

Влияние стенок на структуру вихревого следа.

Известно, что стенки аэродинамической трубы влияют на поток вокруг модели. Это - основной источник неуверенности в моделировании условий свободного полета. Однако очень немного данных в литературе об оценке эффектов стенок аэродинамической трубы на вихрь с законцовки крыла. Особое беспокойство вызывает, как на динамику вихревого следа с конца крыла влияют твердые стенки (канала или аэродинамической трубы). Эксперименты в аэродинамических трубах помогают изучить динамику начального закручивания с конца крыла и последующее развитие осевых и тангенциальных скоростей и турбулентности вниз по потоку. Devenport и al. [Devenport,1996] сообщили, что поток вне ядра вихря был во власти остатка от «обычного» следа за профилем крыла, который развивался в увеличивающуюся спираль, и что уровни турбулентных напряжений изменялись вдоль спирали этого следа в ответ (отклик) на переменную скорость напряжения, наложенную вихрем. Chow и др. (Chow, 1997), исследовал вихрь от законцовки крыла NASA 0012 в весьма ограниченном канале аэродинамической установки.

Как отмечают Хуанг, Айгараши, Дурбан и Хуй [Huang, Igarashi, Durbin, Hui, 2010], много подробных свойств концевых вихря были измерены в экспериментах аэродинамической трубы и эти исследования дали много полезной информации. Однако, большинство их использовало одноточечные методы измерения потока. Общий недостаток одноточечных измерений - неспособность обеспечить пространственную структуру неустойчивых вихрей. Полные измерения полей необходимы, чтобы эффективно показать переходной характер структур вихря с законцовки крыла. Они провели измерения методом стереоскопического PIV с высоким разрешением и сравнили полученные данные с CFD-решениями для профиля (хорда $c=10.2\text{см}$, полуразмах $s/2=15.2\text{см}$) в канале прямоугольного сечения (размером $39 \times 30 \times 30\text{см}$). Делается вывод о незначительности влияния стенок на структуру вихревого следа в сравнении со «свободным» обтеканием на основе сравнения полей средних скоростей U, V, W и энергии турбулентности k :

