



Численное моделирование турбулентного обтекания фюзеляжа вертолета с использованием различных подходов

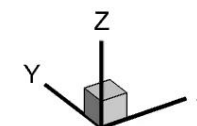
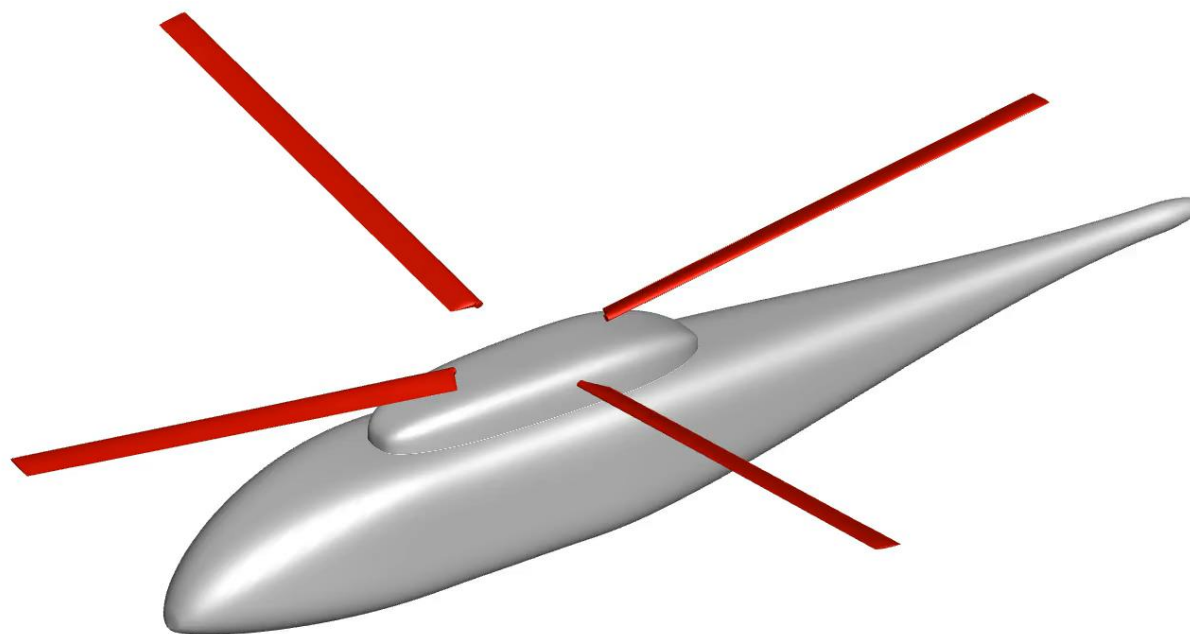
И.В. Абалакин, Н.С. Жданова, Т.К. Козубская, В.О. Цветкова (ИПМ РАН им. Келдыша, г. Москва),

В.А. Вершков (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва; ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский),

Л.Н. Кудрявцева (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва; ФИЦ ИУ РАН, г. Москва)



Зачем нужны различные подходы



Зачем нужны различные подходы

Есть подвижный объект и сеточный метод расчёта течения

Согласованная с границей сетка

Динамические сетки, в общем случае, с изменяемой топологией

Перекрывающиеся сетки (Chimera)

Метод погруженных границ (МПГ)

Замена математической модели:

уравнения Навье-Стокса → модифицированные уравнения Навье-Стокса

Метод погруженных границ (метод штрафных функций Бринкмана)

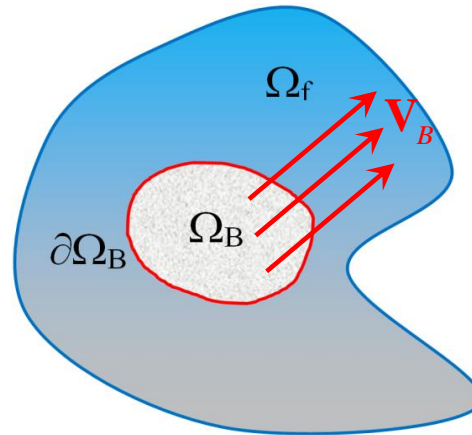
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial p_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \tilde{\mu} \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\chi}{\eta} \rho (u_i - V_{B,i})$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial (E + p) u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial u_j \tilde{\mu} \tau_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} - \frac{\chi}{\eta} \rho u_i (u_i - V_{B,i})$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v u_i}{\partial x_i} = D_v + G_v - C_{w1} f_w \left(\frac{v}{d} \right)^2 - \frac{\chi}{\eta} \rho v.$$

$$\chi = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} \in \Omega_B \cup \partial\Omega_B \\ 0, & \mathbf{x} \in \Omega_f \end{cases} \quad \eta \ll 1 \text{ — штрафной параметр}$$



Для несжимаемой жидкости:

$$\|\mathbf{u}_{MNS} - \mathbf{u}_{NS}\| = O(\sqrt{\eta}) \quad (\text{Angot, 1999})$$

Релаксация с порядком $\exp(-t/\eta)$ решения для скорости и эффективной вязкости к условиям Дирихле

$$\mathbf{u}|_B = \mathbf{V}_B + O(\sqrt{\eta}), \quad v|_B = O(\sqrt{\eta})$$

$\mathbf{u}|_{\Omega_B} \neq 0$ в полосе шириной

$$\delta = \sqrt{\frac{\eta}{\text{Re}}} \text{ внутренний «пограничный слой»}$$

Метод погруженных границ (метод штрафных функций Бринкмана)

