

Численное моделирование эволюции турбулентного следа под воздействием сильного неблагоприятного градиента давления с использованием зонной RANS-LES модели

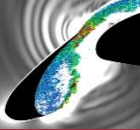
Гусева Е.К., Шур М.Л., Стрелец М.Х., Травин А.К.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

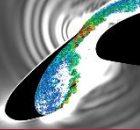


Russian Supercomputing Days

international supercomputing conference

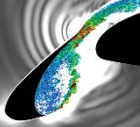


1. Введение
2. Рассматриваемое течение
3. Используемый суперкомпьютер
 - Торнадо (СПбПУ)
4. Описание используемого кода
 - Общая характеристика
 - Массивно-параллельная версия кода
5. Размер задачи и используемые вычислительные ресурсы
6. Результаты расчетов
7. Заключение



- Турбулентные течения - наиболее распространенная форма движения жидкостей и газов
 - Надежный расчет их характеристик является исключительно важной задачей для авиации, энергомашиностроения и других областей
- Инженерные расчеты турбулентных течений проводятся с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS)
 - Экономичный подход
 - Низкая точность расчета некоторых важных типов течений
 - ❖ Яркий пример – развитие турбулентных следов в условиях неблагоприятного градиента давления
- Даже самые лучшие RANS модели не обеспечивают требуемой точности характеристик обтекания крыла самолета для режимов взлета и посадки.
 - Неспособны описать эволюцию аэродинамических следов предкрылка и основного крыла под воздействием сильного неблагоприятного градиента давления, возникающего при обтекании закрылка





- Для разработки усовершенствованной модели турбулентности нужны данные:
 - эксперимента
 - высокоточных вихреразрешающих подходов, требующих привлечения значительных вычислительных ресурсов

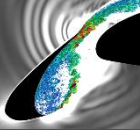


- Российско-Германский проект:



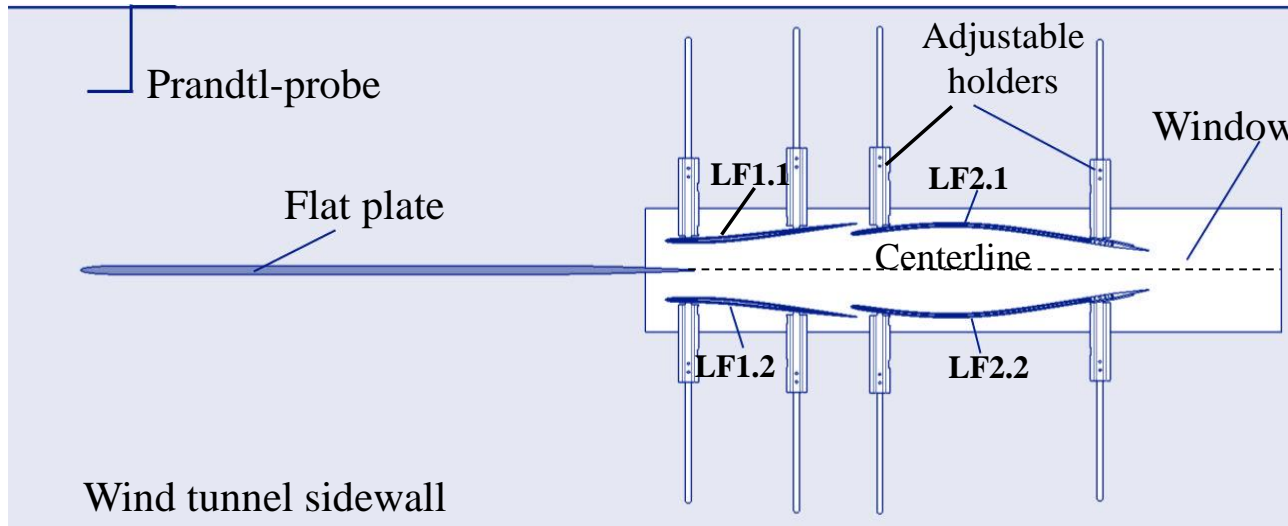
- изучение физического механизма и разработка адекватных методов моделирования аэродинамических следов, подверженных воздействию неблагоприятного градиента давления

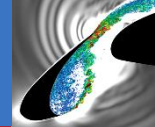
- В докладе представлены результаты вычислительной части этого проекта



