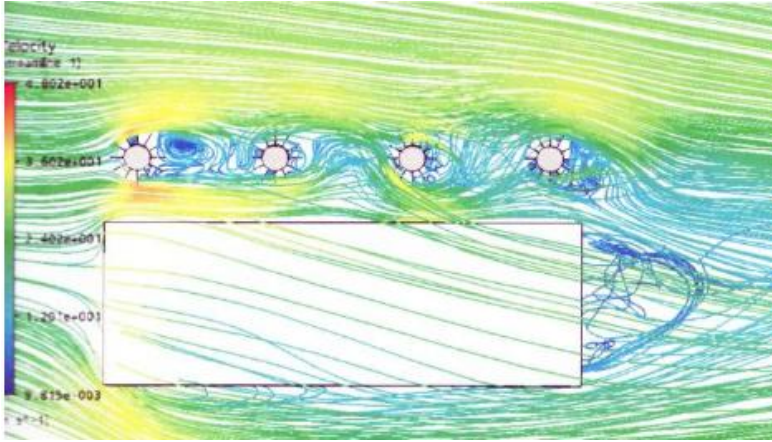


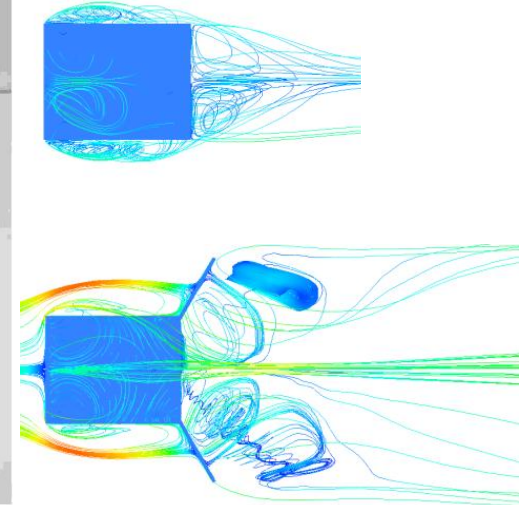
**Применение облачных вычислений  
в расчетах интерференционных  
эффектов при нестационарном  
вихревом обтекании летательных  
аппаратов**

# Актуальность исследуемой проблемы

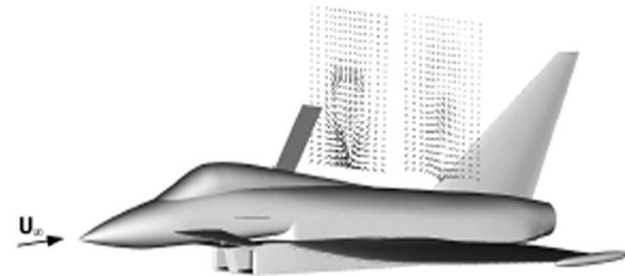
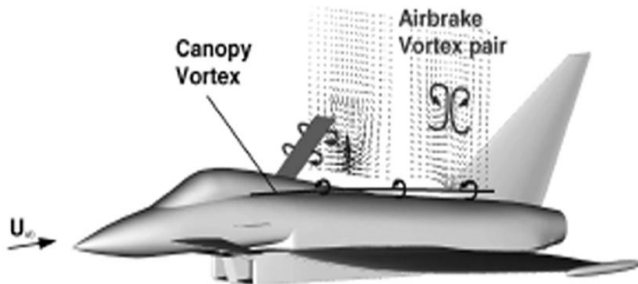
1) Влияние вихрей в вопросах предотвращения аварий зданий и сооружений



2) Обтекания грузов контейнеров на внешней подвеске летательных аппаратов

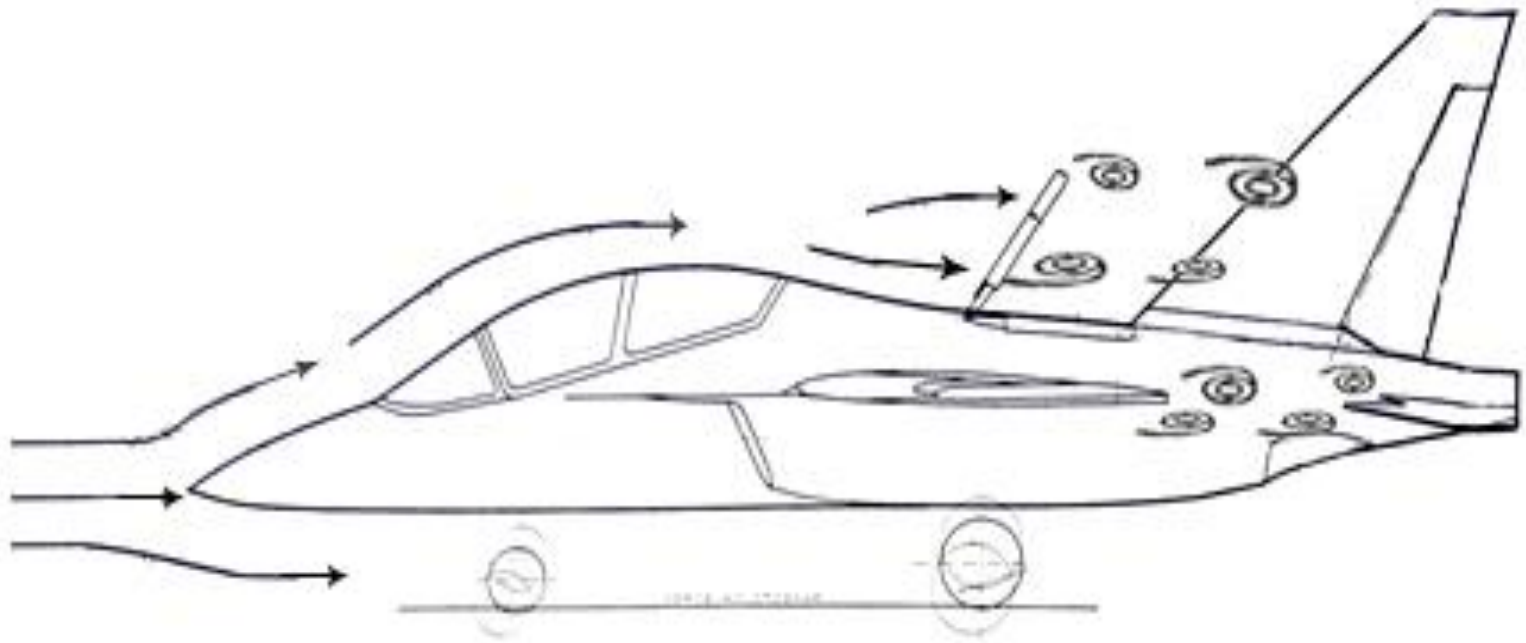


3) Влияние вихрей на аэродинамические характеристики стабилизирующих и управляющих поверхностей