Сила действующая на тело

$$\mathbf{F} = \int_{\Omega_B} \frac{\partial \rho \mathbf{u}_B}{\partial t} dV + \int_{\Omega_B} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_B \otimes \mathbf{u}_B) dV + \frac{1}{\eta} \int_{\Omega_B} \rho (\mathbf{u}_\eta - \mathbf{u}_B) dV$$

$$\mathbf{u}_B = \text{const} : \quad \mathbf{F} = \frac{1}{\eta} \int_{\Omega_B} \rho (\mathbf{u}_\eta - \mathbf{u}_B) dV$$

Зачем нужны различные подходы

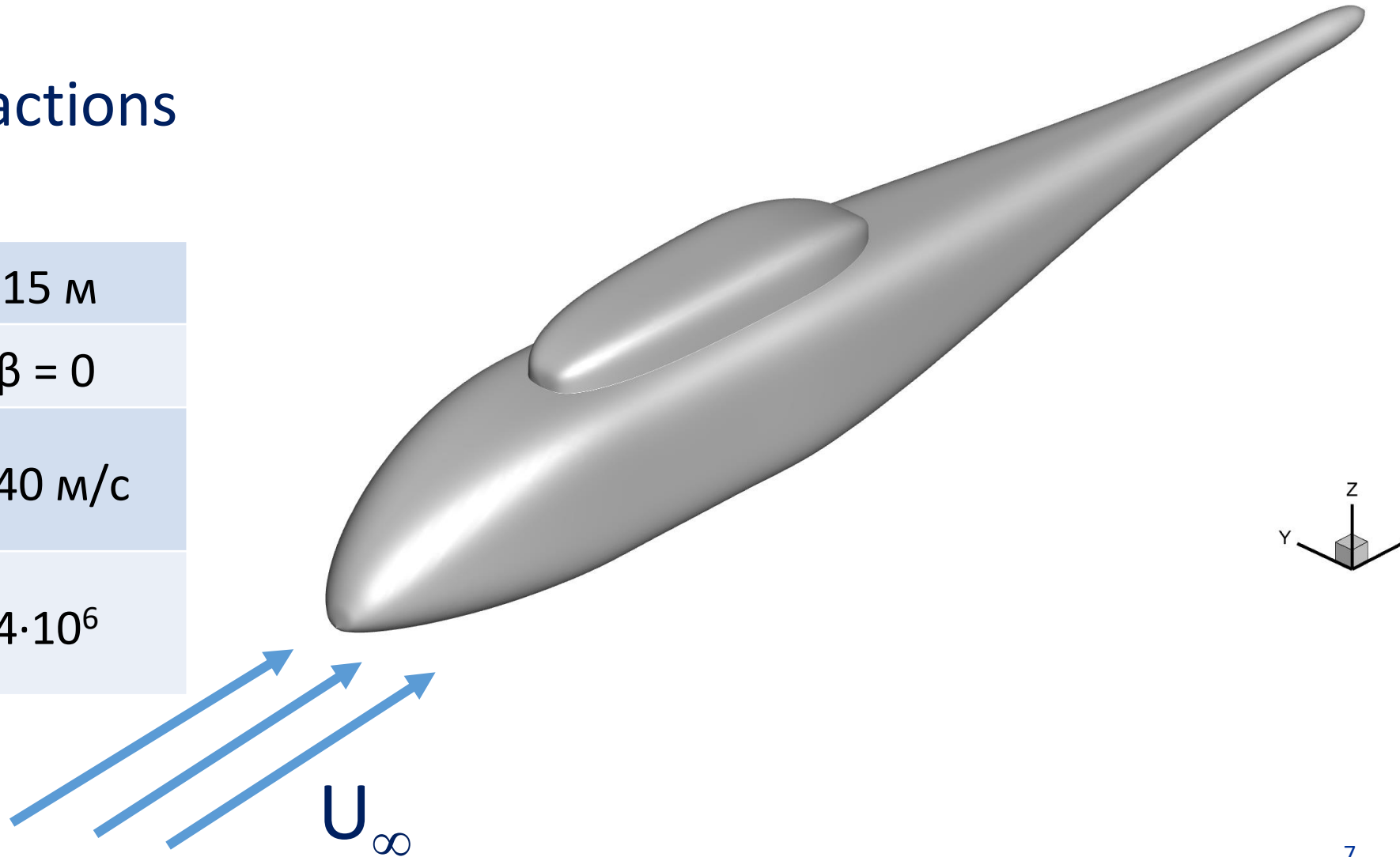
Проверить работоспособность МПГ для расчёта фюзеляжа

Провести сравнение результата расчёта МПГ неподвижного фюзеляжа $V_B = 0$ с результатами расчёта на сетке согласованной с границей