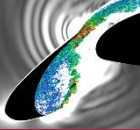
Рассматриваемое течение

- След за плоской пластиной, развивающийся в условиях неблагоприятного градиента давления
 - Создаваемого тонкими аэродинамическими профилями
 - Условия соответствуют эксперименту, параллельно проводящегося в Техническом университете Брауншвейга
- Параметры:
 - $Re = 3.2 \cdot 10^6$
 - $L = 1.058m$
 - $U = 25m/s$



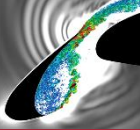


РСК Кластер Tornado

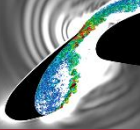


- Содержит 612 узлов с 2 процессорами Xeon E5-2697v3 (22 nm)
 - 14 ядер
 - 2.6 GHz
 - 64 Gb RAM
- Узлы объединены высокоскоростной сетью InfiniBand

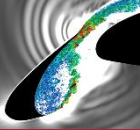




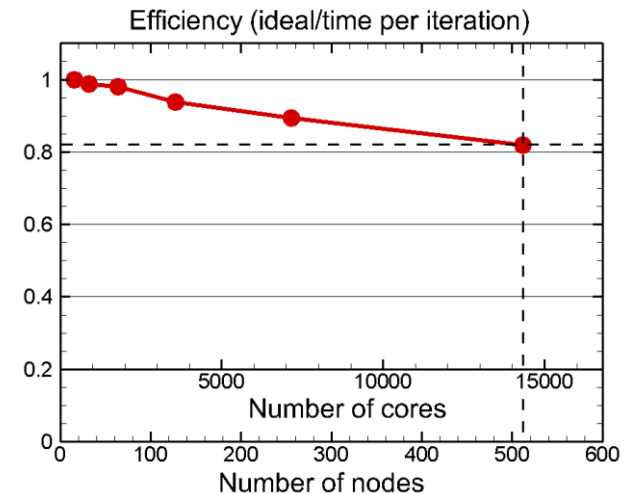
Вычислительный код

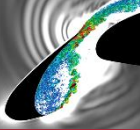


- Код NTS (Numerical Turbulence Simulation) разработан в СПбПУ для расчета турбулентных течений на основе различных подходов к моделированию турбулентности
 - Конечно-объемная аппроксимация исходных уравнений Навье-Стокса
 - Структурированные перекрывающиеся многоблочные сетки типа Chimera
 - Высокий порядок аппроксимации конвективных членов
 - Низкая диссипативность вычислительного алгоритма, обеспечивающая высокую точность вычислений
- Код прошел всестороннее тестирование путем сопоставления его результатов с экспериментом и с результатами других кодов для аэродинамических расчетов
 - CFL3D код NASA, GGNS и BCFD коды компании Boeing, TAU код DLR, коммерческие коды ANSYS-CFX и ANSYS-FLUENT

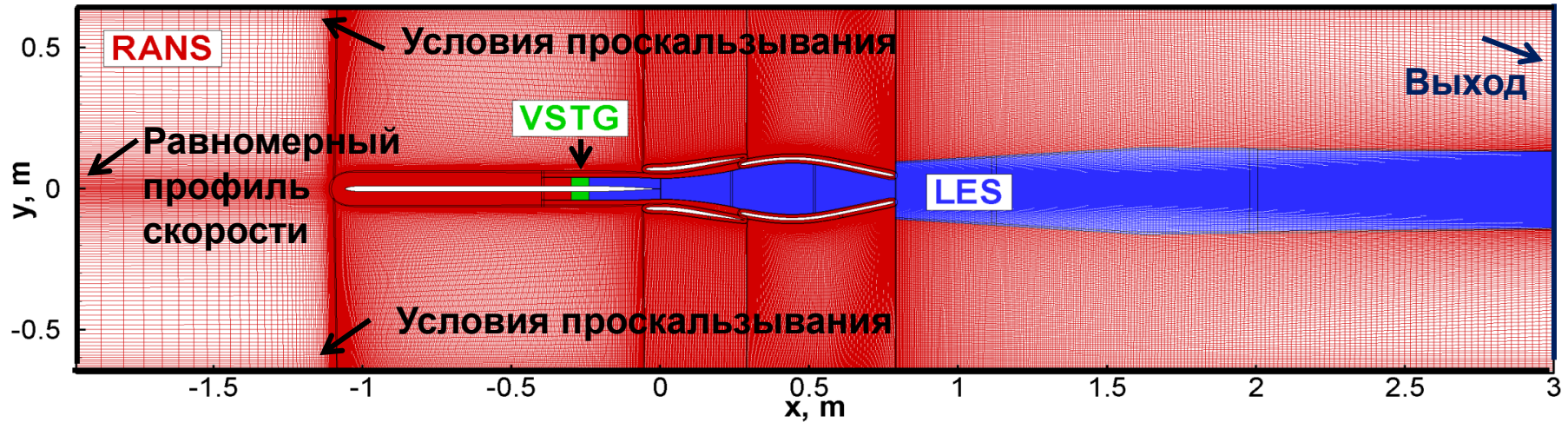
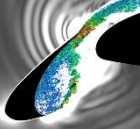