# Постановка задачи

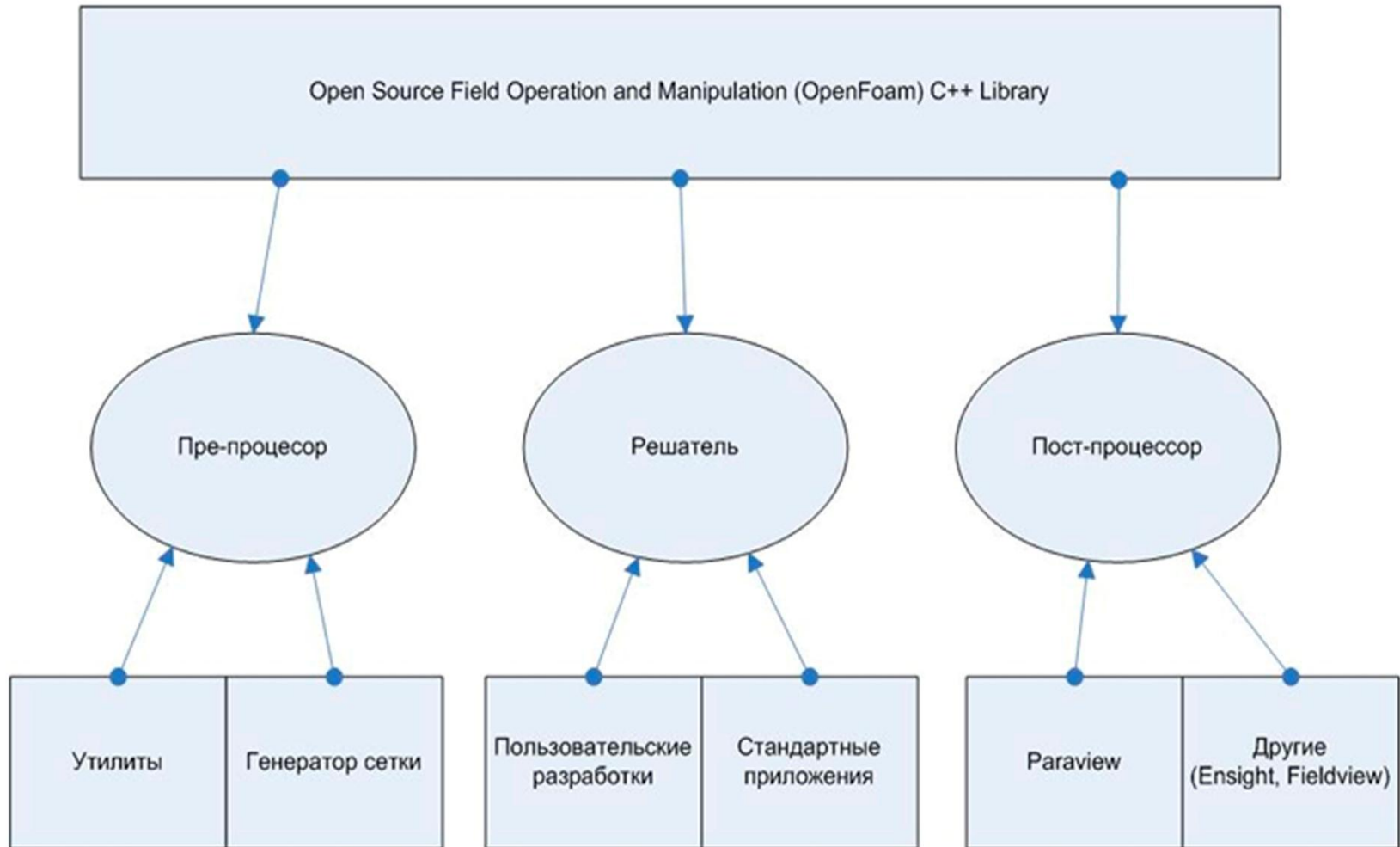
Рассмотрена задача о моделировании вихревых течений для случая обтекания тормозного щитка, расположенного перед килем летательного аппарата и воздействие вихрей на стабилизирующие поверхности летательного аппарата



# Описание пакета OpenFOAM

OpenFOAM — свободно распространяемое программное обеспечение для проведения численных расчетов.

OpenFOAM — объектно-ориентированная платформа, реализованная на языке программирования C++.



# Основной решатель pisoFOAM

pisoFoam – решатель для нестационарного несжимаемого турбулентного потока, использующий алгоритм решения PISO для связи уравнений скорости и давления.

1. Постановка граничных условий.
2. Решение дискретизированного уравнения количества движения для получения промежуточного поля скорости.
3. Вычисление массового расхода через грани ячейки
4. Решение уравнения для давления
5. Уточнение массового расхода через грани ячейки.
6. Уточнение скоростей на основе нового поля давлений
7. Обновление граничных условий.
8. Повторить с пункта 3 определенное число раз.
9. Увеличить шаг по времени и повторить с пункта 1.

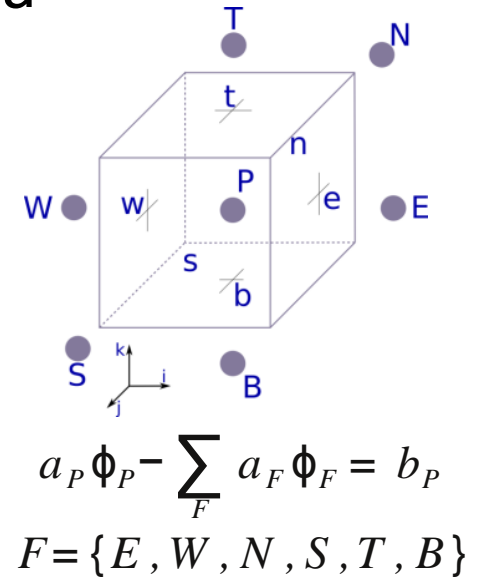
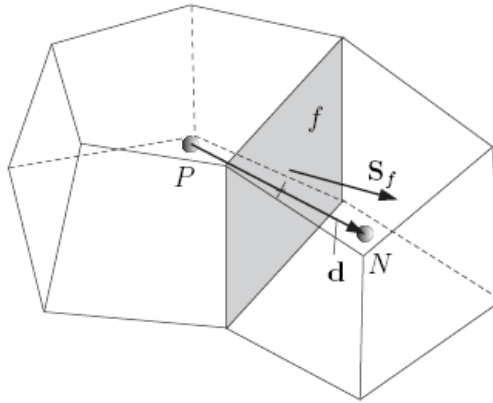
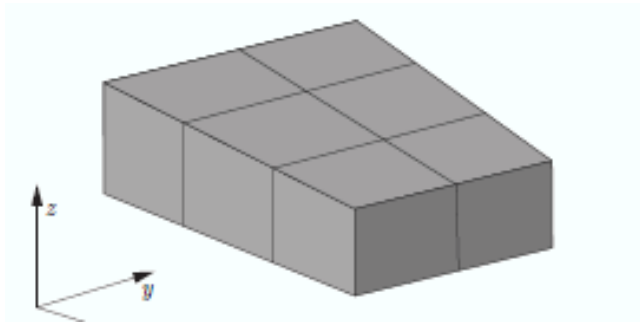
# Модель турбулентности LES (Моделирование крупных вихрей)

Метод моделирования крупных вихрей основан на двух предположениях.