Постановка задачи: обтекание модельного фюзеляжа ROBIN

ROtor Body INteractions

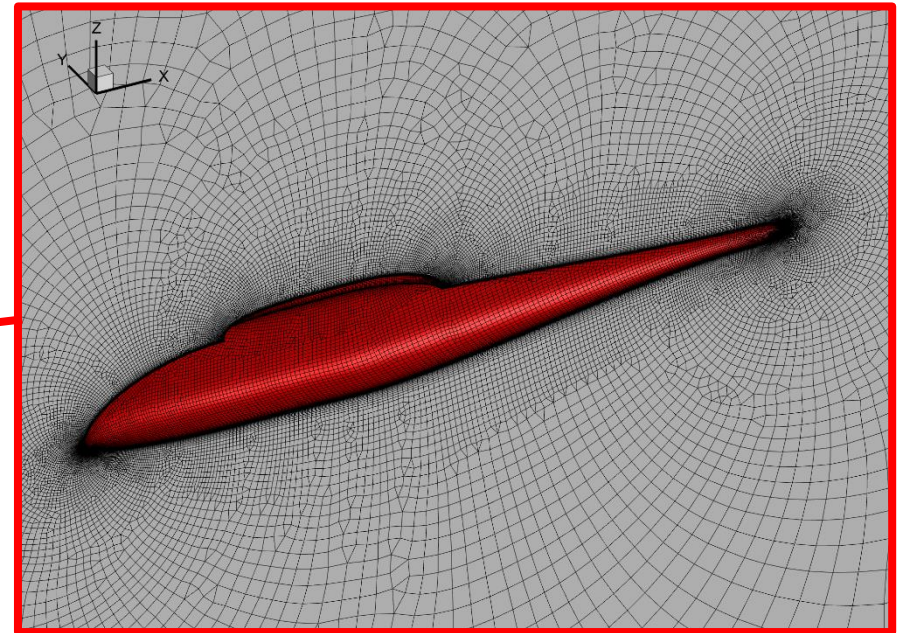
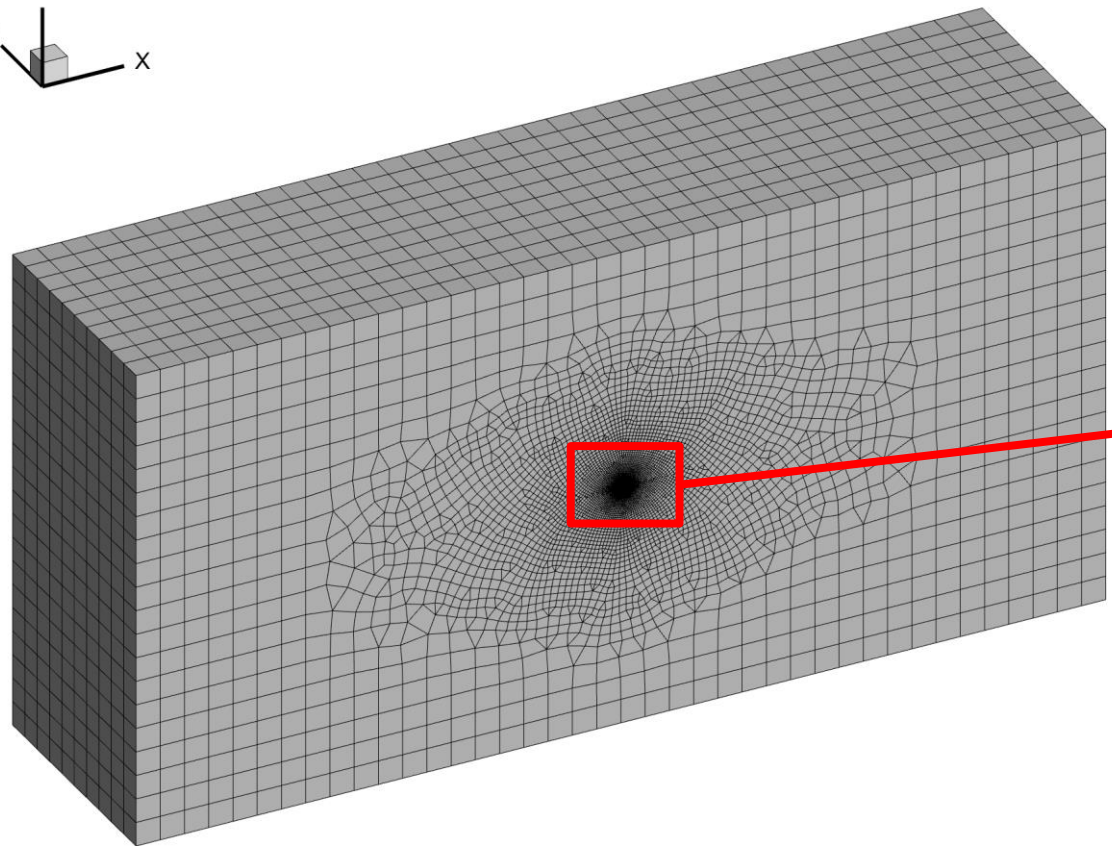
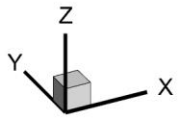
Длина	$L=3.15$ м
Углы атаки	$\alpha = \beta = 0$
Скорость потока	$U_{\infty} = 40$ м/с
Число Рейнолдса	$Re=4 \cdot 10^6$



Математическая модель (BF)

