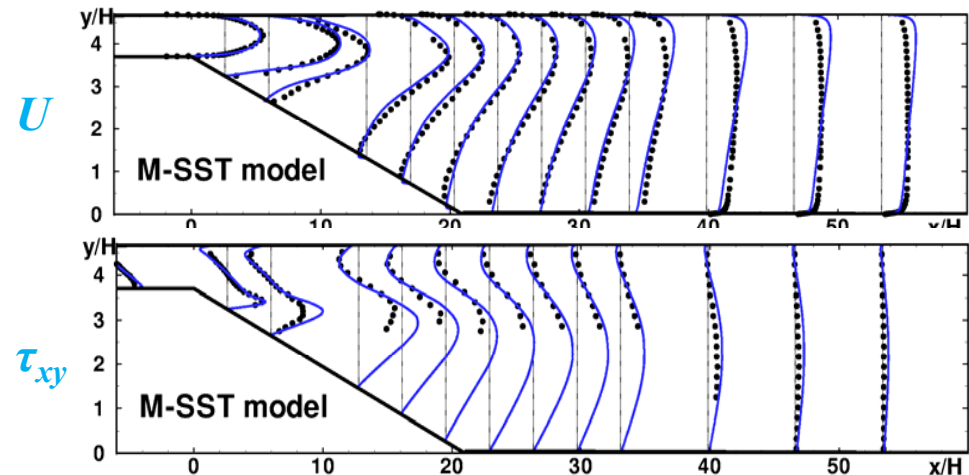
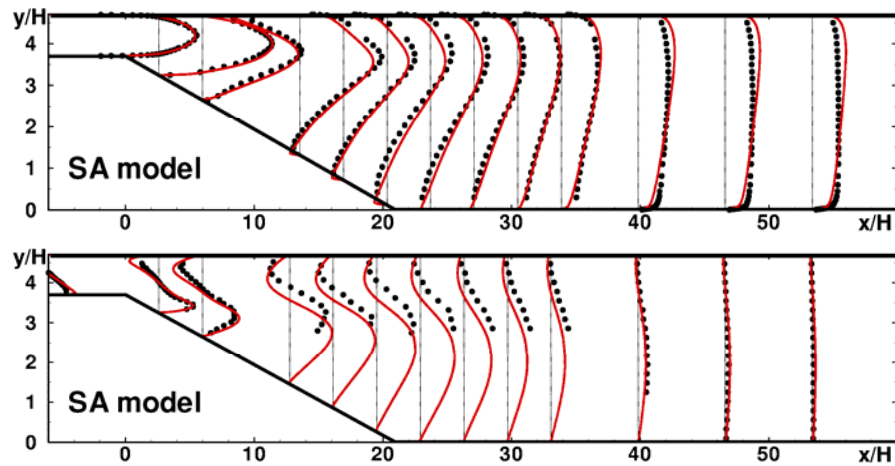
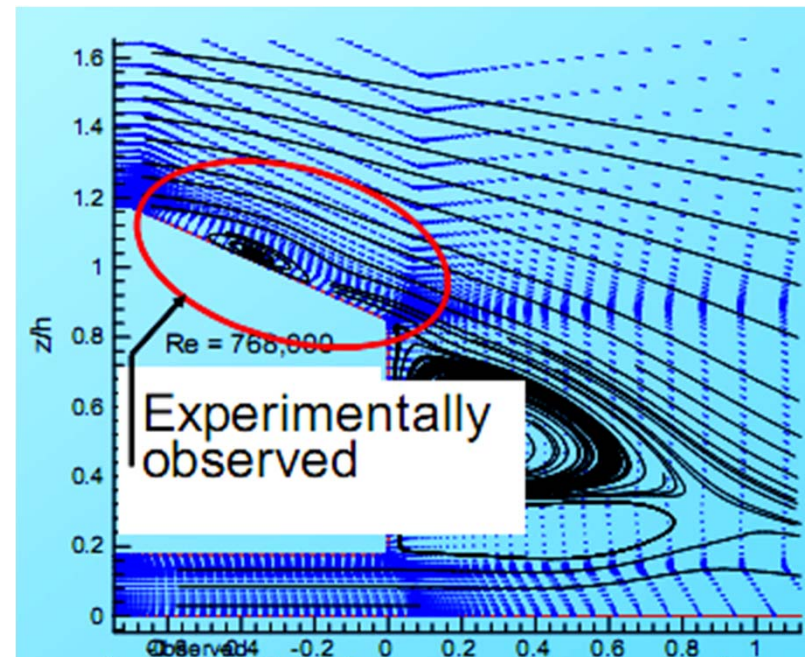
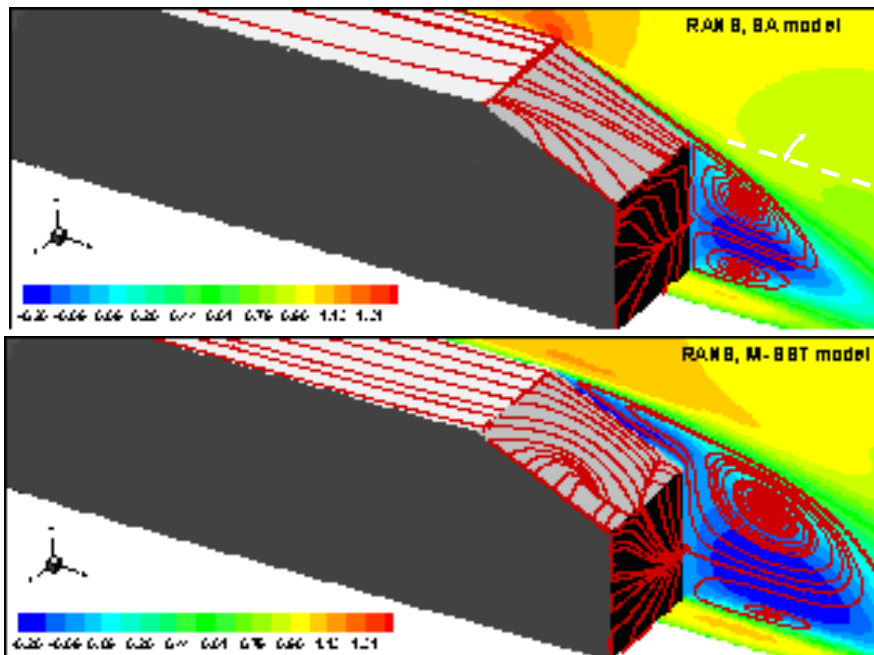
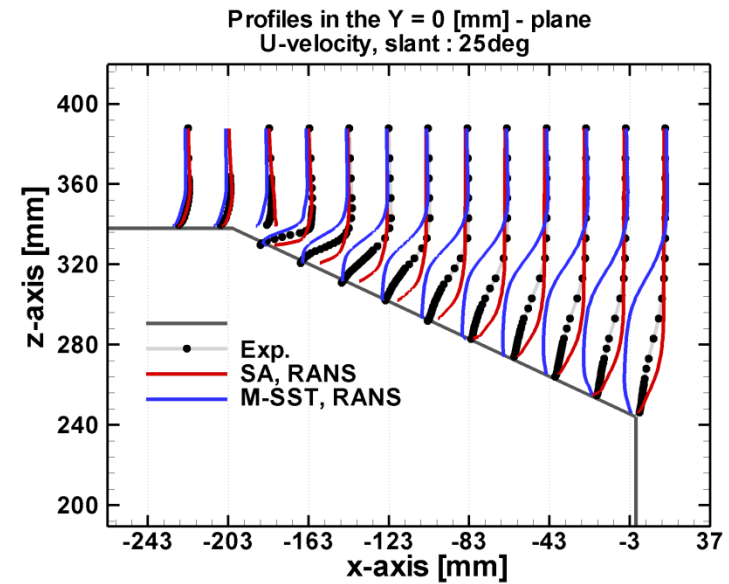
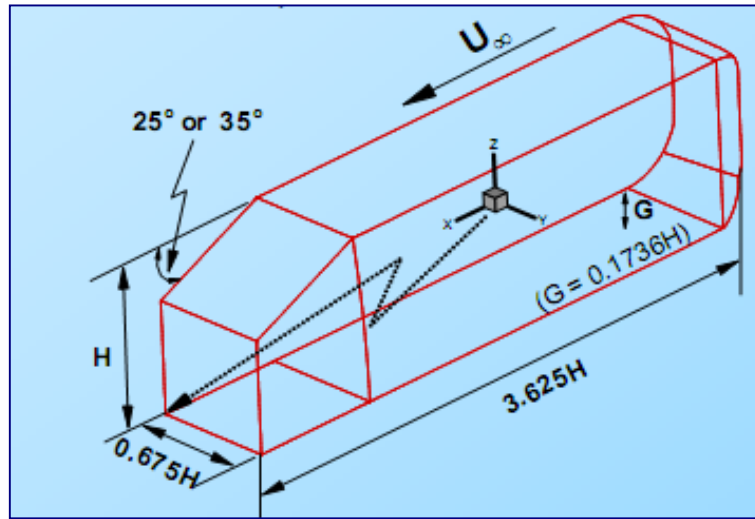