Одно из них состоит в возможности разделения поля течения на движение крупных и мелких вихрей. Крупные вихри, находящиеся под прямым воздействием граничных условий и несущие в себе максимум рейнольдсовых напряжений, рассчитываются. Мелкомасштабная турбулентность считается изотропной и имеющей универсальные характеристики, а потому менее критичной и более поддающейся моделированию.

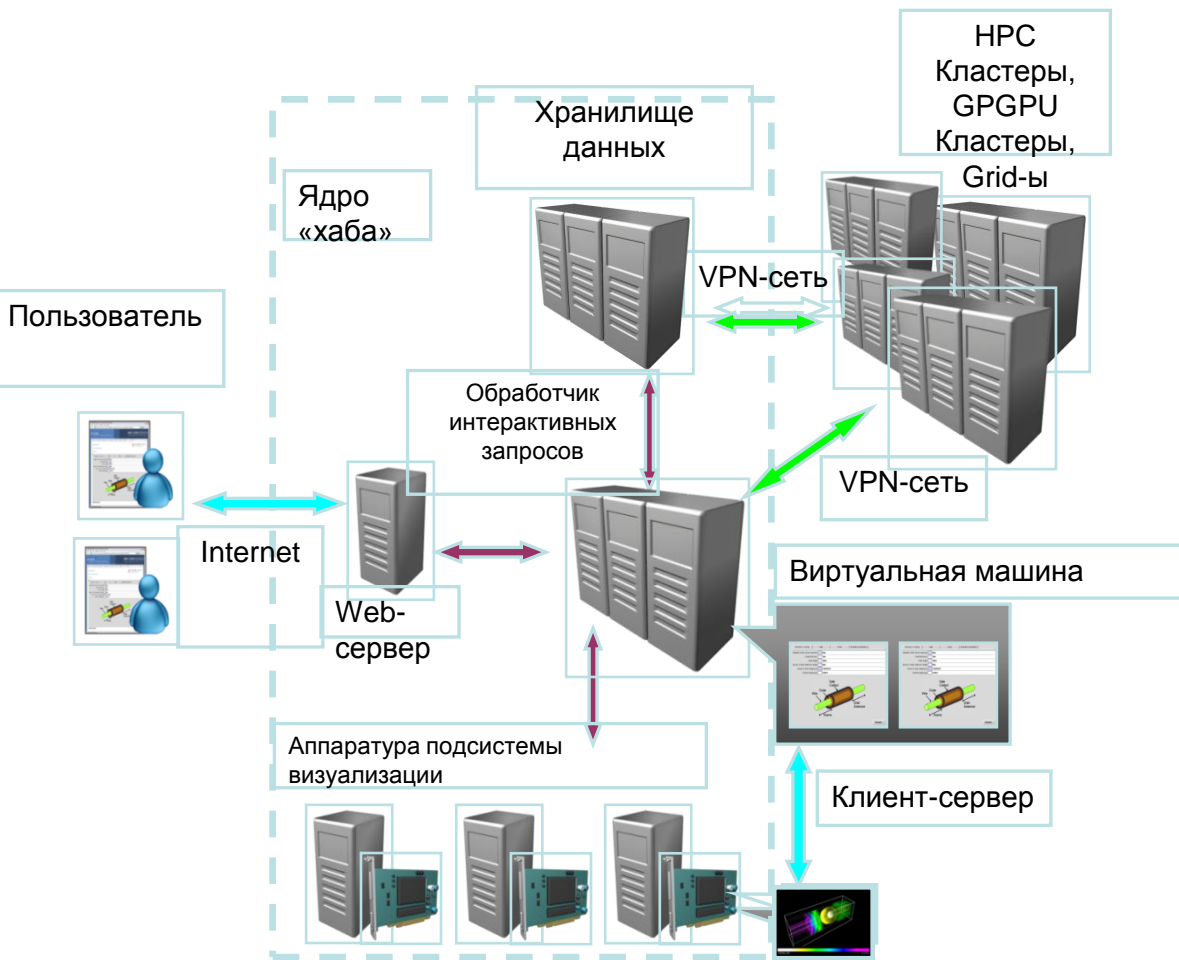
Другое предположение заключается в возможности аппроксимации нелинейных взаимодействий между крупными и мелкими вихрями только по крупным вихрям с использованием подсеточных моделей. Иначе говоря, принимается гипотеза о статистической независимости крупных и мелких вихрей

# Метод конечного объема



- 1) Декомпозиция расчетной области на ячейки
- 2) Запись законов сохранения для каждой ячейки в интегральной форме
- 3) Разложение функции в ряд Тейлора
- 4) Аппроксимация интегралов по объему и поверхности, применение формулы Остроградского-Гаусса
- 5) Линейная интерполяция функции для нахождения значений в центре грани
- 6) Итерационный метод решения СЛАУ (Метод бисопряженных градиентов RBiCG с предобуславливателем DILU)
- 7) Задание невязок и проведение расчета

# Применение облачных вычислений



1) Доступ к ресурсам  
(высокопроизводительные системы, хранилища)

2) Передача знаний (лекции, семинары, лабораторные работы)

3) Механизмы, поддерживающие деятельность сообществ профессионалов в специализированных областях

Интеграция открытых пакетов Salome/OpenFOAM/Paraview с системным программным обеспечением для проведения облачных вычислений.