- Гибридная MPI/OpenMP параллелизация позволяет эффективно использовать ресурсы кластера Tornado
 - MPI технология используется для параллельных вычислений отдельных сеточных блоков
 - OpenMP используется для дополнительной параллелизации вычислений внутри каждого из блоков сетки
- Эффективность OpenMP параллелизации составляет порядка 70%
 - при использовании 28 OpenMP процессов ускорение около 20 раз
- Эффективность MPI параллелизации более 90%:
 - Weak Scalability Test – WST с использованием от 4 до 128 узлов
- Минимальный размер сеточных блоков: 50 000-100 000 ячеек
 - Дальнейшее уменьшение размеров блока приводит к снижению эффективности параллелизации

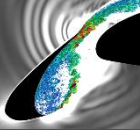




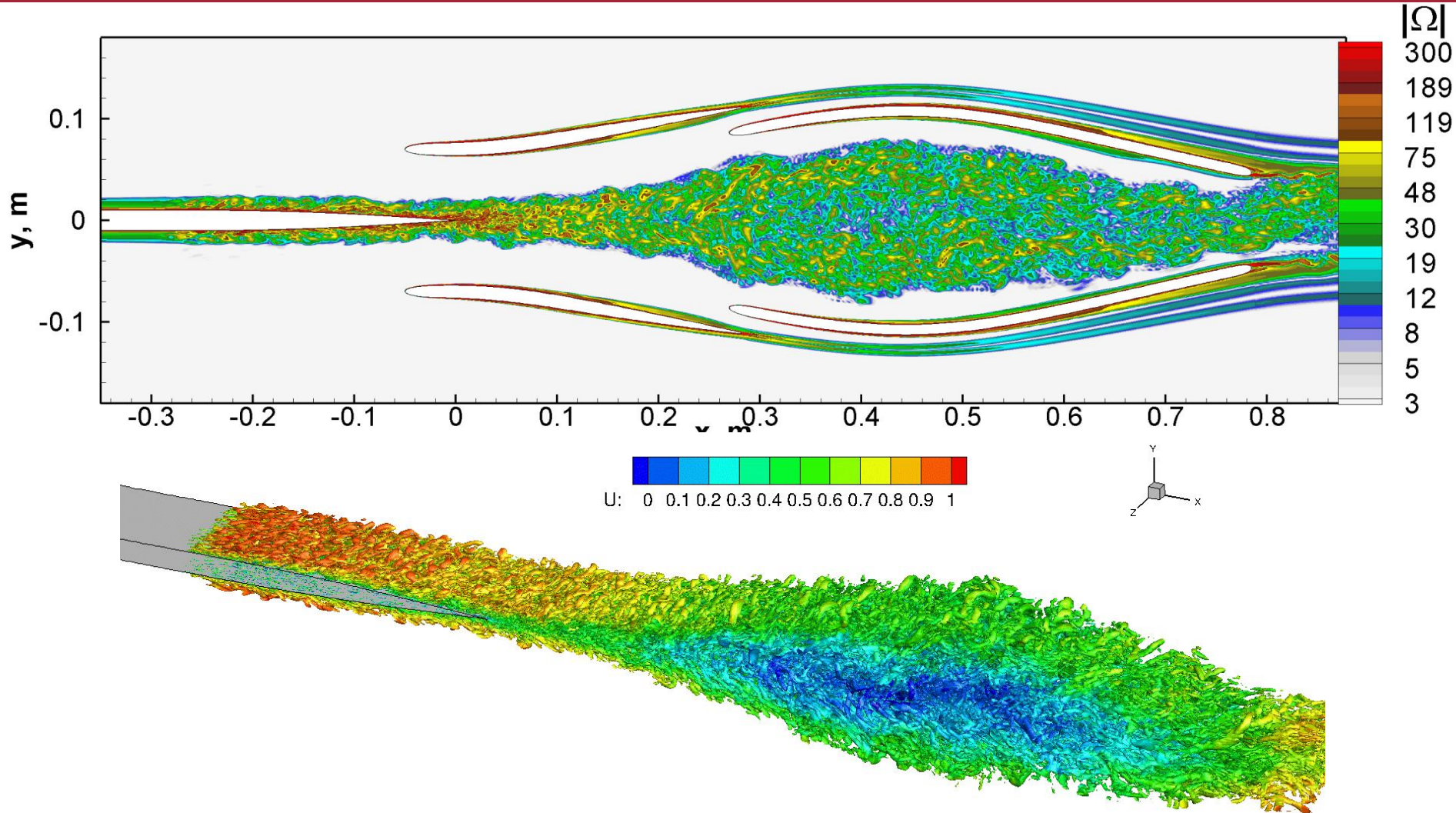
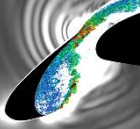
Размер задачи и используемые ресурсы