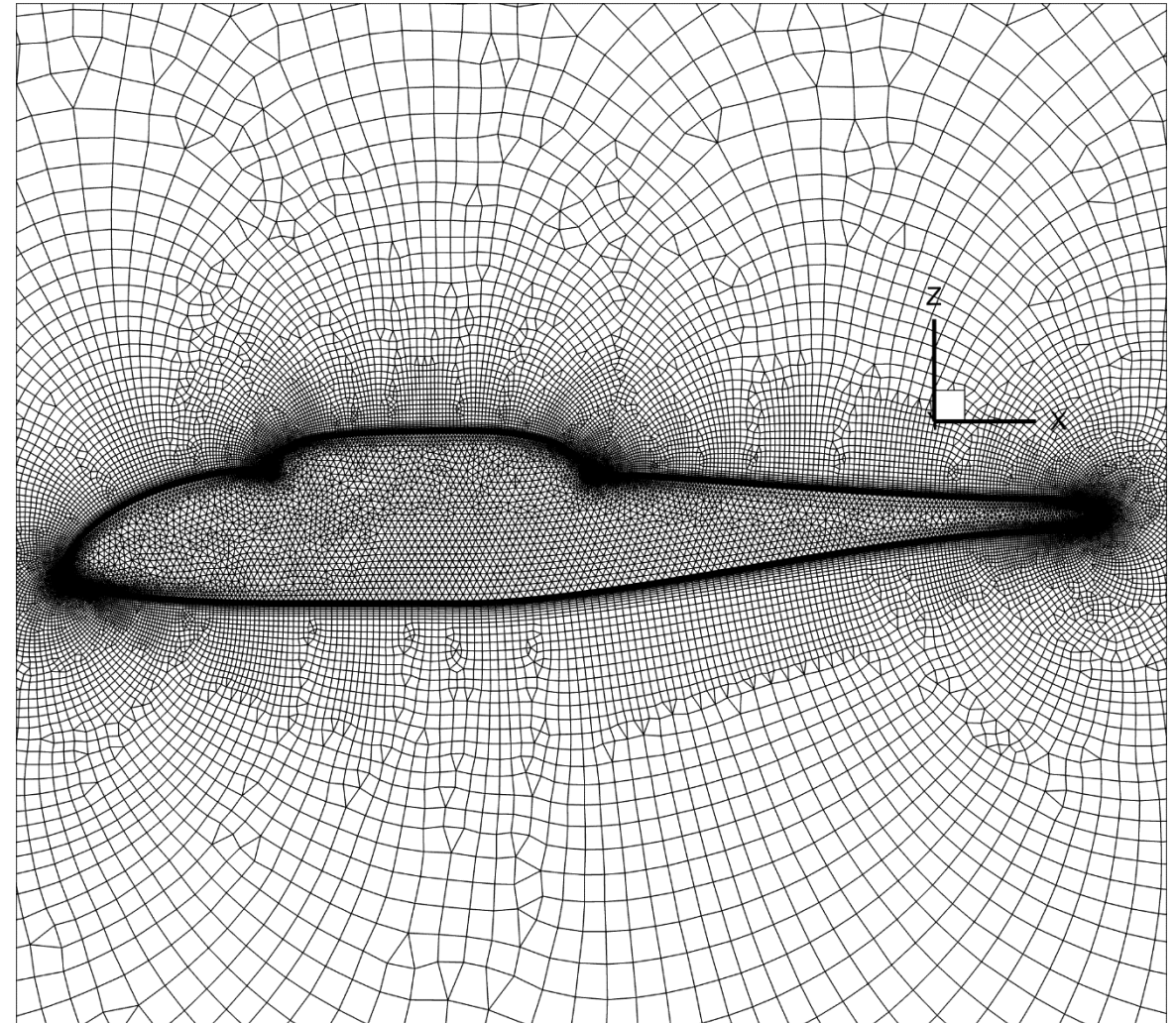
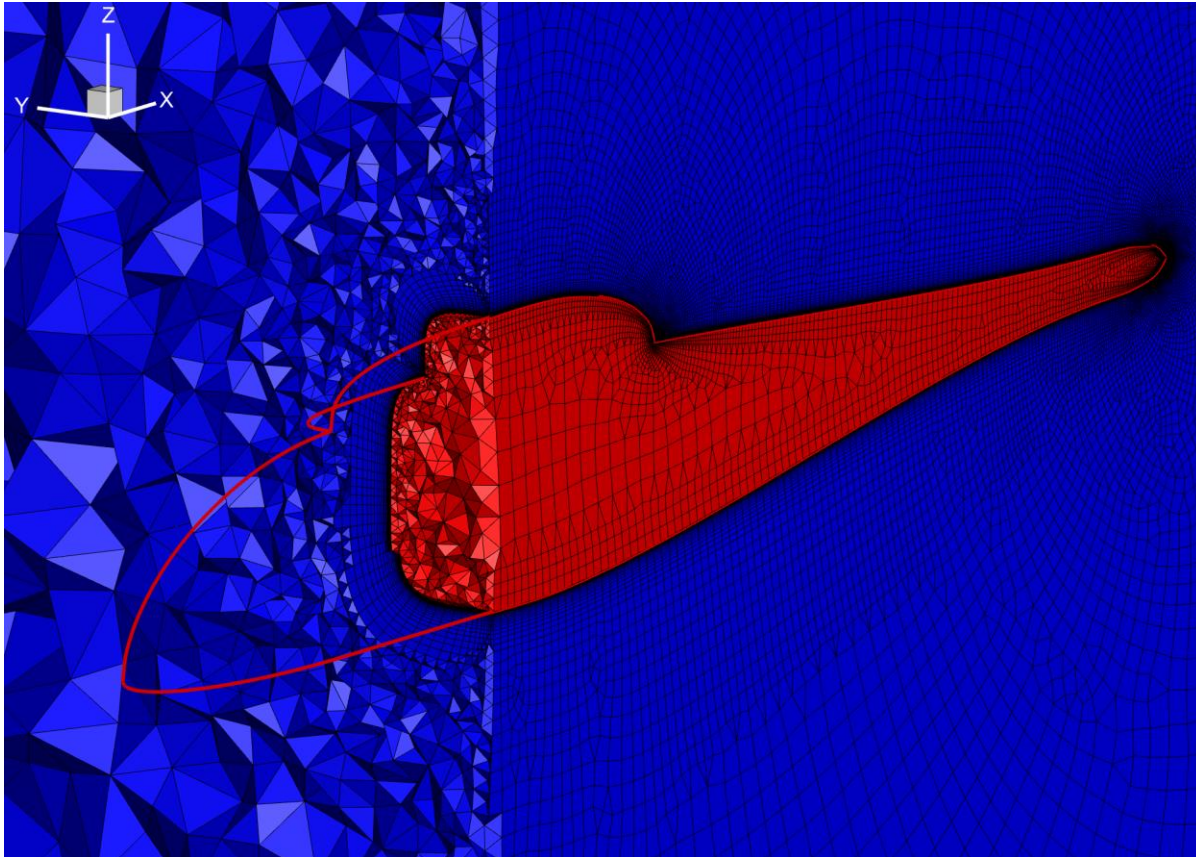
- Пакет программ NOISEtte
- RANS с моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса и SST
- Неявная схема 2го порядка по времени
- WENO 5
- Граничные условия:
 - Input/ Output
 - Стенка с прилипанием
 - Симметрия
- Смоделированное физическое время: 4 с