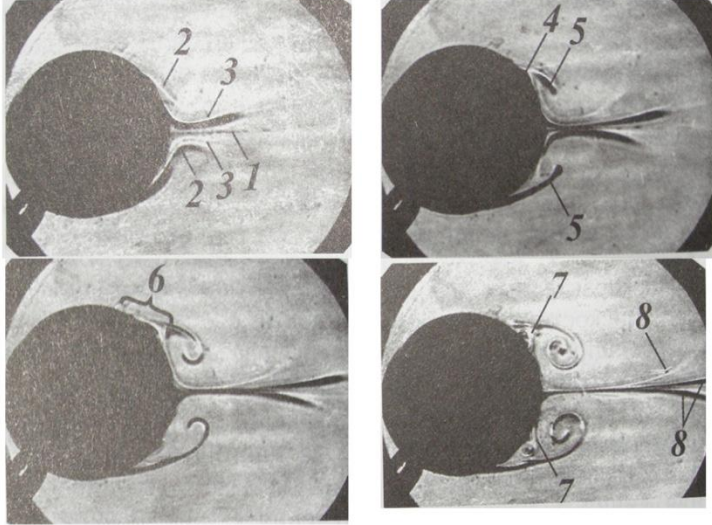


# Тестовые задачи

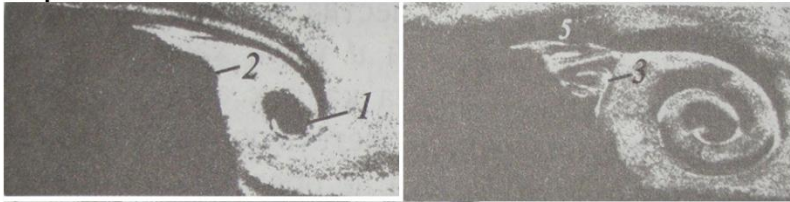
## 1) Цилиндрическое тело

\* Hoerner S.F. Fluid-dynamic drag. –Published by author, 1965. -455 с.

Головкин М.А., Головкин В.А. Вопросы вихревой гидромеханики. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. -264 с

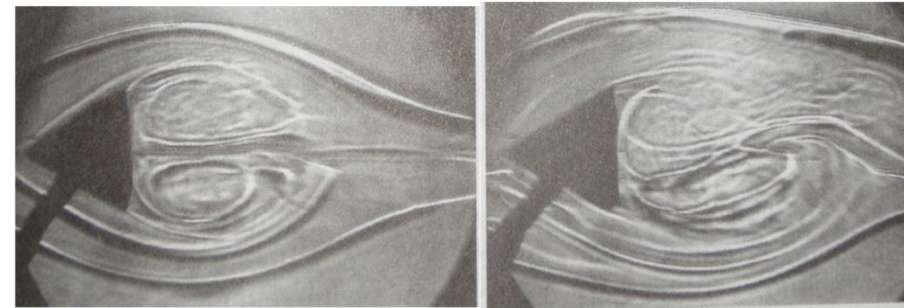
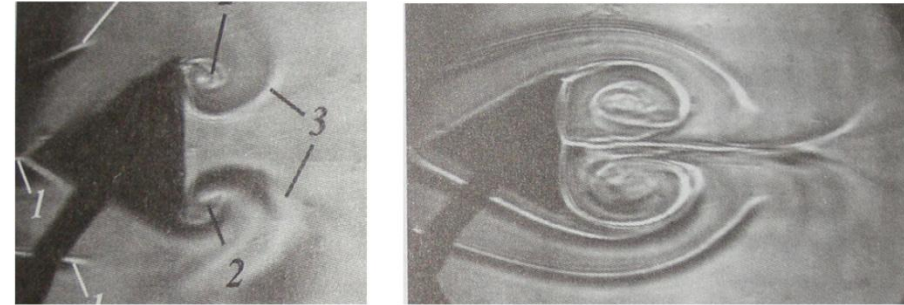


Возникновение и развитие начальной фазы отрывного течения  $Re = 14000$



Формирование вторичного и третичного течения при отрыве потока

## 2) Правильная треугольная призма



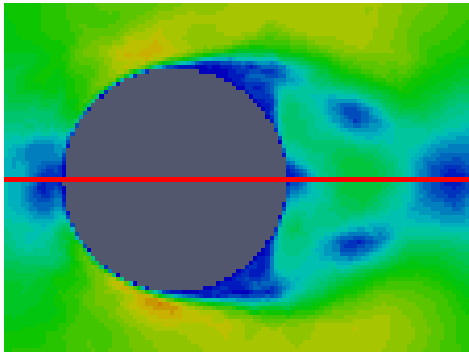
Возникновение и развитие отрывного течения  $Re=14000$

Экспериментальный коэффициент лобового сопротивления

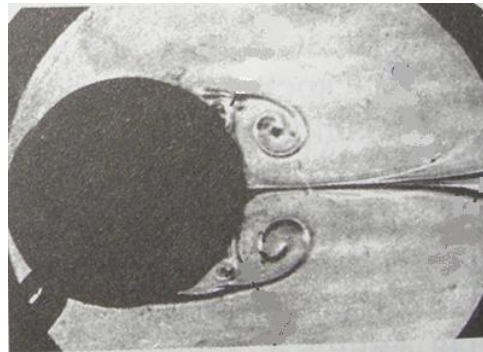
$$C_{xц} = 1.17$$

$$C_{xp} = 1.45$$

# Результаты расчета тестовых задач



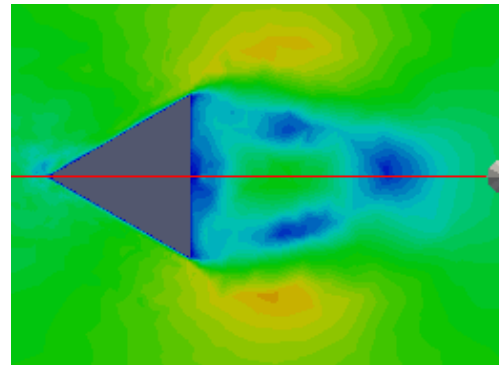
а



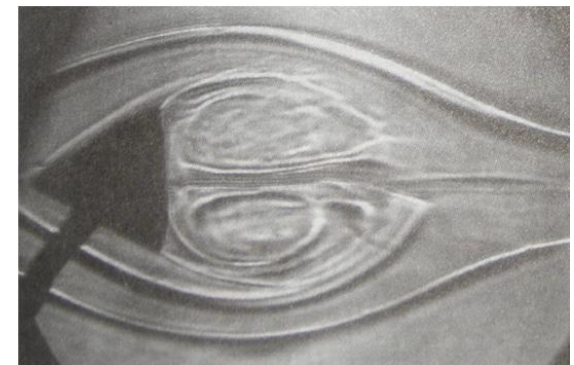
б

Вихревые структуры обтекания цилиндра: а- данные моделирования для времени  $t = 0.004\text{с}$ , б- экспериментальные данные.