- Расчетная область разбита на 24 перекрывающихся блока
- Сетки удовлетворяют требованиям для вихреразрешающих подходов
 - Число ячеек – до 60 М
- Полное физическое время расчета составляет около $15(L/U_0)$
- Шаг по времени $5.0 \cdot 10^{-4} (L/U_0)$ обеспечивает выполнение $CFL < 1$
 - 20 внутренних итераций на каждом шаге по времени
 - $6 \cdot 10^5$ итераций для получения решения
- Время расчета на 11 узлах кластера Торнадо:
 - ~ от 300 до 600 астрономических часов

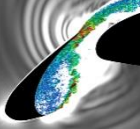


Результаты расчетов

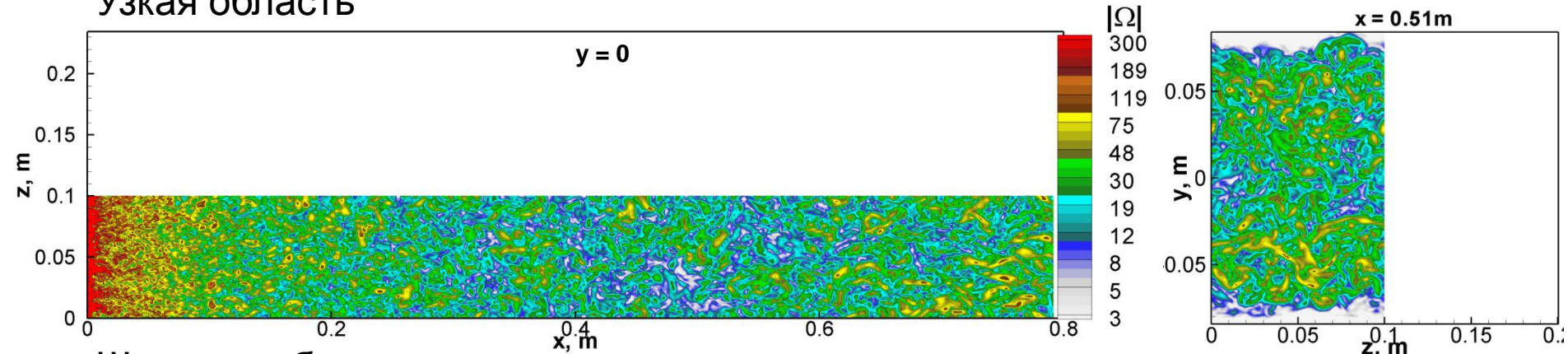


- Визуализация течения позволяет проследить эволюцию структуры турбулентности в пограничном слое и следе, хорошо видно расширение следа и наличие области заторможенного течения