Расчетная сетка (BF)



Неструктурированная гибридная сетка: 1.35М узлов, 2.9М элементов ($y^+ < 1$)

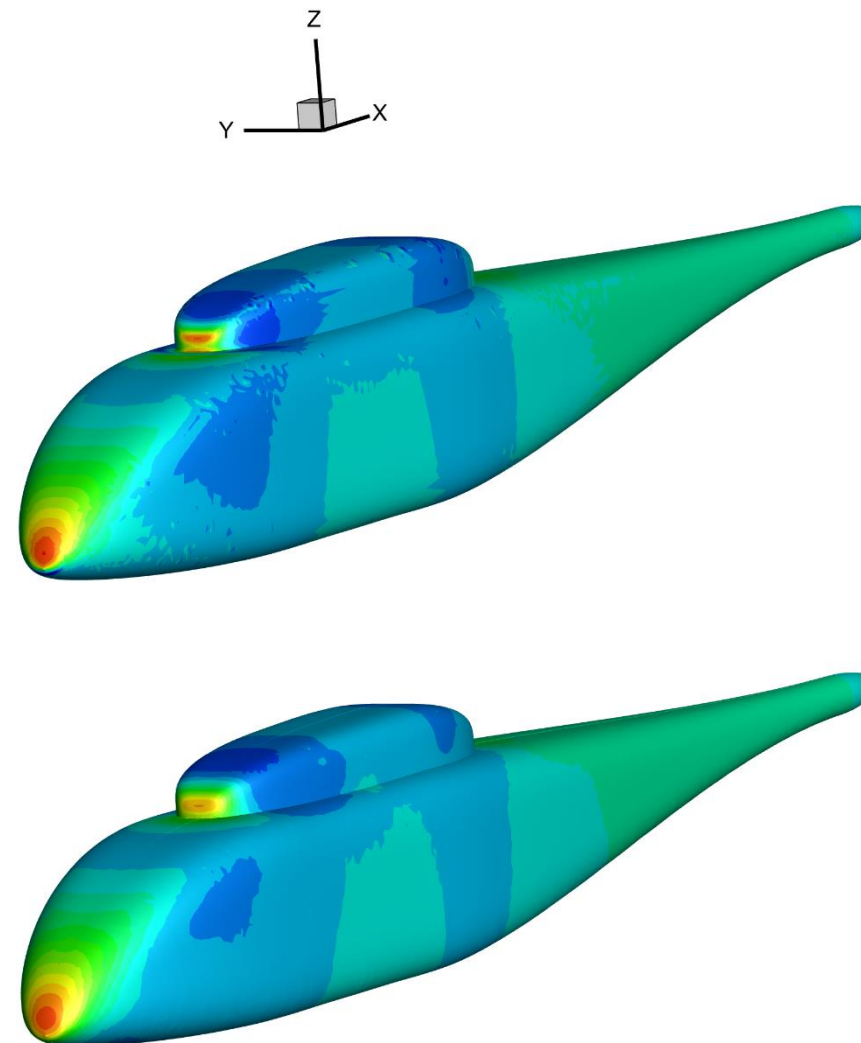
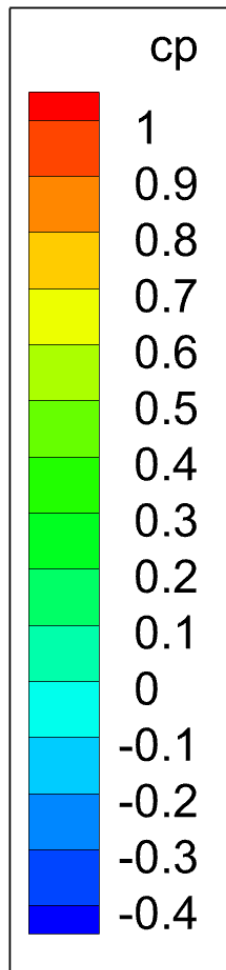
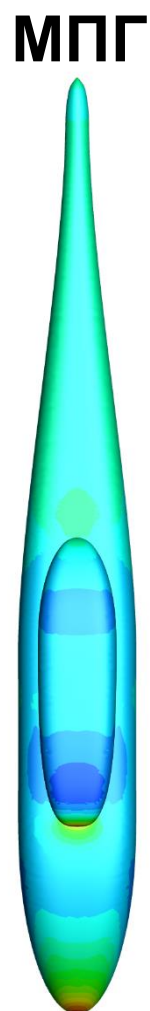
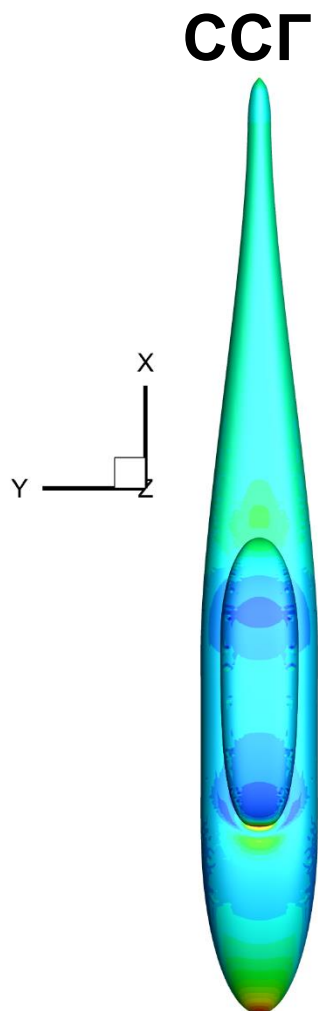
Расчетная сетка (IBC)