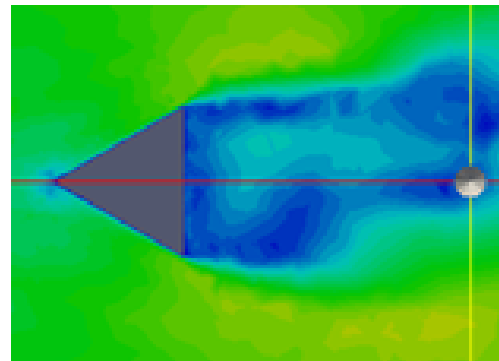
Вихревые структуры обтекания правильно треугольной призмы: а, б- данные моделирования для времени  $t = 0.005\text{с}$  и  $t = 0.035\text{с}$ , в,г – экспериментально полученные данные.



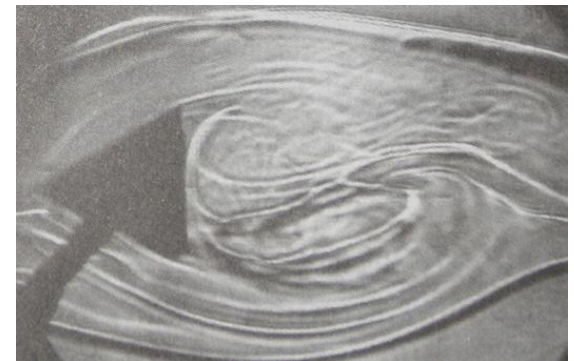
а



в

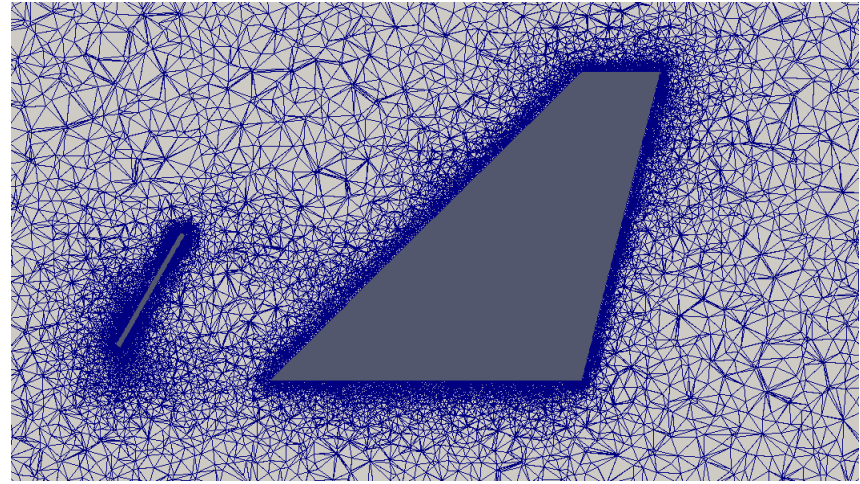


б

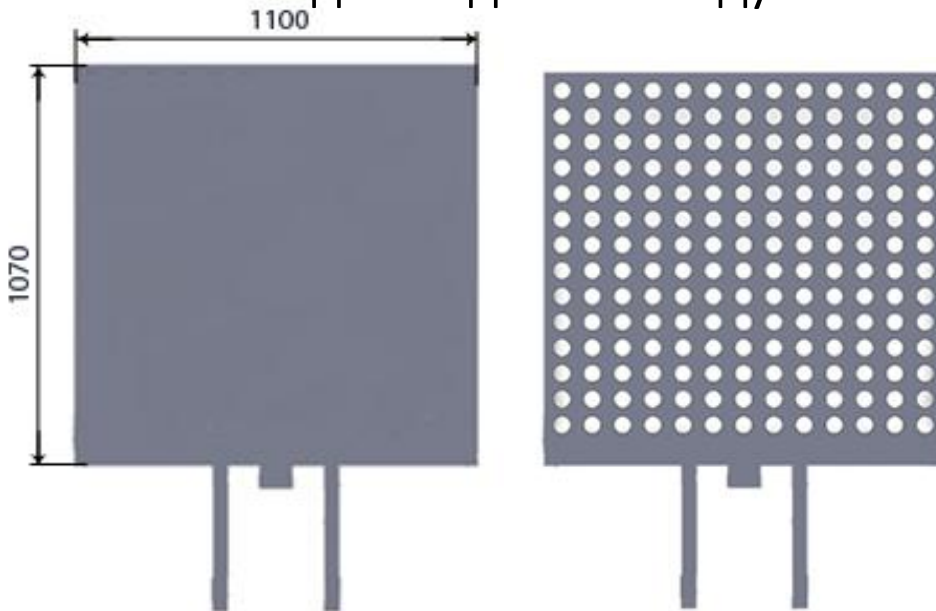


г

# Моделирование поставленной задачи обтекания тормозного щитка и кила самолета.



Модель исследуемой части ЛА в изометрической проекции (а), расчетная сетка для модели исследуемой части в плоскости  $xOy$



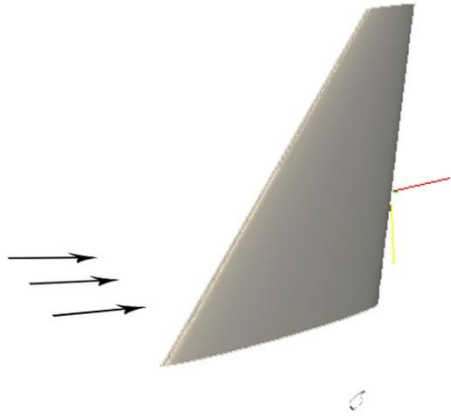
Максимальная сетка включала в себя около 2.5 млн. ячеек. Расчетный шаг по времени –  $10^{-5}$  секунд. Общее время счета – 0.5–1 секунды. Значения невязок равны  $10^{-5}$ .