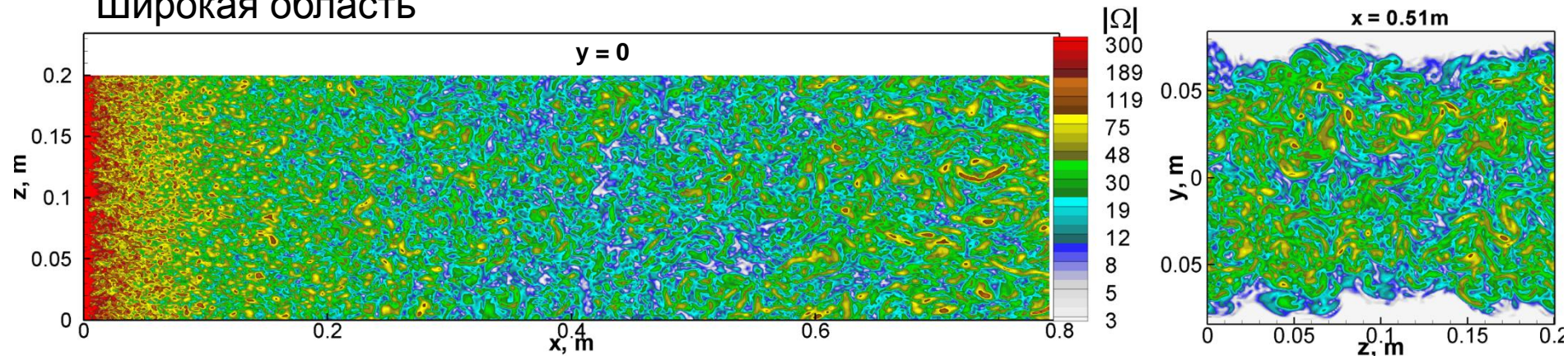
Влияние ширины расчетной области (1 из 2)



Узкая область

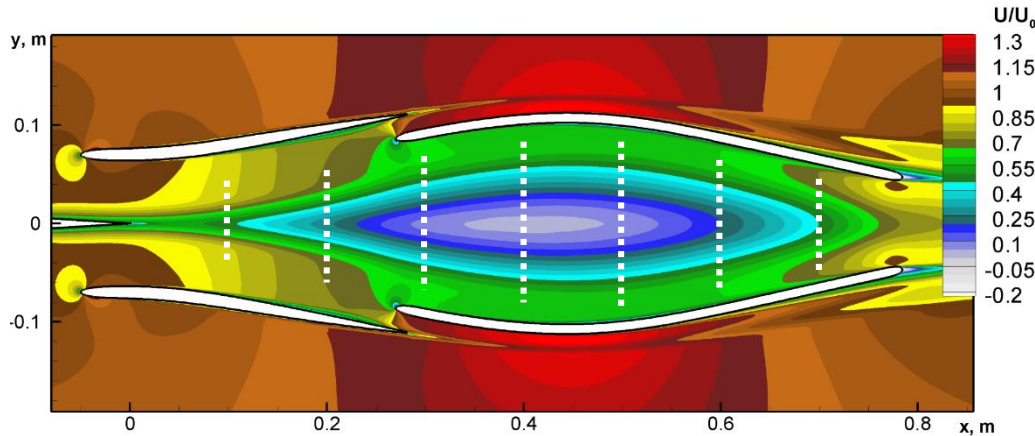
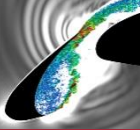


Широкая область



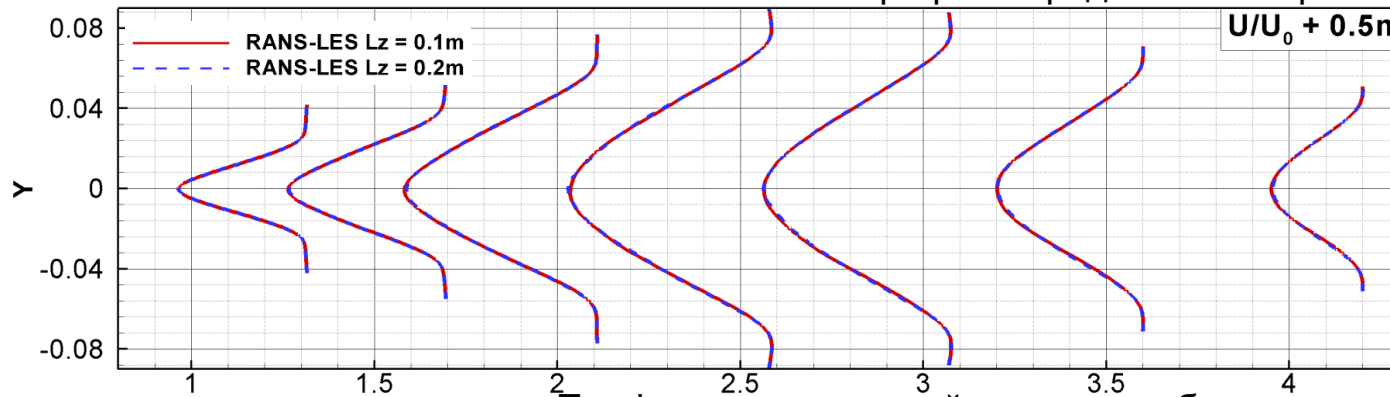
- В широкой области не наблюдается крупных трехмерных структур, которые не разрешались бы в узкой области
 - Оправдывает использование узкой области