Неструктурированная гибридная сетка:
1.6М узлов, 3.7М элементов



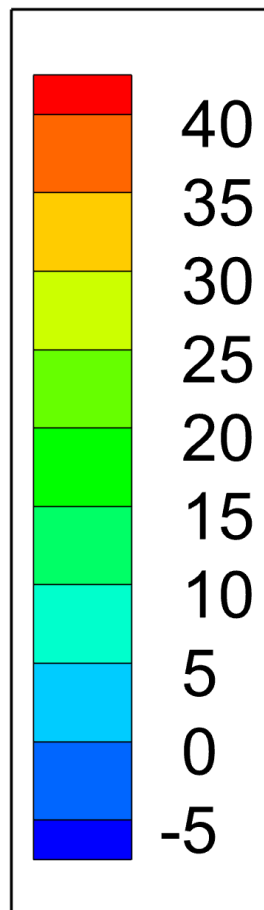
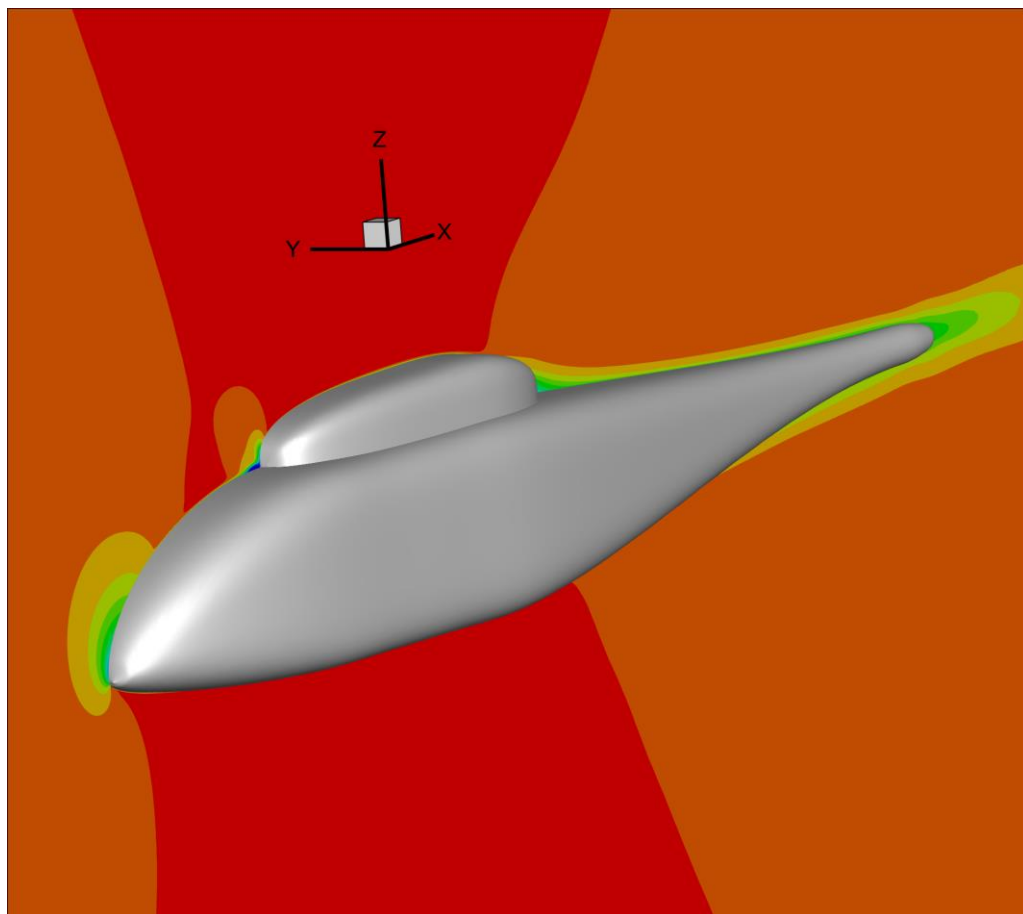
Результаты расчетов. Распределение давления