Схема течения и коэффициент трения



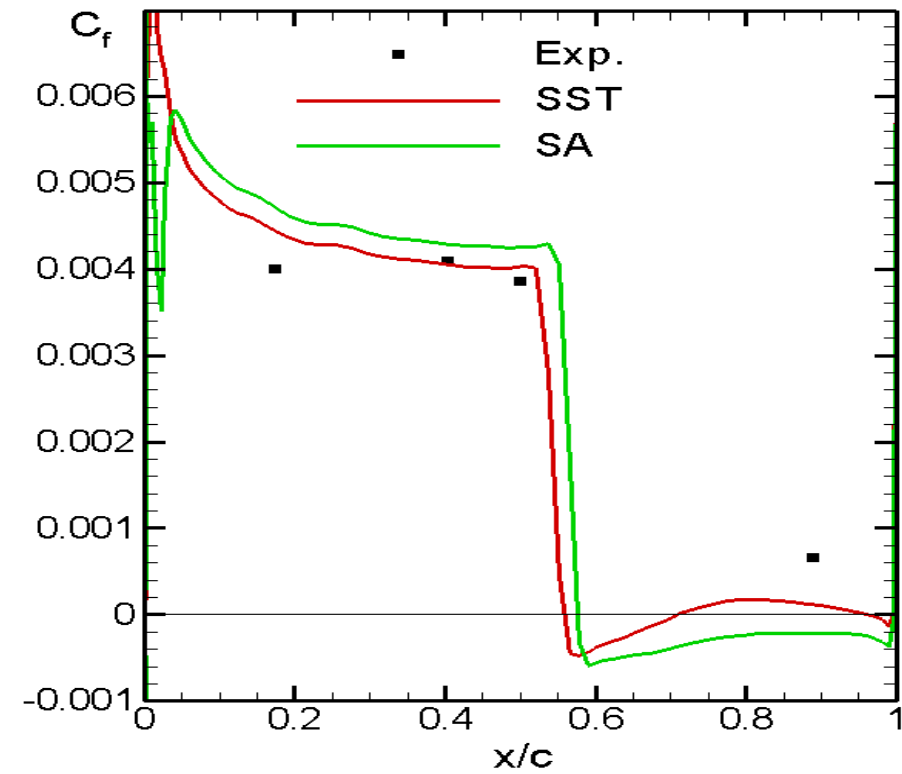
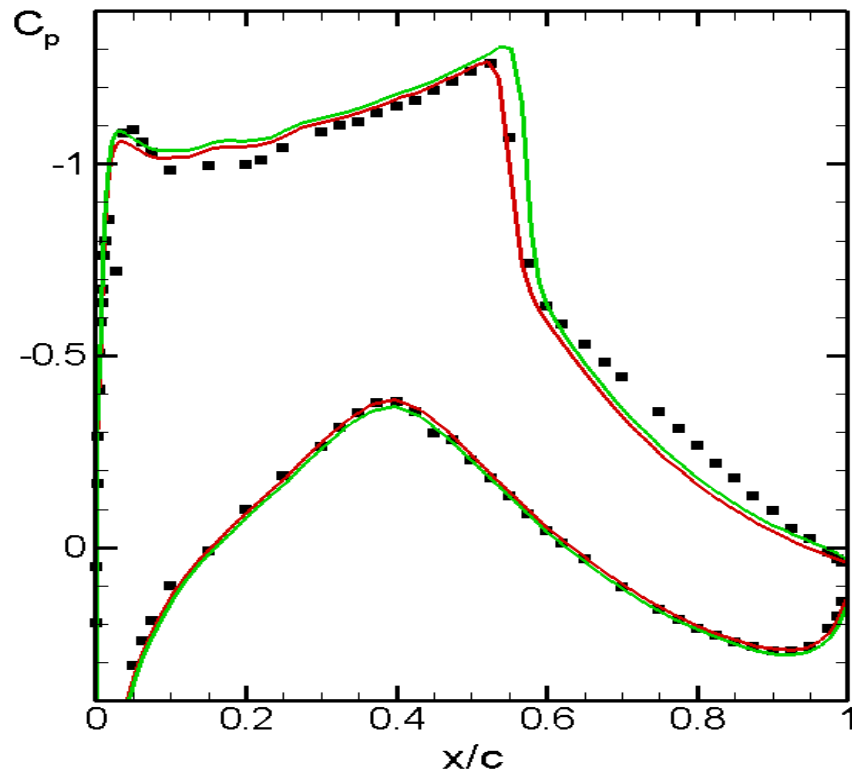
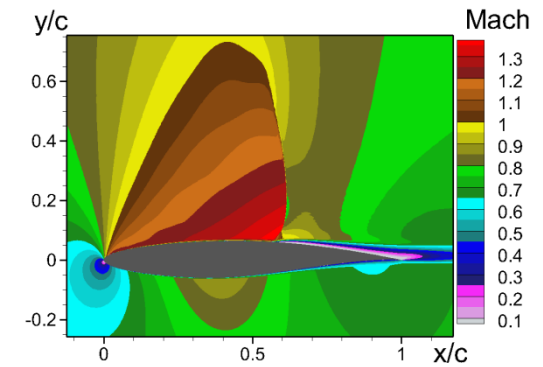
Профили продольной скорости и касательных напряжений

Обтекание модели автомобиля (Ahmed car)