Влияние ширины расчетной области (2 из 2)

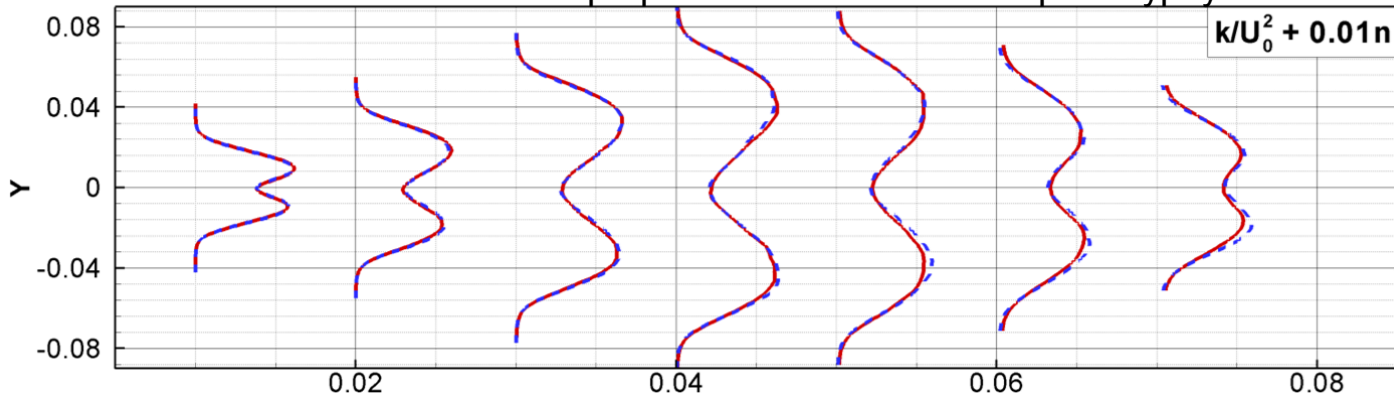


- Как средние, так и пульсационные характеристики следа совпадают
 - Размер области $L_z = 0.1\text{ м}$ может быть использован в дальнейших расчетах

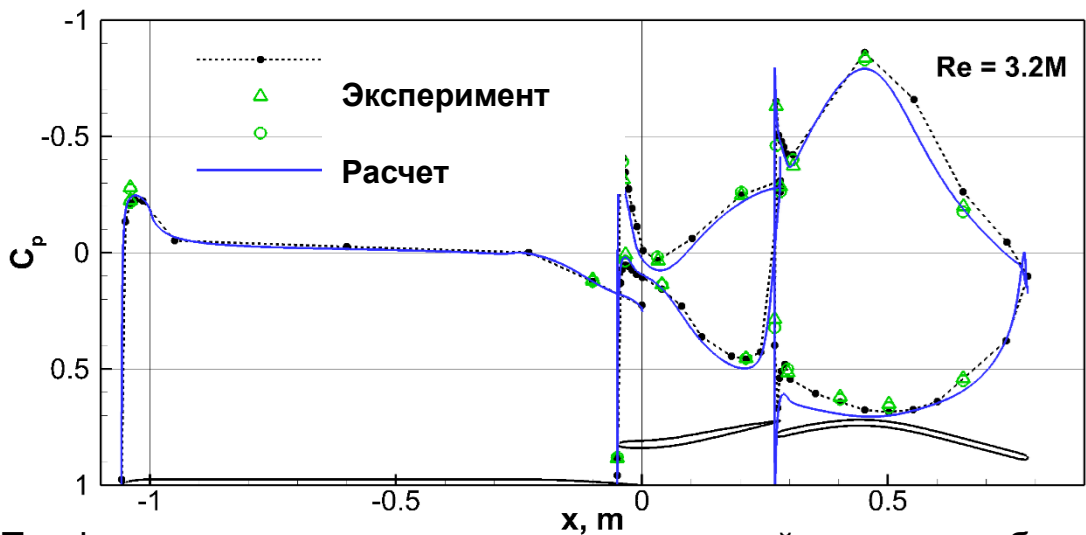
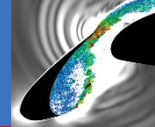
Профили продольной скорости