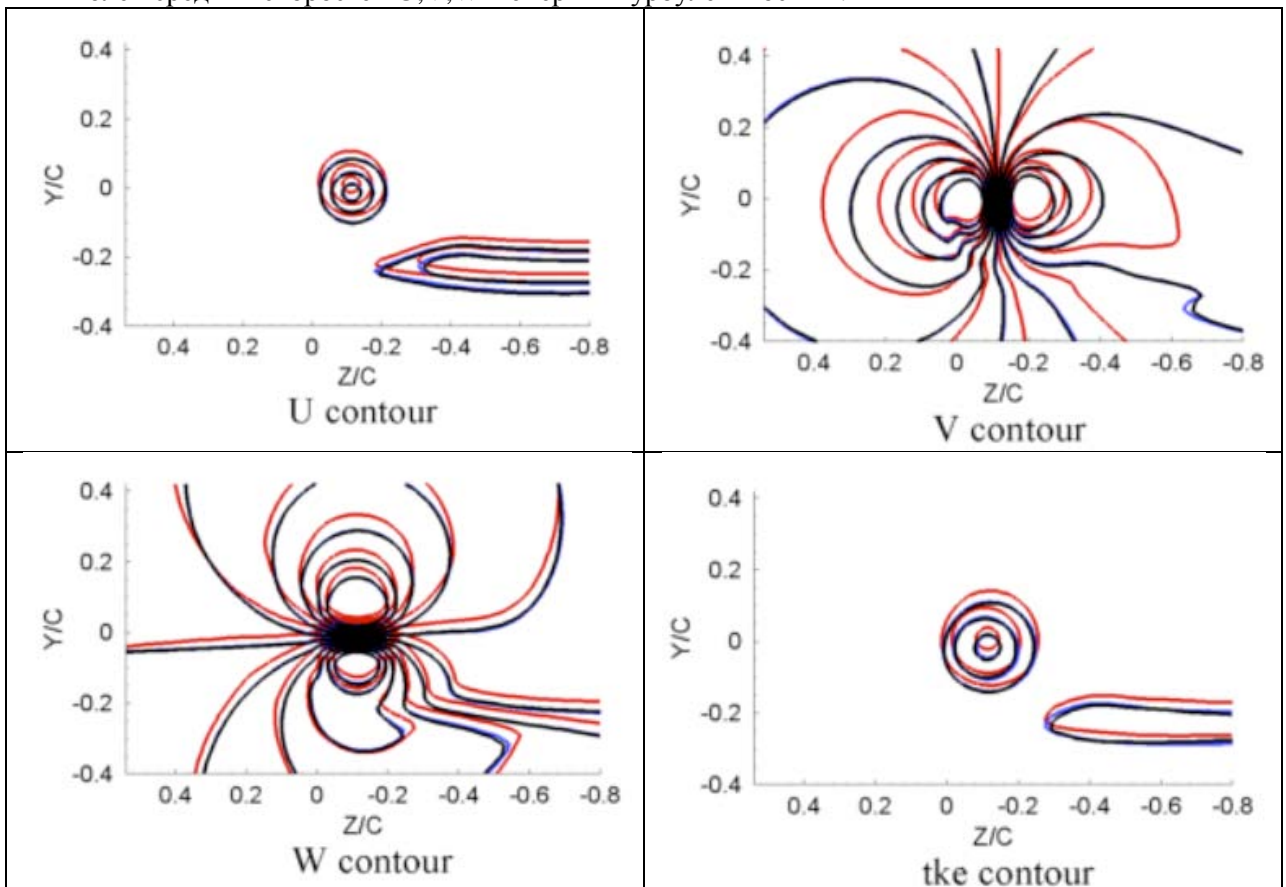


Рис.1. Изолинии поля скорости и энергии турбулентности. Красные изолинии – в канале, синий ($t=12^\circ\text{C}$) и черный ($t=25^\circ\text{C}$) – «свободный» полет

Сравнения полей статического давления в «канальном» и «свободном» потоках Хуангом не проводилось, однако из приближенного уравнения (часто используемого в теории вихревых следов)

следует, что именно вертикальная (по Y) компонента скорости V связана соотношением с изменением статического давления и, как нетрудно заметить, наибольшее расхождение именно по компоненте скорости V, т.е. стенки канала существенно влияют именно на поле статического давления p в вихревом следе.

Хуангом [Huang,2010] приводится сравнение опытных данных в канале с CFD-расчетом по модели турбулентности SST (версия SST не указана, заметим):