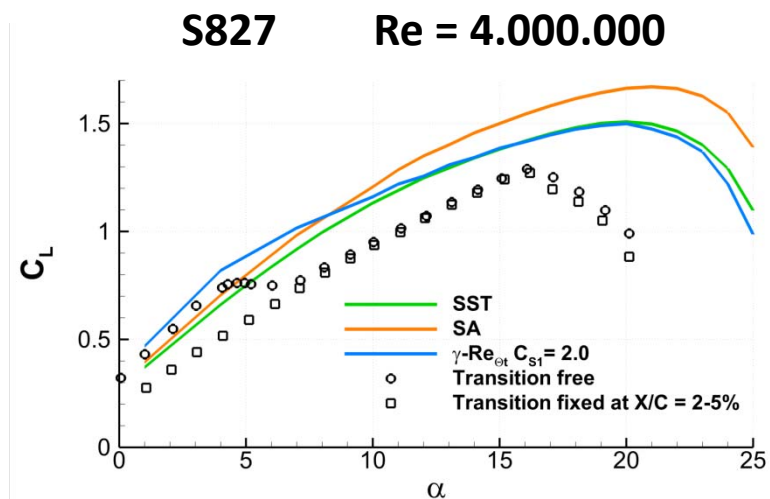
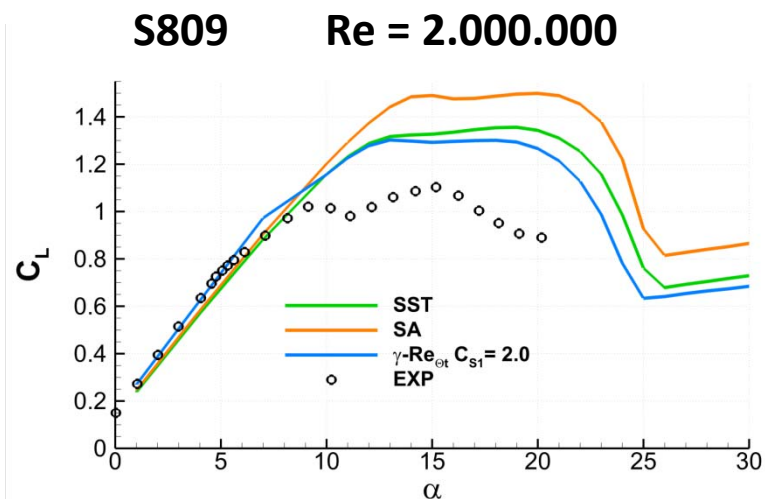
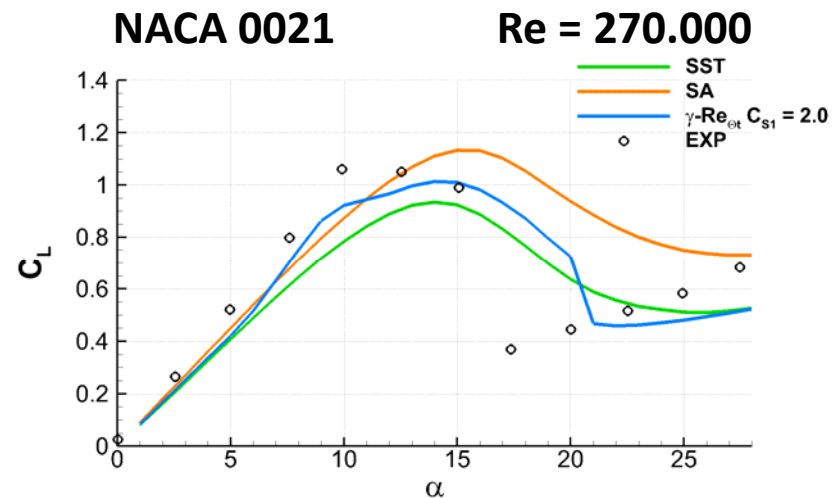
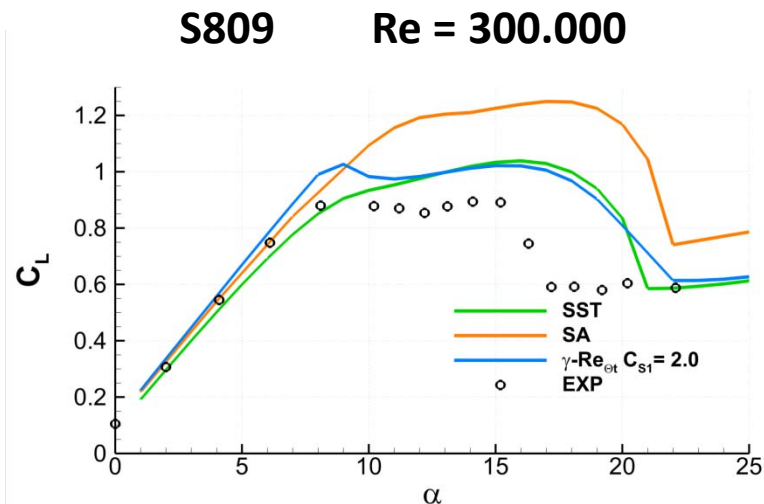
Трансзвуковое обтекание профиля RAE2822

Отрыв обусловлен наличием скачка



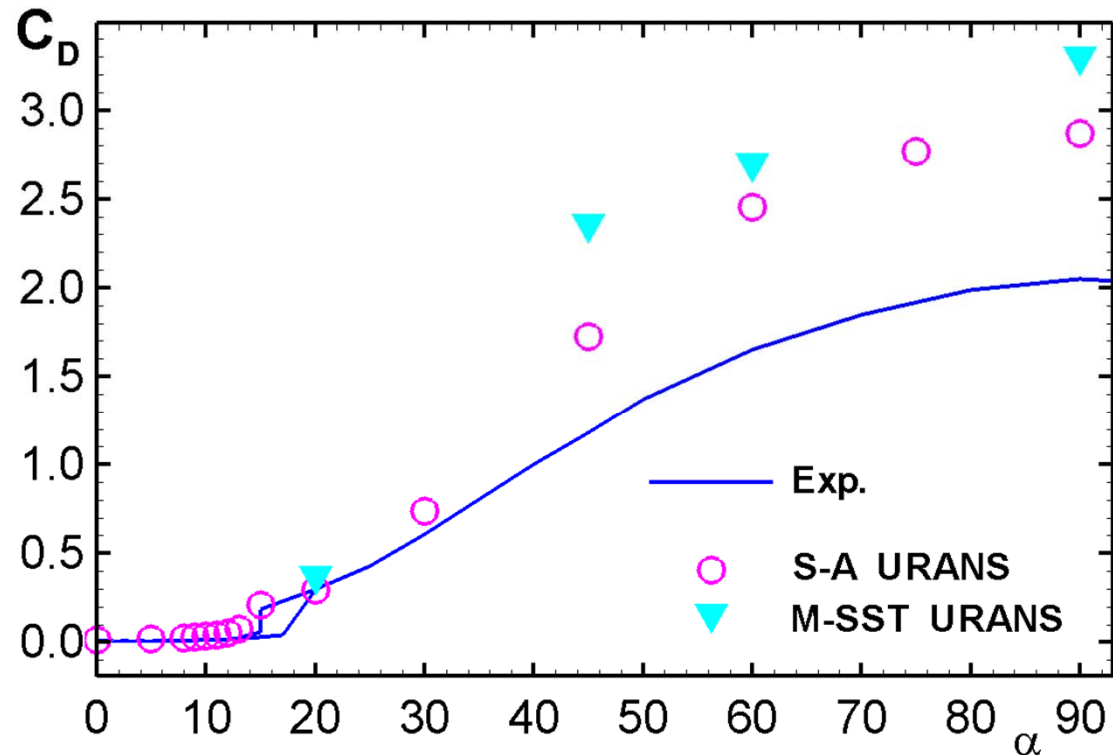
RAE 2822, case 10: $Re=6.2 \cdot 10^6$, $Mach=0.75$, $\alpha=3.19^\circ$

Обтекание крыловых профилей при переходе к режиму срыва потока



Точность расчета коэффициента подъемной силы оставляет желать лучшего

Обтекание профиля НАСА0012 при больших углах атаки



Сравнение расчетных зависимостей коэффициента сопротивления от угла атаки при $Re=10^5$, полученных с использованием SA и SST моделей, с экспериментальными данными

Метод RANS не пригоден для расчета данного течения

Угловой отрыв

Гипотеза Буссинеска

- Буссинеск (1877) предложил ввести дополнительную (турбулентную) вязкость
- Большинство моделей турбулентности используют обобщенную гипотезу Буссинеска

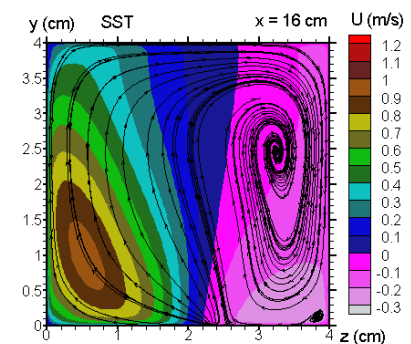
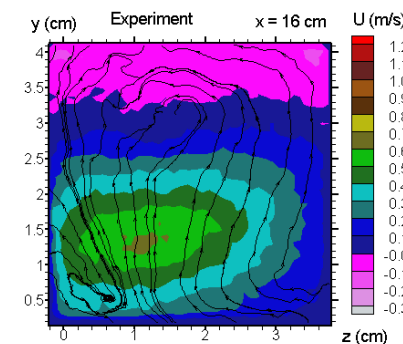
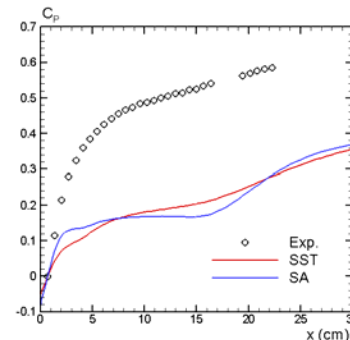
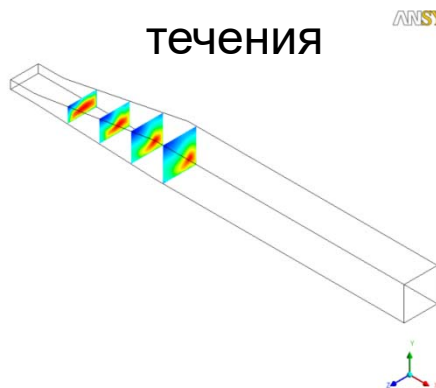
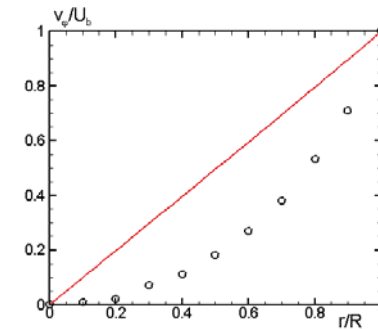
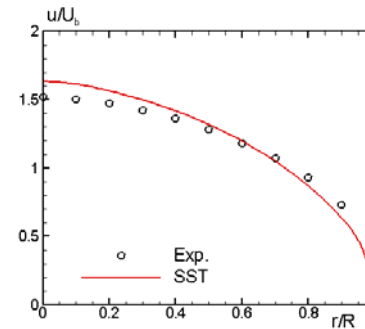
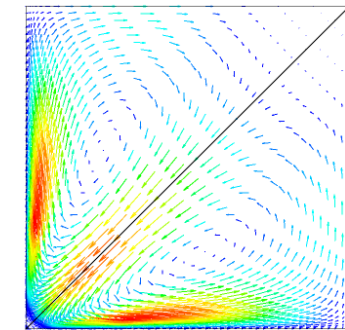
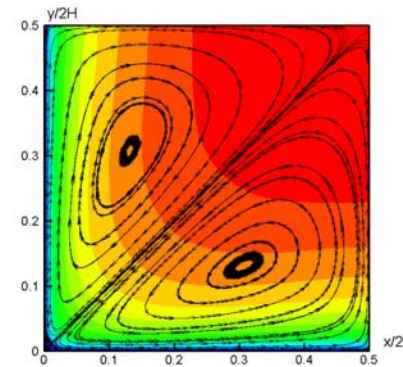
$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = 2\nu_T \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