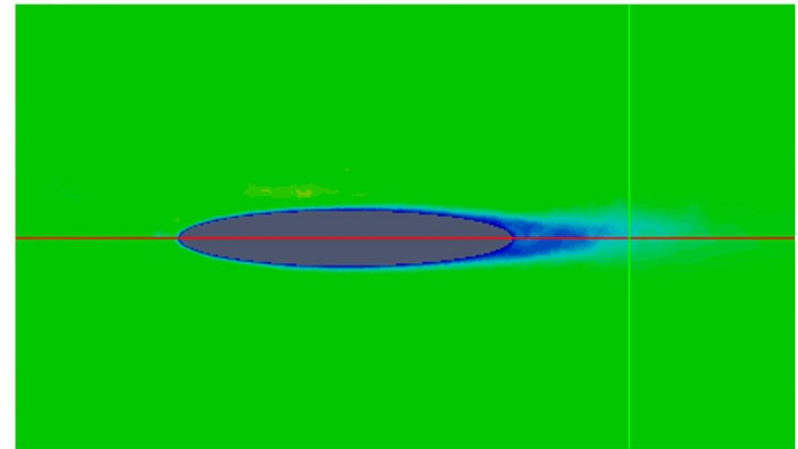
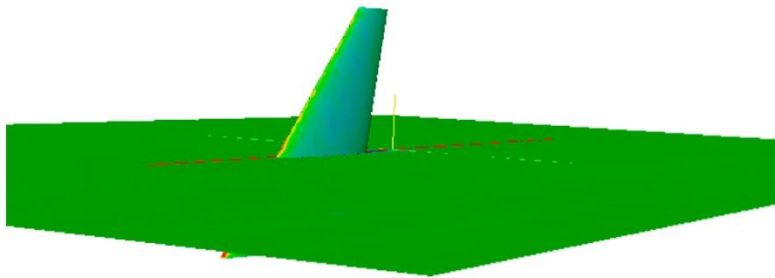
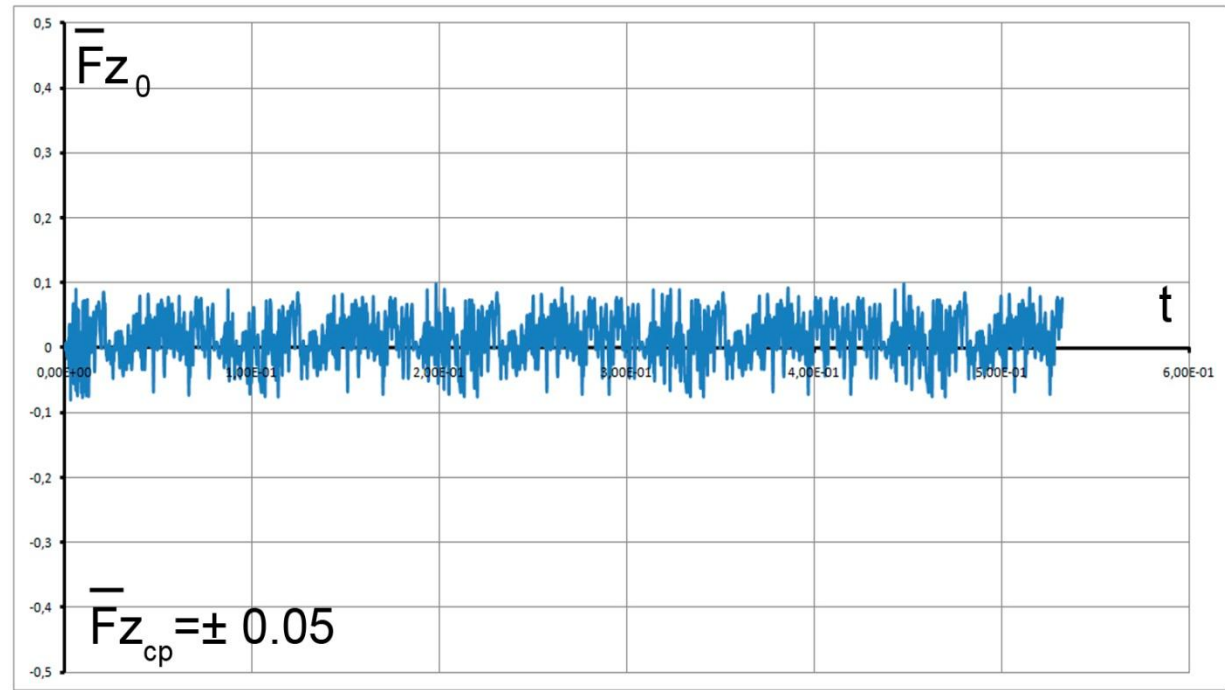
# Анализ полученных результатов