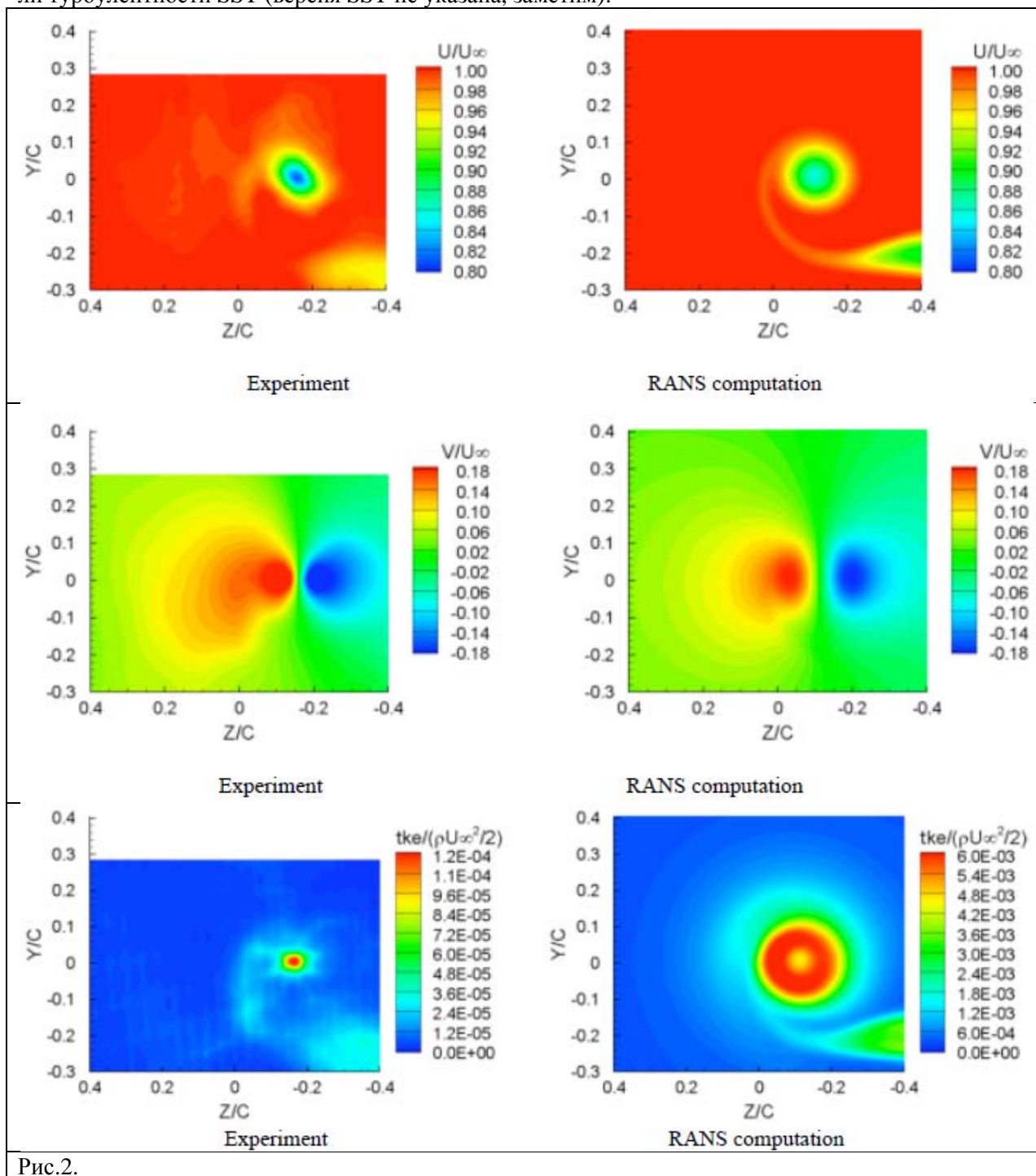


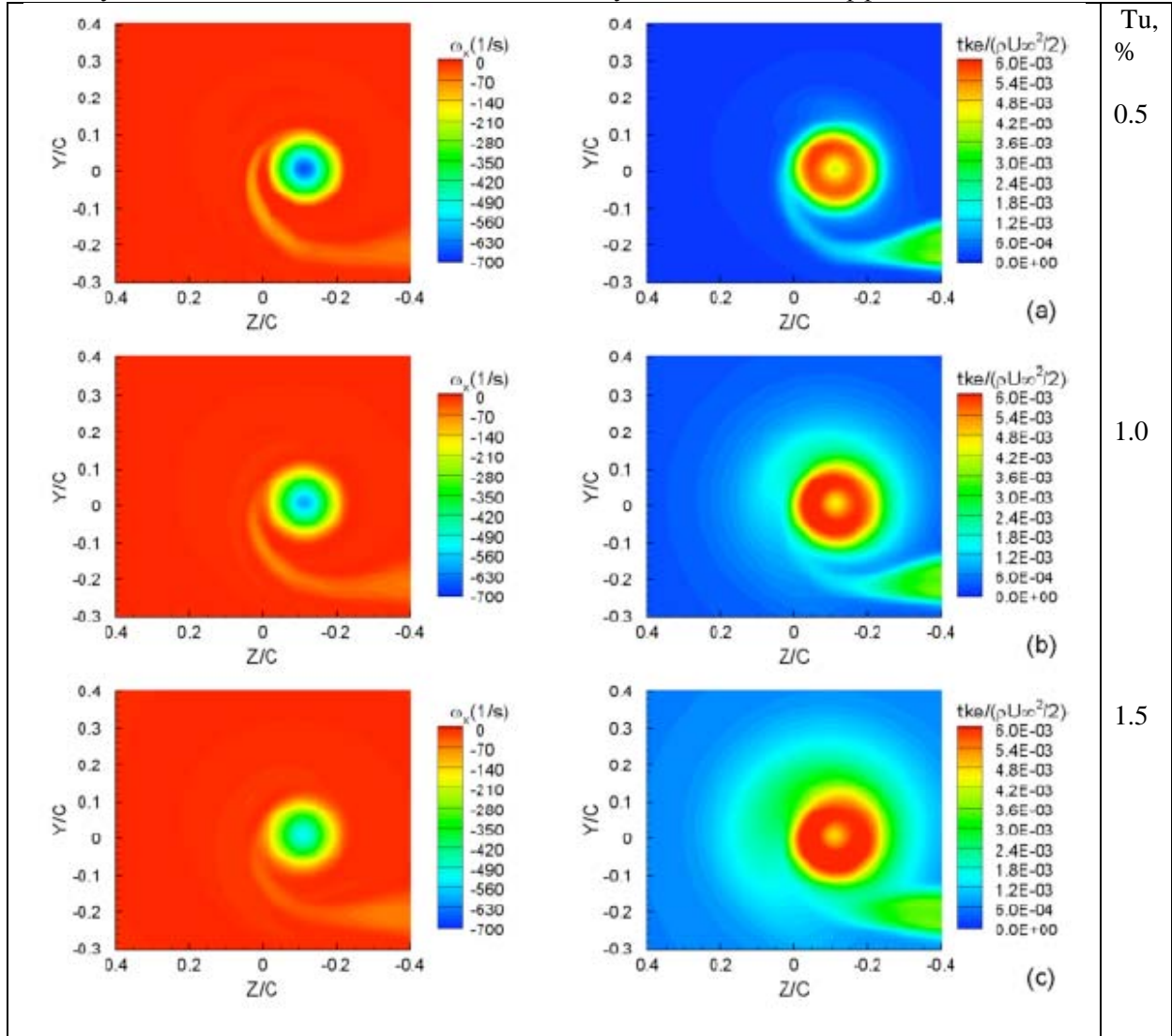
Рис.2.

По мнению Хуанга и Дурбана, показывает лишь расхождение между опытом и расчетом по модели SST лишь в поле энергии турбулентности - рисунок показывает, что турбулентная кинетическая энергия к не хорошо предсказана. Более внимательный анализ позволяет сделать несколько парадоксальный вывод – в опыте дефект продольной скорости U больше, в уравнение переноса U входит градиент давления, форма «дефекта» скорости ΔU в ядре вихревого следа близка к форме изменения статического давления в ядре, следовательно, в риторическом вопросе «яйцо или курица», следует отдать предпочтение «ответственности» за формирование структуры вихревого следа именно дефициту продольной скорости ΔU , который «формирует» поле статического давления, из

которого «порождается» (см. «упрощенное» уравнение переноса V) поле вертикальной скорости V .

Эксперимент Хуанга показывает и высокую интенсивность в центре вихря. Вычисление показывает приблизительно в 50 раз более высокую величину k и в более крупной области. Причина этого несоответствия расследуется – признаются Хуанг и др..

Определенный интерес представляет и влияние входной интенсивности турбулентности Tu на структуру вихревого следа. В опыте входная интенсивность составляла 1 %. Уменьшение Tu к 0.5 % или увеличение Tu к 1.5 % имело, по мнению Хуанга, небольшой эффект на поток:



Однако с этим утверждением можно согласиться лишь в части уровня энергии турбулентности k в ядре вихревого следа, но не в уровне завихренности, «ответственной» за генерацию в ядре вихря – при $Tu=0.5\%$ $\omega_{min} \cong 700$, но при $Tu=1.0\%$ $\omega_{min} \cong 550$, а при $Tu=1.5\%$ уже $\omega_{min} \cong 400$ всего лишь на небольшом расстоянии от конца хорды $x/c=3$, на котором маловероятен «размыв» ядра вихря поперечной турбулентной диффузией. Вероятно, только анализ всех членов уравнения переноса энергии k позволит прояснить картину такой «некоррелированности» завихренности ω с энергией турбулентности k и объяснит столь существенное влияние внешней турбулентности Tu_∞ на завихренность ω_x именно в ядре вихревого следа.