- Линейная связь между тензором рейнольдсовых напряжений и тензором скоростей деформаций
 - Аналог реологического закона Ньютона для молекулярной вязкости
- Достоинства
 - Использование гипотезы Буссинеска позволяет сократить количество определяемых в процессе моделирования переменных с 6 до 1.
 - Недостатки
 - В некоторых случаях гипотеза Буссинеска несправедлива и ее использование приводит к получению качественно неверного результата

В таких случаях необходимо использование моделей рейнольдсовых напряжений или нелинейных моделей

Внутренние течения

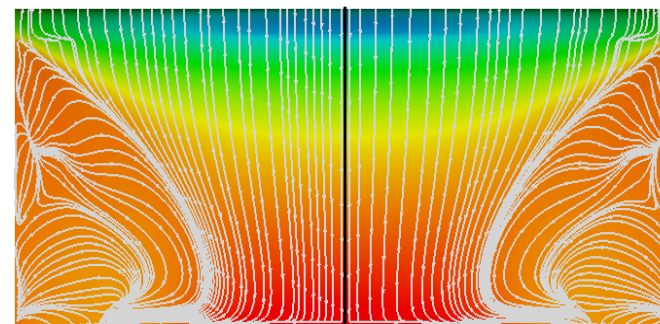
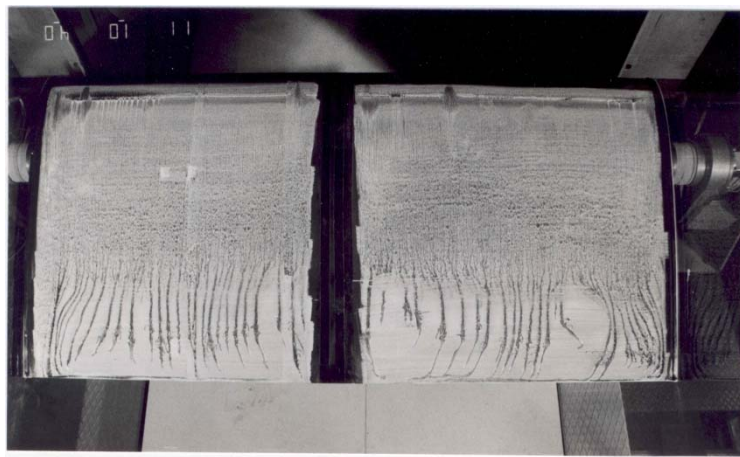
- Установившееся течение в трубе квадратного сечения
 - Линейные модели неспособны предсказать вторичные токи
- Установившееся течение в вращающейся круглой трубе
 - Линейные модели предсказывают линейный профиль тангенциальной скорости
- Течение в диффузоре
 - Качественно неправильная картина течения



Изолинии продольной компоненты скорости в эксперименте и расчете

Угловой отрыв на крыле

- Линейные модели существенно завышают угловой отрыв
 - Обтекание крылового профиля в аэродинамической трубе



- Сочленение крыла с фюзеляжем



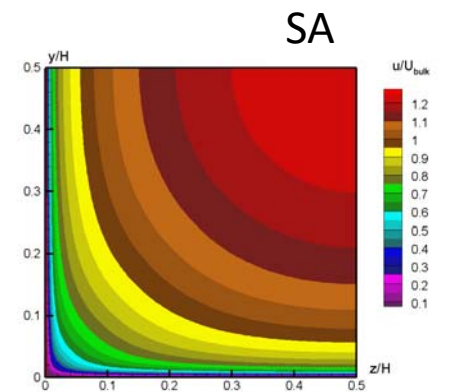
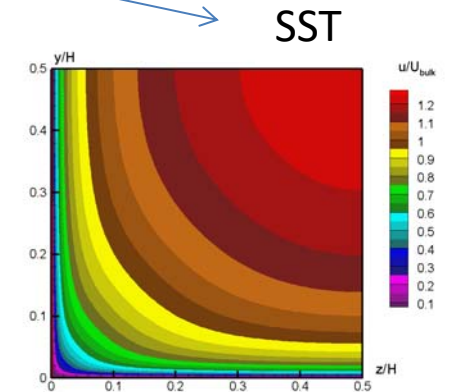
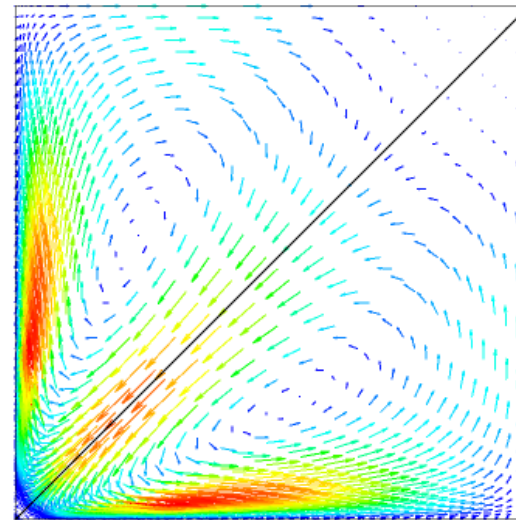
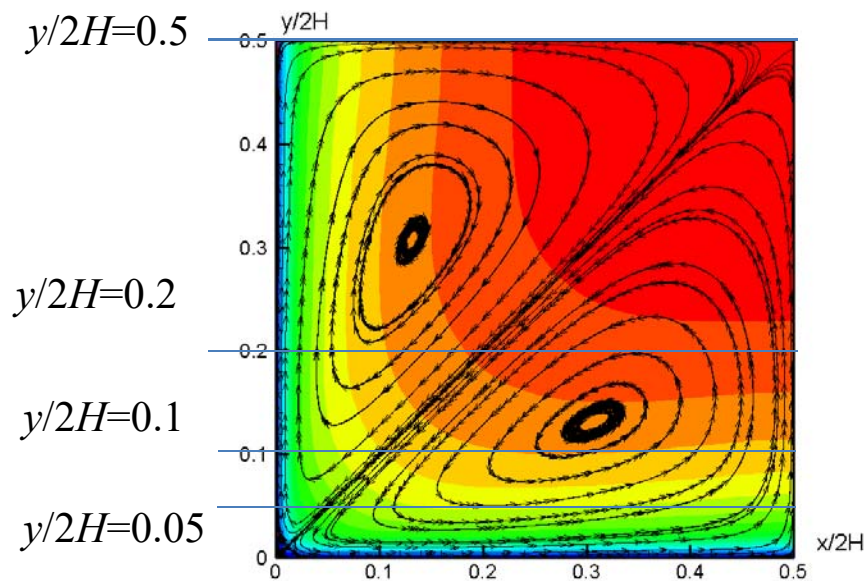
Поверхностные линии тока в эксперименте и расчете