## 1) Обтекание кия без тормозного щитка

$\alpha = 0, \beta = 0$   
 $V = 100 \text{ м\csc}$

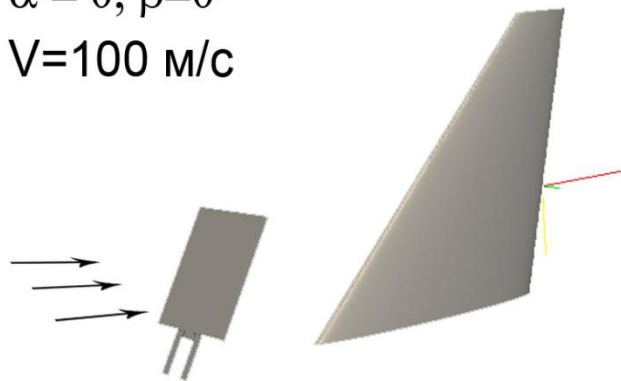


$$\bar{F}_z = \frac{Z}{qS} \quad S = 1 \text{ м}^2$$

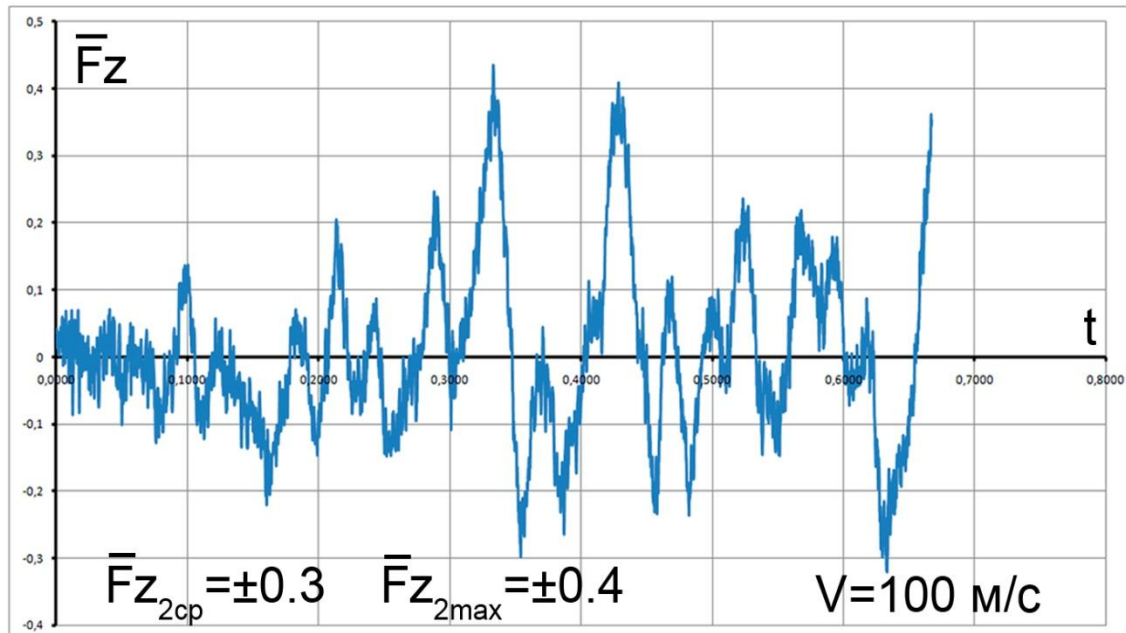


## 2) Обтекание кия со стандартным щитком $V = 100 \text{ м/с}$

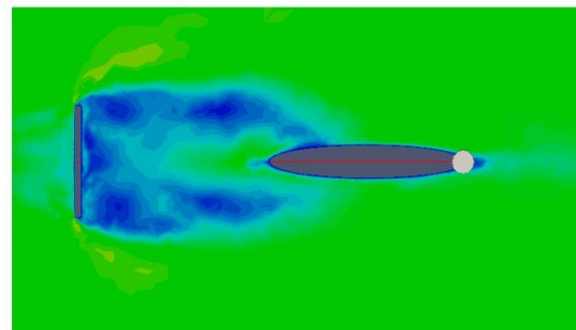
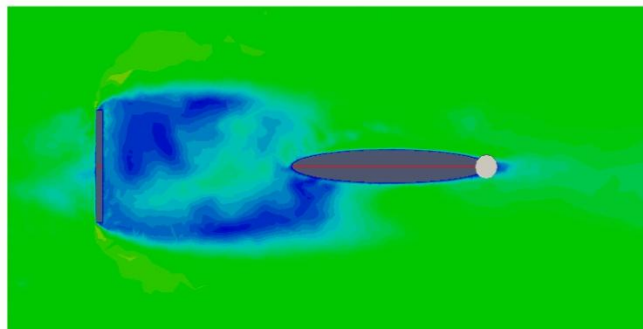
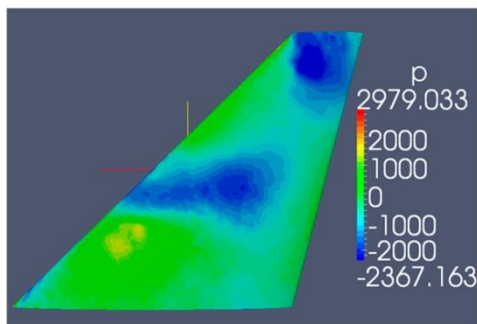
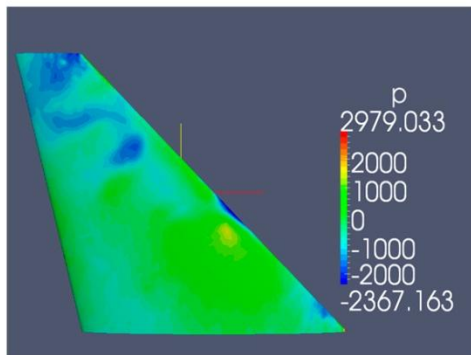
$\alpha = 0, \beta = 0$   
 $V = 100 \text{ м/с}$



$C_{x\text{щ}} = 1.06$     $C_{y\text{щ}} = -0.6$

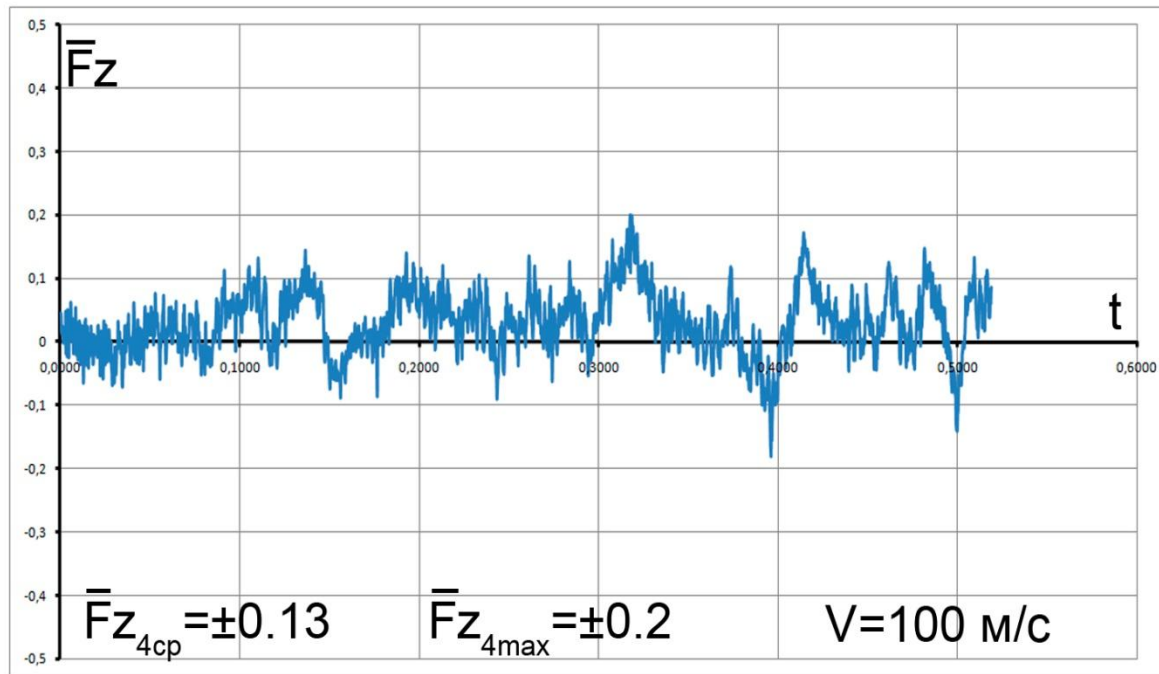
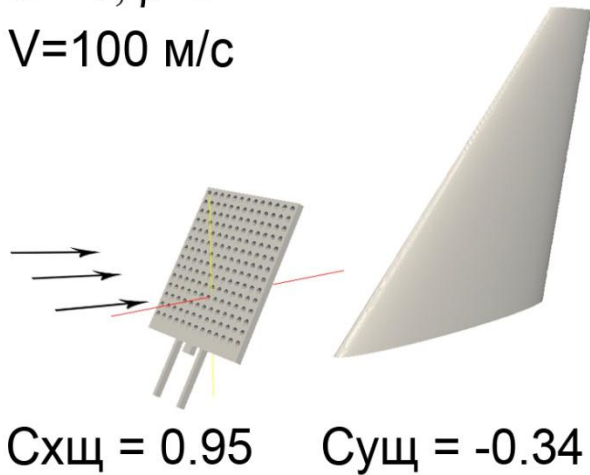