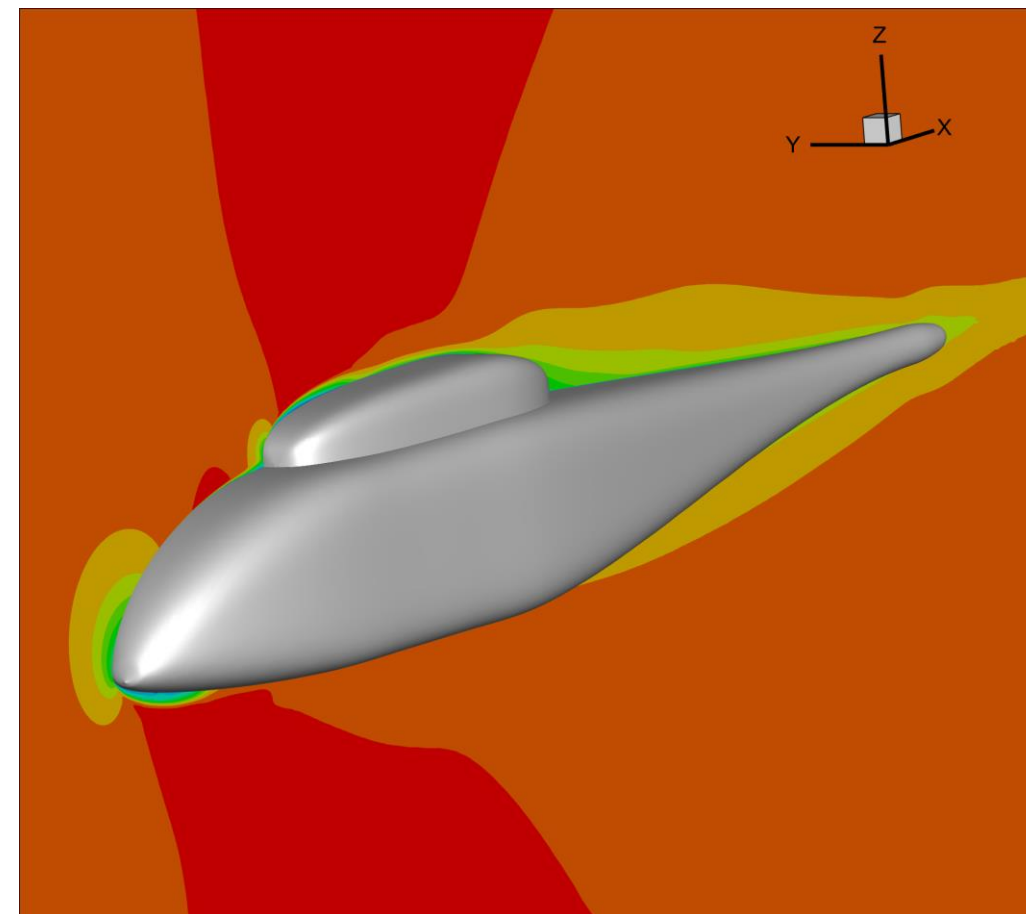


Результаты расчетов. Поперечная скорость

ССГ



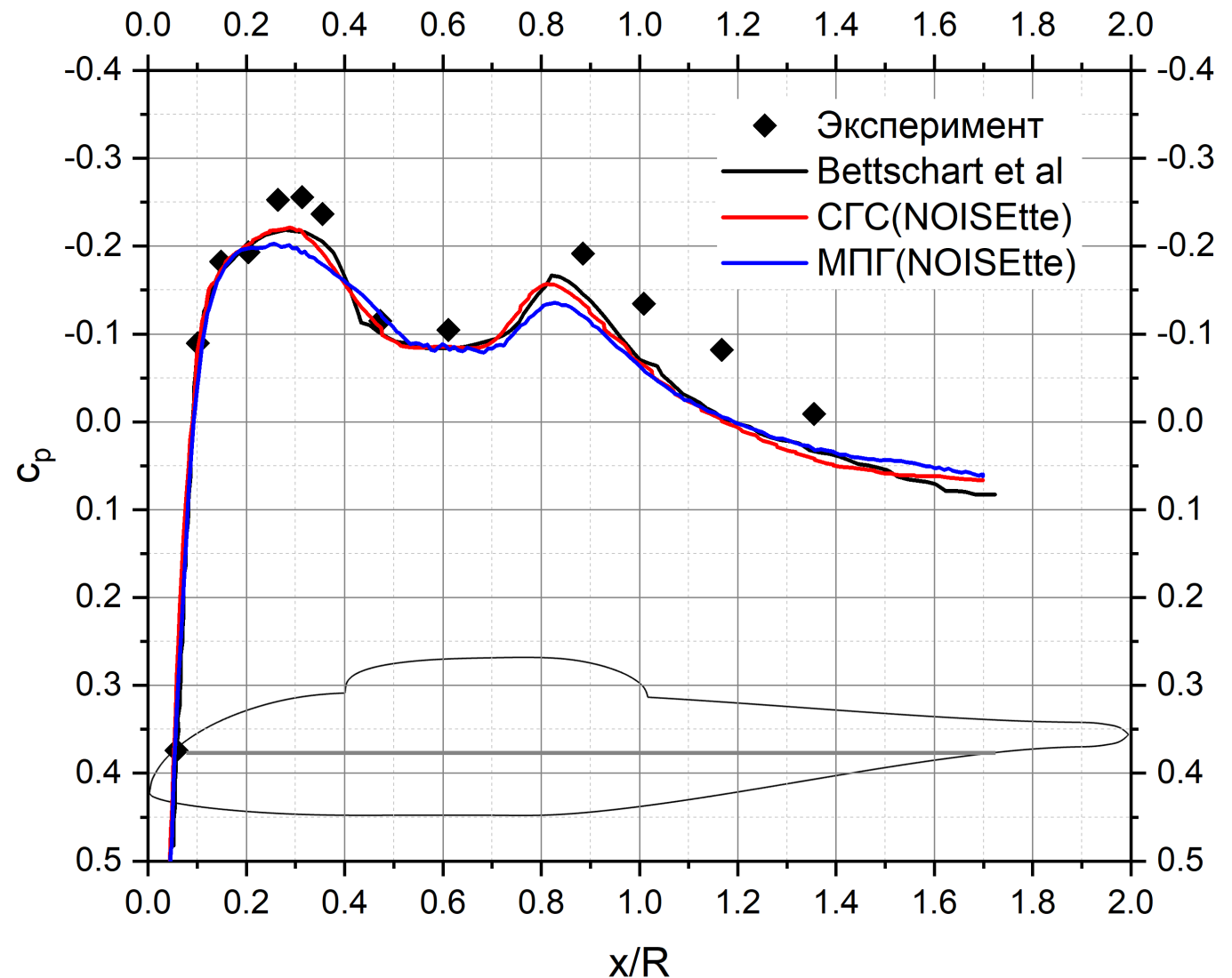
МПГ



Результаты расчетов. Сравнение с экспериментом

	F_x (Н)	F_z (Н)
СГС SA	12.81	217.8
СГС SA с поправкой на кривизну линий тока	12.36	218.9
СГС SST	12.61	219.1
МПГ SA	17.6	195.2

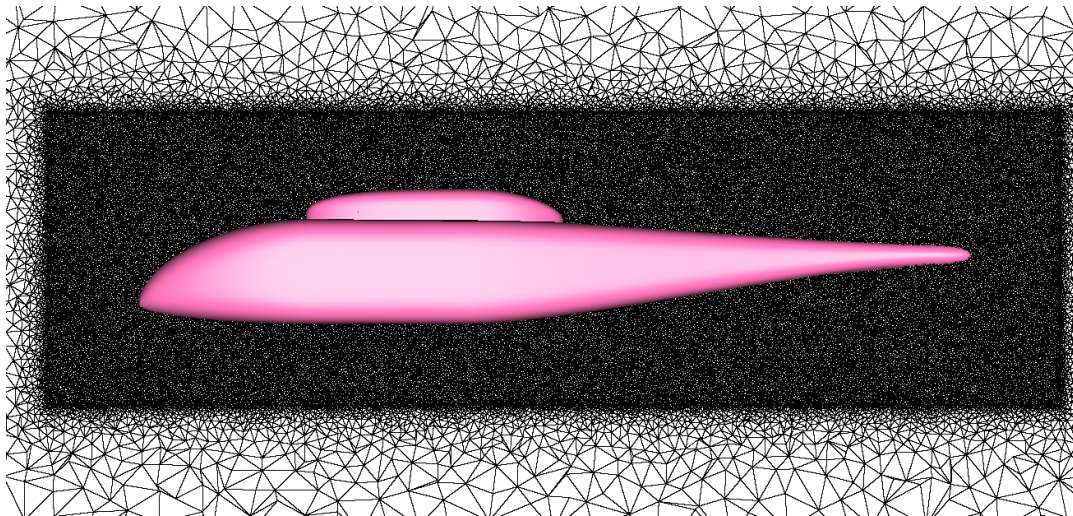
Источник экспериментальных данных:
EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF
HELICOPTER ROTOR-FUSELAGE INTERACTION
N. Bettschart, A. Desopper, R. Hanotel and R.
Larguier ICAS-92-4.8.1



Сеточная адаптация к форме фюзеляжа

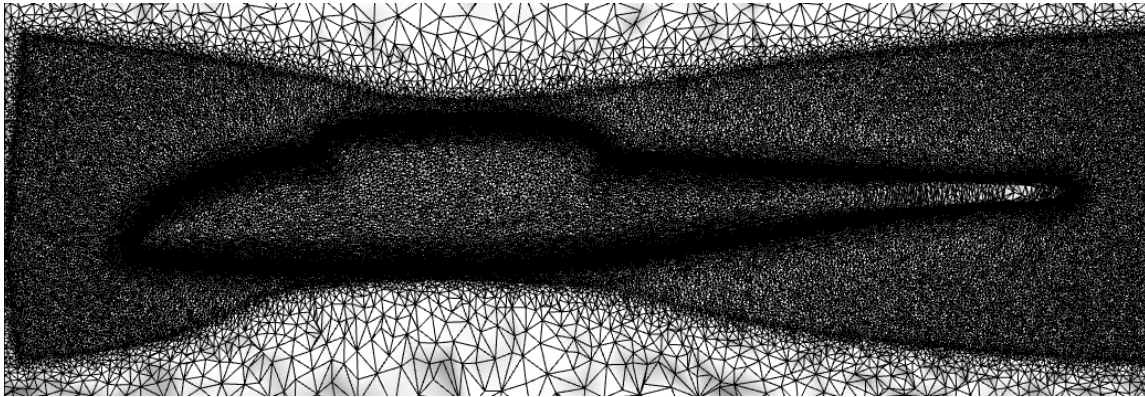
Вариационный алгоритм построения движущихся деформируемых сеток ,тр без изменения топологии сетки.

Garanzha V., Kudryavtseva L. (2018) Hypoelastic Stabilization of Variational Algorithm for Construction of Moving Deforming Meshes, Communications in Computer and Information Science 974: 497-51



- Исходная сетка размером 4.6М узлов
- Большая часть узлов сосредоточена вблизи границ фюзеляжа
- Начальный характерный размер сеточного ребра $5e-3$

Сеточная адаптация к форме фюзеляжа



- Было достигнуто сгущение в 20 раз, т.е. минимальный размер $\approx 2.5e-4$
- Адаптация на данный момент анизотропна только в нормальном направлении к поверхности, что не позволяет достичь большего сгущения, рационально распределяя узлы вдоль поверхности