Нелинейные модели

- Предсказать вторичные токи, подавляющие угловой отрыв, можно только отказавшись от гипотезы Буссинеска
 - Наиболее простым решением является использование EARSM или нелинейных моделей
 - ✓ Даже эти модели проигрывают линейным моделям по вычислительной эффективности
- Чаще всего используют EARSM на базе k-ε или k-ω моделей
 - Для построения нелинейной модели необходим турбулентный масштаб времени $\tau = k/\varepsilon = 1/C_\mu \omega$
- В случае моделей с одним уравнением приходится использовать кинематический масштаб $\tau = 1 / \sqrt{\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}} = 1 / \sqrt{(S^2 + \Omega^2)/2}$
 - Нелинейная модель Спаларта-Аллмареса
$$\overline{u'_i u'_j} = -2\nu_t S_{ij} - C_{cr1} \frac{4\nu_t}{\sqrt{(S^2 + \Omega^2)/2}} (S_{ik}\Omega_{kj} - \Omega_{ik}S_{kj}), \quad C_{cr1} = 0.3$$
 - ✓ Эта поправка может быть использована с любой моделью турбулентности

Установившееся течение в трубе квадратного сечения

Линейные модели не предсказывают вторичные токи

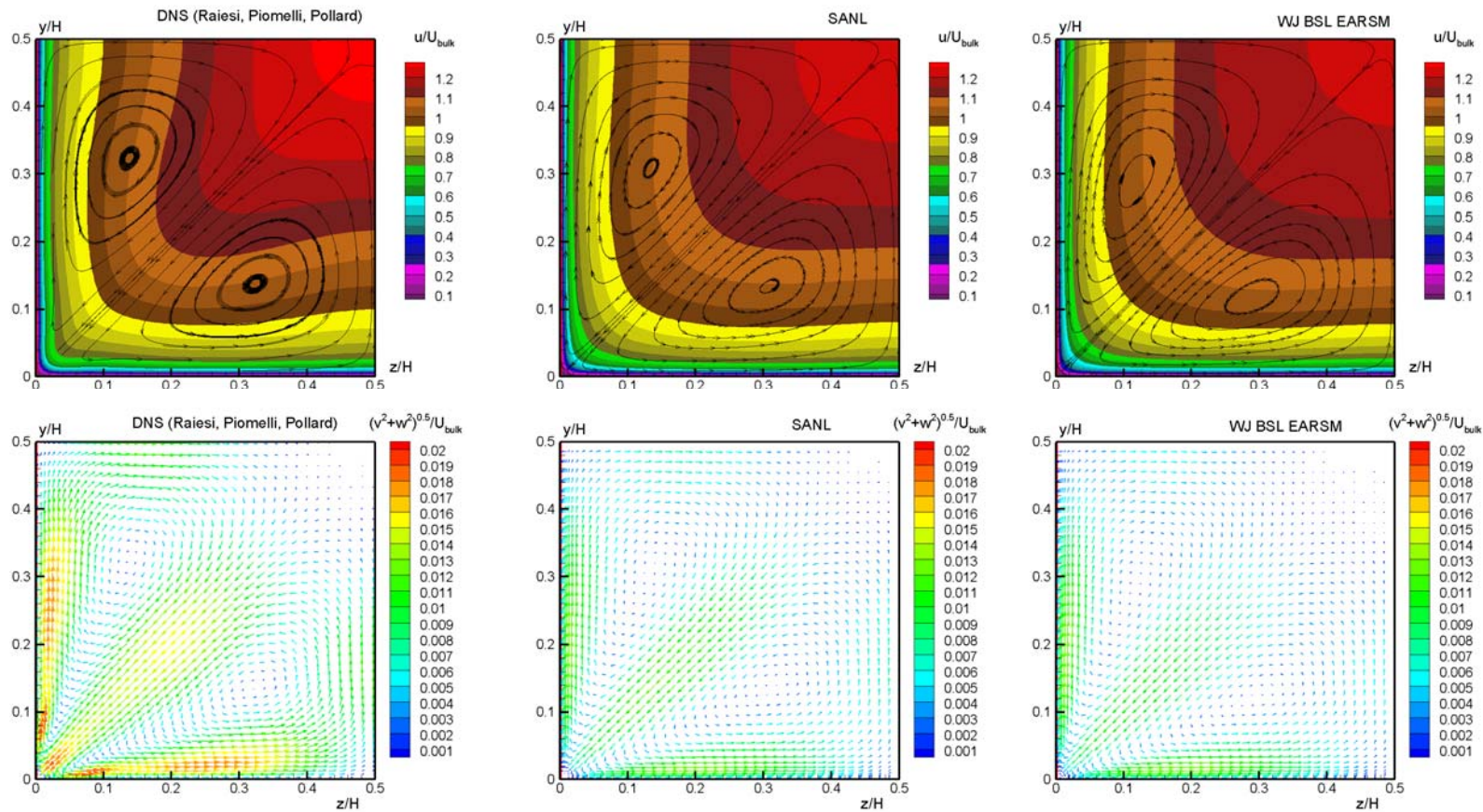


Вторичные токи в канале квадратного сечения

Сечения для сравнения профилей

Установившееся течение в трубе квадратного сечения

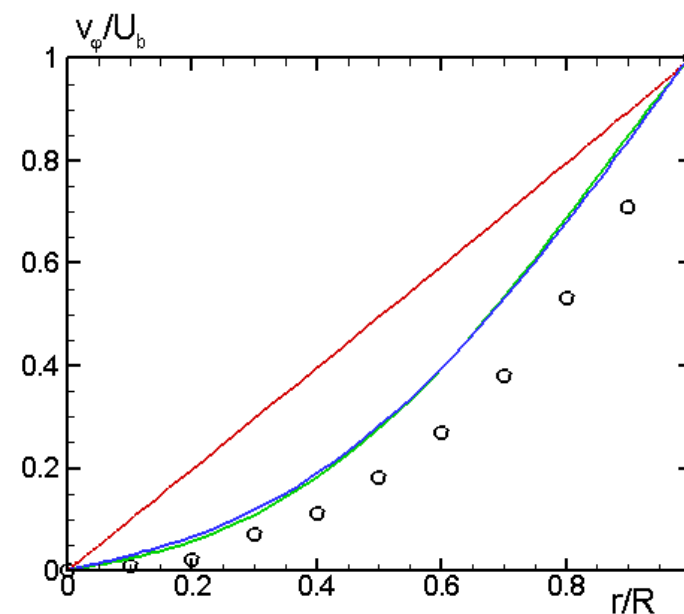
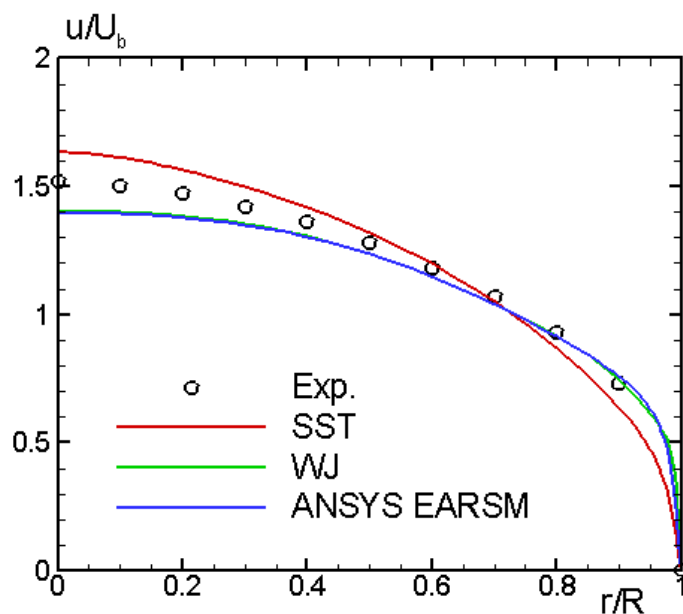
- Нелинейные модели правильно предсказывают структуру течения
 - Интенсивность вторичных токов в углу несколько занижена