Профили кинетической энергии турбулентности

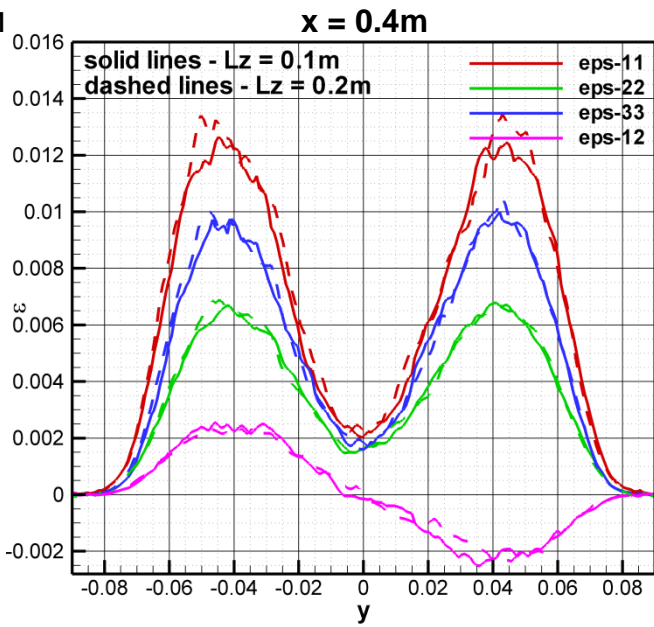
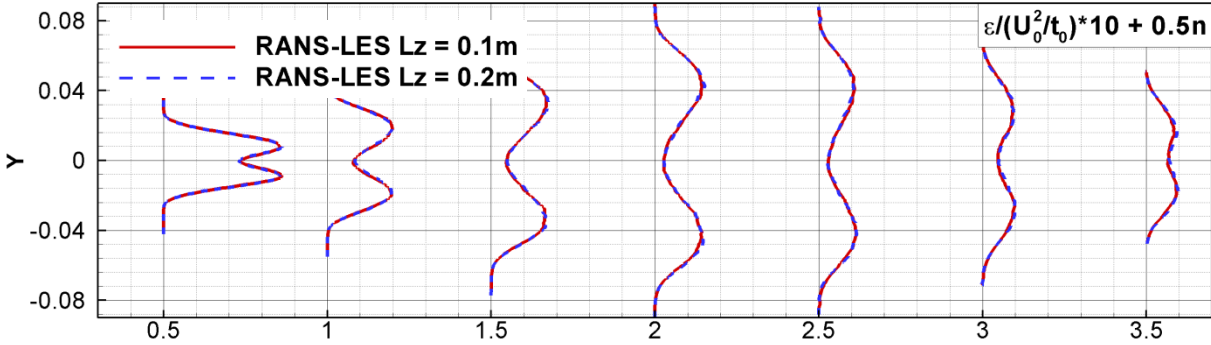


Основные результаты

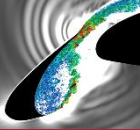


- Хорошее совпадение предварительных экспериментальных данных с расчетными
 - Достоверность результатов

Профили скорости диссипации кинетической энергии турбулентности



- Расчет позволяет получить скорость диссипации кинетической энергии турбулентности
 - Невозможно измерить в эксперименте
 - Эти данные нужны для разработки усовершенствованной RANS модели турбулентности



- Представлены результаты численных исследований эволюции турбулентного следа под воздействием неблагоприятного градиента давления, выполненных в рамках высокоточного вихреразрешающего подхода RANS-IDDES
- Расчеты выполнены с помощью массивно-параллельной версии NTS кода на высокопроизводительном кластере Торнадо СКЦ “Политехнический”
- Проведенные расчеты
 - Наглядно визуализируют структуру течения
 - Обеспечили получение достоверных результатов
 - Позволили получить турбулентные характеристики течения, недоступные из эксперимента
- В дальнейшем планируется проведение расчетов при различных экспериментальных условиях для создания надежной комбинированной базы данных, необходимых для калибровки и тестирования усовершенствованной RANS модели, способной предсказывать характеристики течений данного класса.

Спасибо за внимание!