$t = 0.33 \text{ с}$

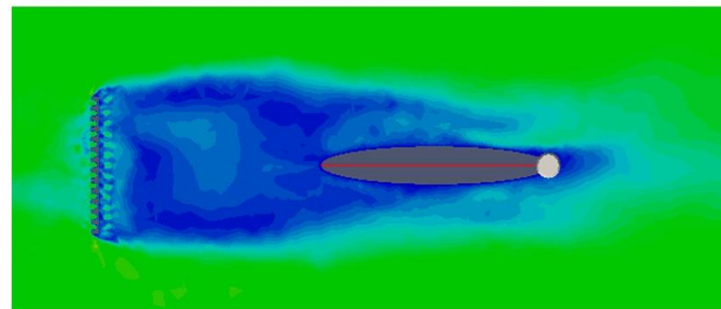
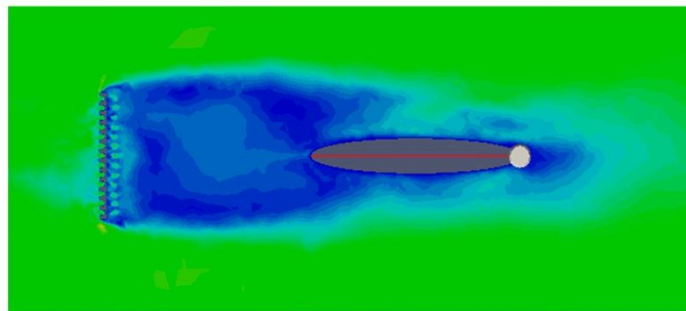
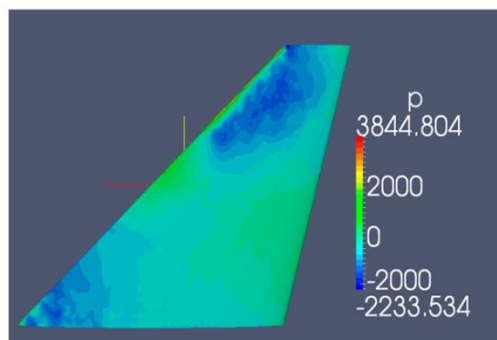
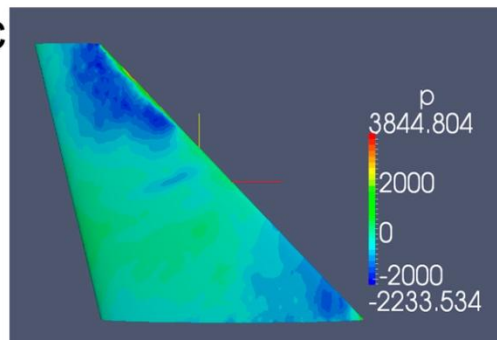


#### 4) Обтекание кия с перфорированным щитком

$\alpha = 0, \beta = 0$   
 $V = 100 \text{ м/с}$



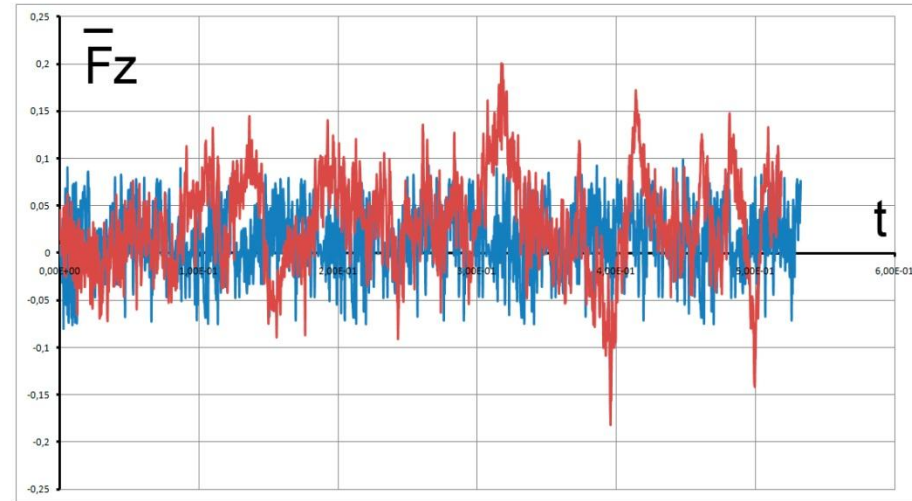
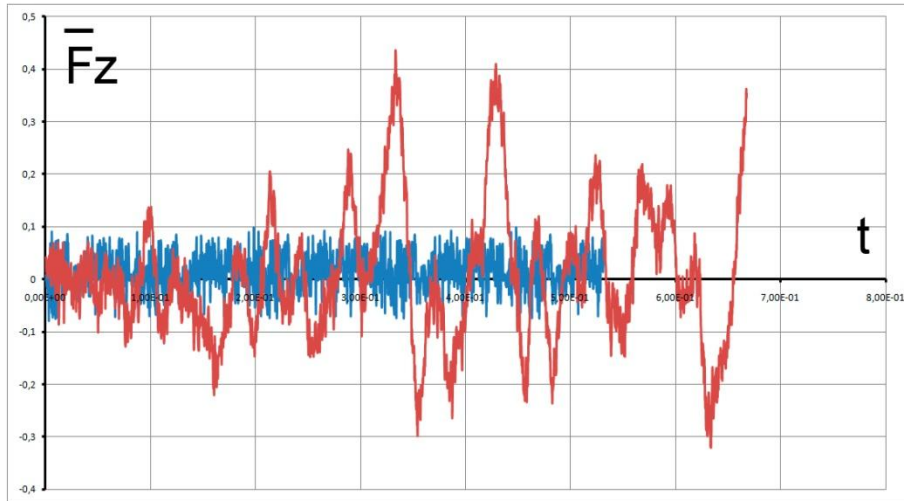
$t = 0.34c$



# Сравнение с экспериментом и перспективы дальнейших исследований

Динамические нагрузки на киль, вызванные тормозным щитком, в 7.2 раза больше

\*эксперименты были проведены в аэродинамической трубе Т-105 ЦАГИ



Направлением дальнейших исследований является снижение динамических нагрузок на киль путем различных вариантов перфорации тормозного щитка.