Вторичные токи в канале квадратного сечения

Установившееся течение во вращающейся круглой трубе

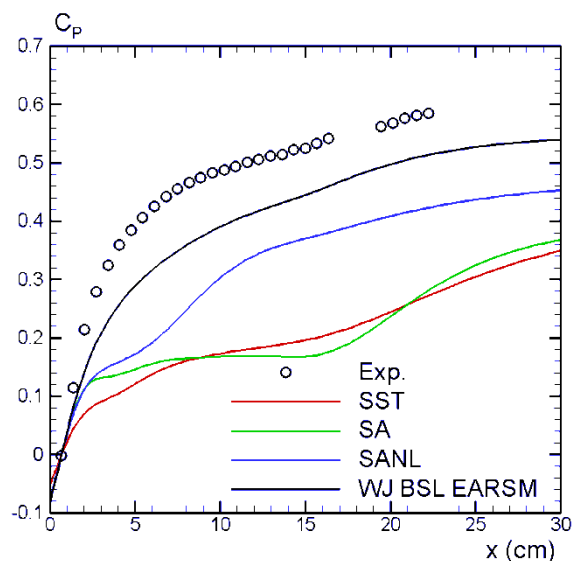
- Модели, использующие гипотезу Буссинеска, не в состоянии удовлетворительно предсказать нелинейный характер тангенциальной скорости



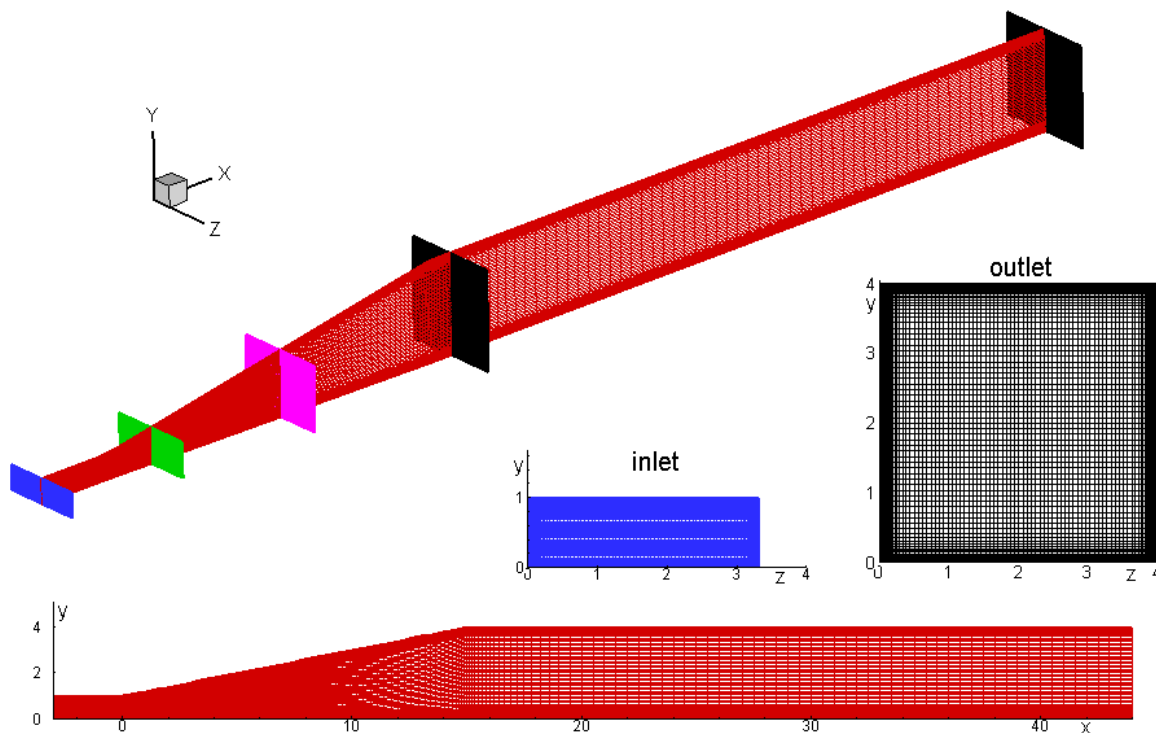
Сравнение расчетных профилей расходной и тангенциальной скорости с экспериментом Imao, Itoh, Harada

Диффузор прямоугольного сечения

Явное преимущество нелинейных моделей при расчете коэффициента давления



Сравнение расчетного коэффициента давления с экспериментом

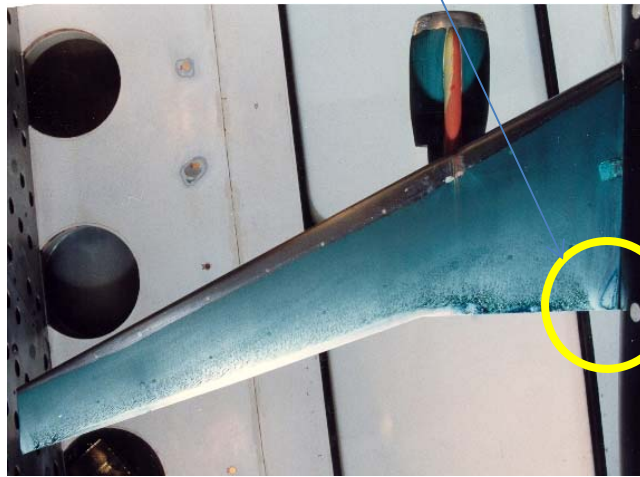
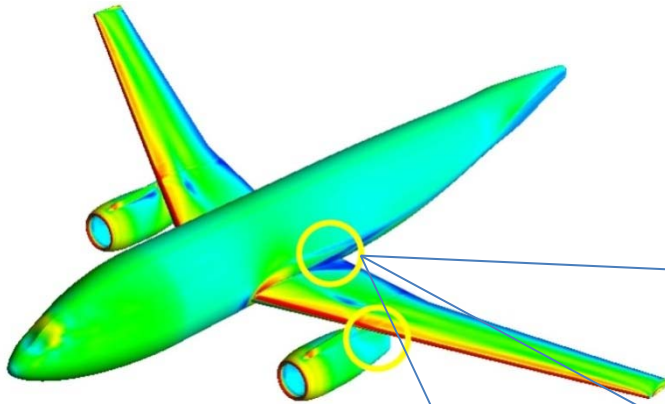


Расчетная область и сетка

Сочленение крыла и фюзеляжа

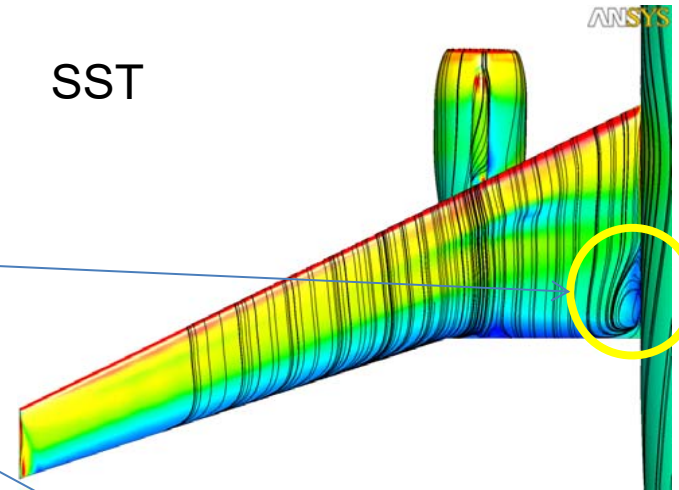
- Нелинейная модель правильно предсказывает размер углового отрыва
 - Линейная модель завышает его размер

DLR F6 Wing-Body-Pylon-Nacelle Testcase

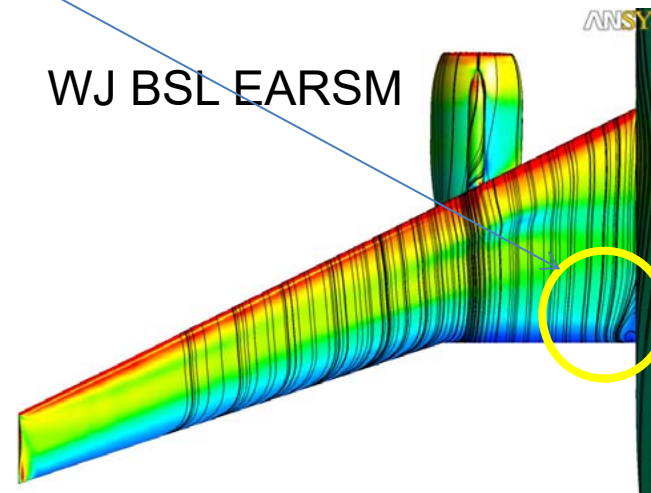


Эксперимент: визуализация
масляной пленкой

SST



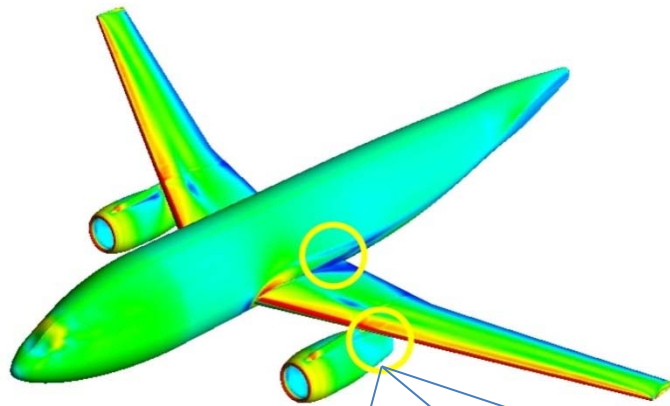
WJ BSL EARSM



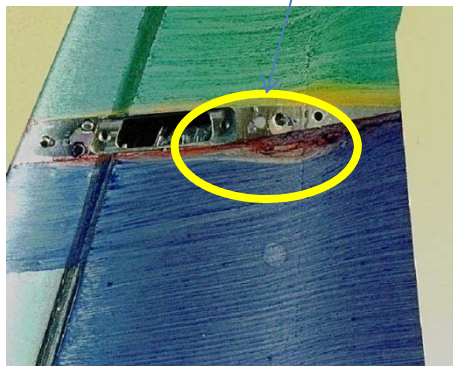
Расчет: поверхностные
линии тока

Сочленение пилона и крыла

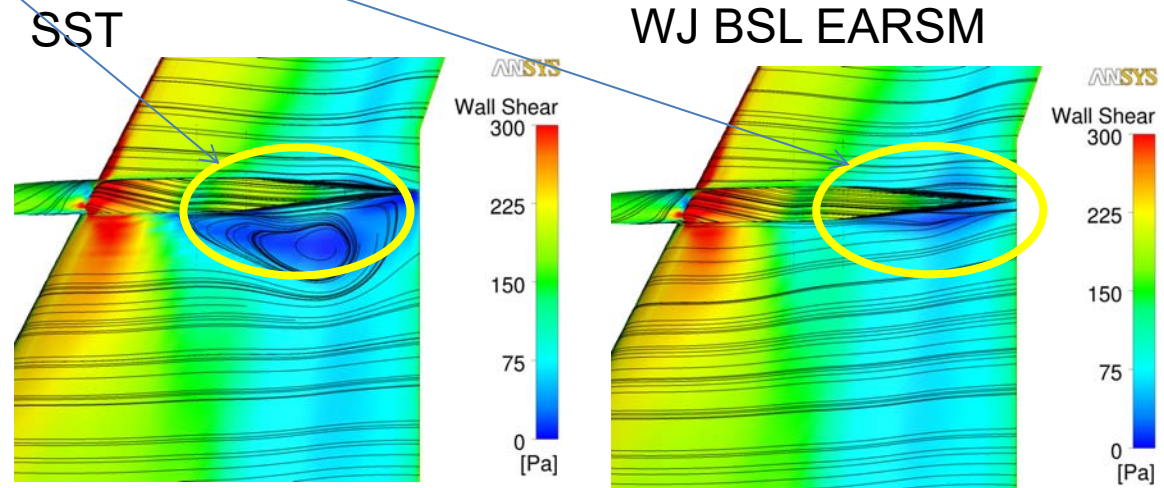
DLR F6 Wing-Body-Pylon-Nacelle Testcase



- Нелинейная модель правильно предсказывает размер углового отрыва
 - Линейная модель завышает его размер



Эксперимент: визуализация масляной пленкой

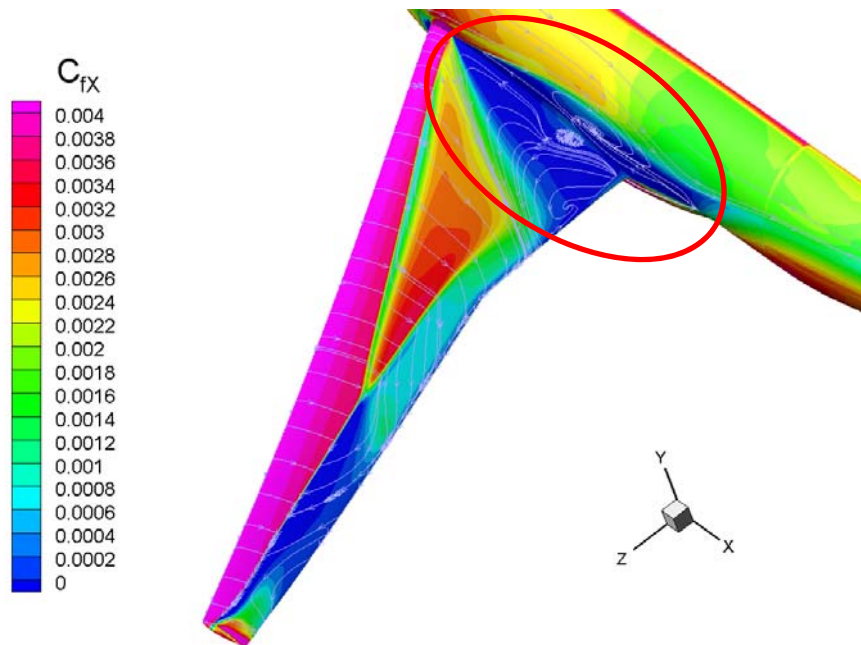


Расчет: поверхностные линии тока

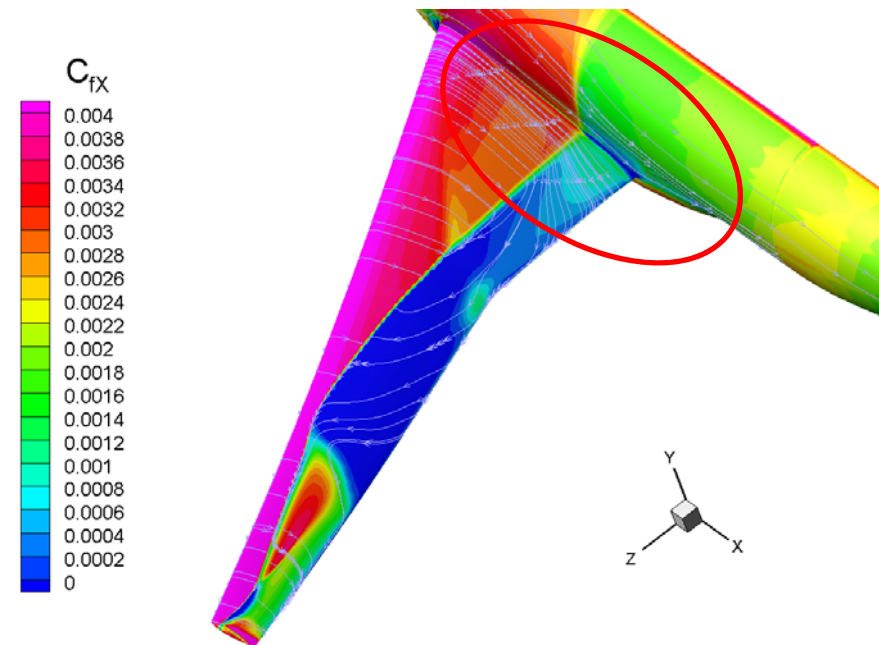
Трансзвуковое обтекание модели самолета CRM (I)

- Параметры течения
 - $Re_{inch} \approx 2 \cdot 10^4$, $M_\infty = 0.85$, $\alpha = 4.1^\circ$
- При использовании нелинейной модели не возникает массивный угловой отрыв
 - Даже столь простая нелинейная модель позволяет правильно описать течение внутри угла

Линейная модель SA



Нелинейная модель SA

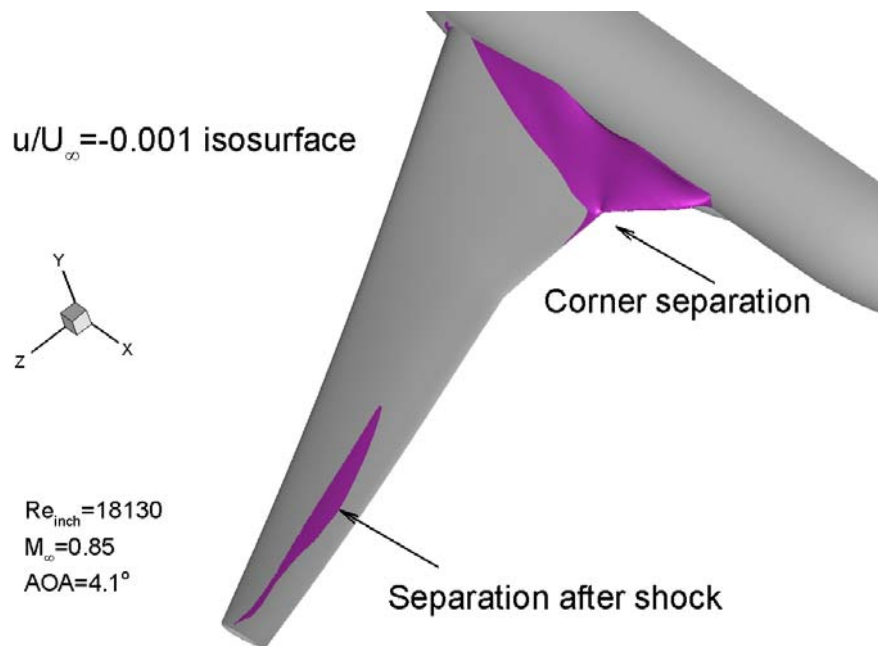


Продольный коэффициент трения и поверхностные линии тока

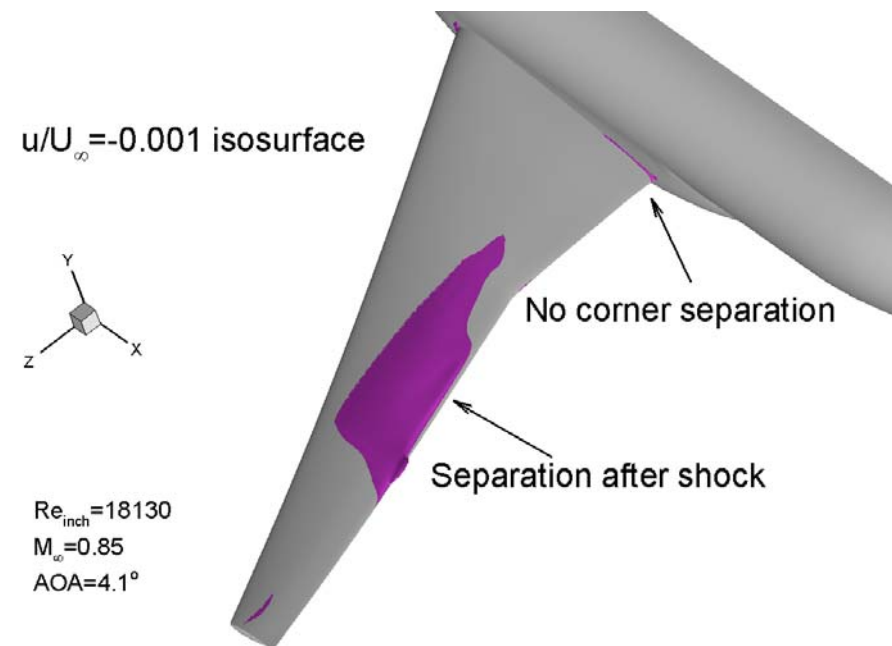
Трансзвуковое обтекание модели самолета CRM (II)

- Наличие углового отрыва меняет структуру течения на всей протяженности крыла

Линейная модель SA



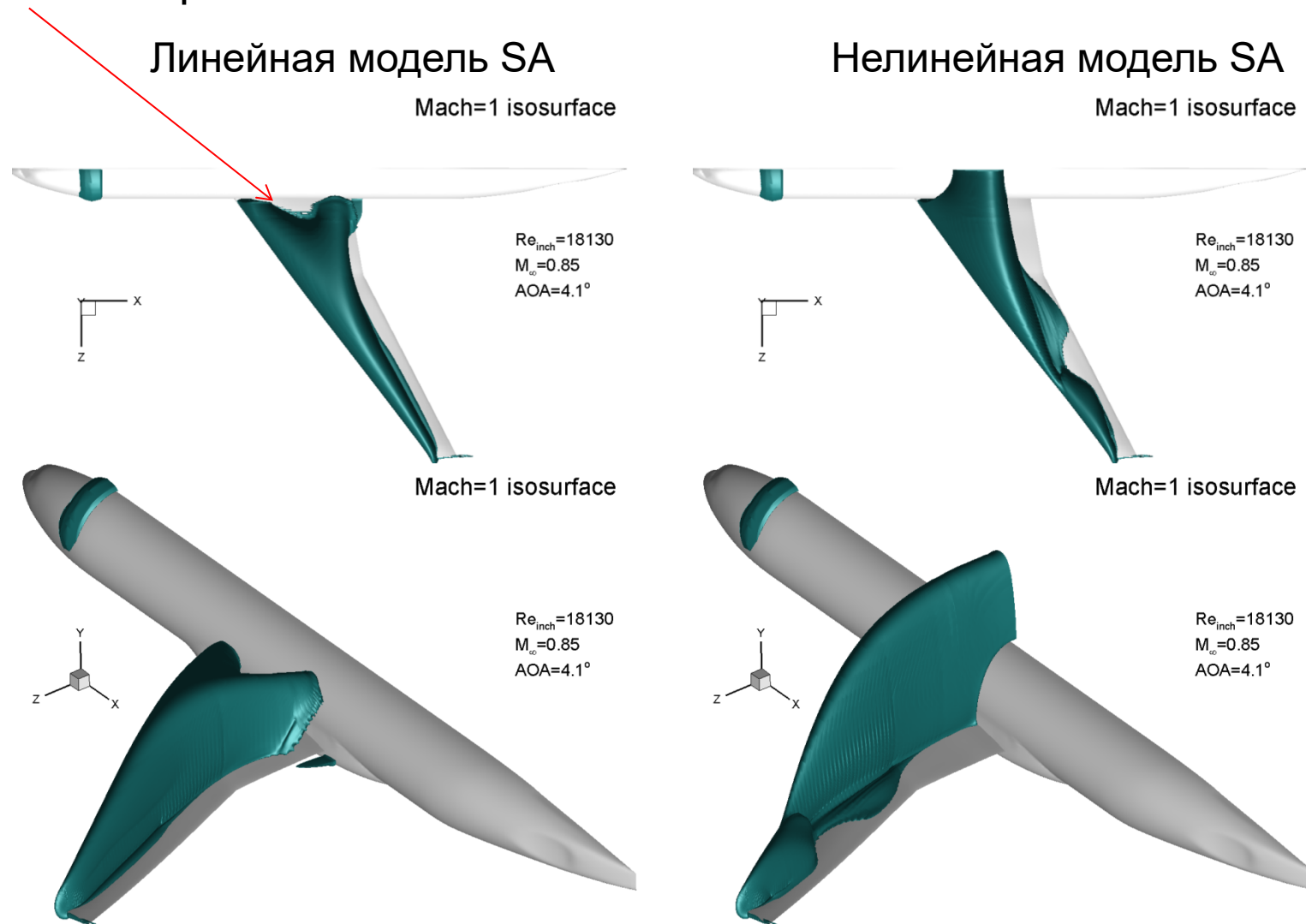
Нелинейная модель SA



Отрывные зоны на поверхности крыла

Трансзвуковое обтекание модели самолета CRM (III)

- Причина столь высокой чувствительности в скачке, вызванном угловым отрывом



Отрывные зоны на поверхности крыла

Резюме

- Модель Ментера SST является лучшей моделью в настоящее время, но она несколько уступает моделям с одним уравнением в вычислительной эффективности
- Существует ряд течений, которые невозможно правильно описать даже с помощью лучших моделей SA и SST.
 - Иногда помогает использование специальных поправок или более сложных моделей
 - ✓ Поправка на кривизну и вращение
 - ✓ Нелинейные модели
- Существуют течения, причиной неудачи расчета которых являются не модели турбулентности, а сам подход RANS. В этом случае для правильного предсказания требуются более совершенные и дорогие подходы (LES, гибридные подходы)