

Расчетное исследование пульсаций давления на двигательном отсеке головной части ракеты космического назначения

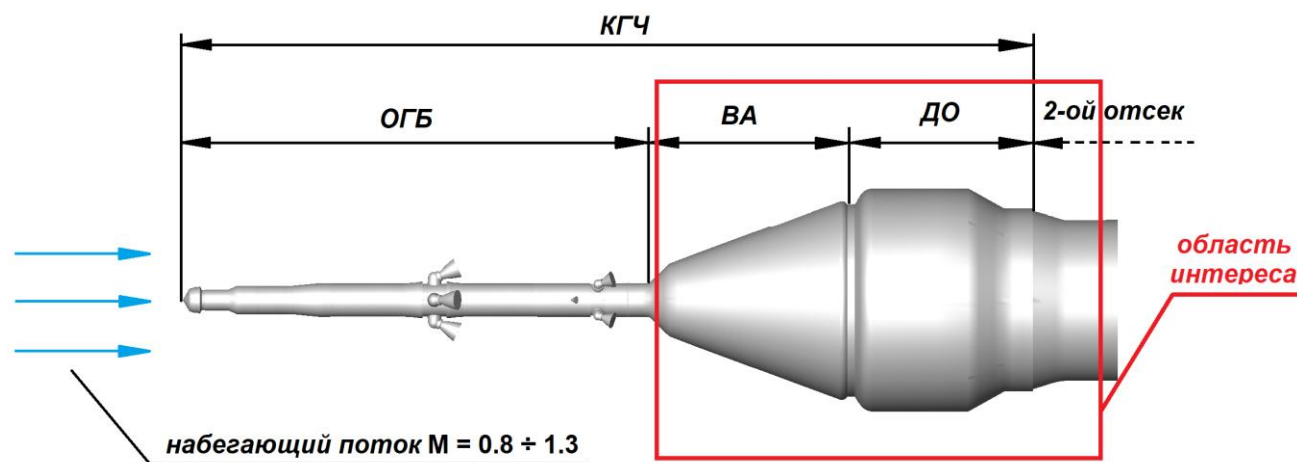
И.В. Абалакин, В.Г. Бобков, А.П. Дубень, Т.К. Козубская

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша

С.П. Рыбак

РКК «Энергия»

Постановка задачи



Число Маха набегающего потока: 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1.05, 1.3

Числа Рейнольдса: от $9.8 \cdot 10^6$ до $7.4 \cdot 10^6$

Цель

Получение нестационарных характеристик поверхностного распределения давления на ВА+ДО в виде осредненного коэффициента давления C_p и среднеквадратичного отклонения пульсаций давления P'_{RMS}

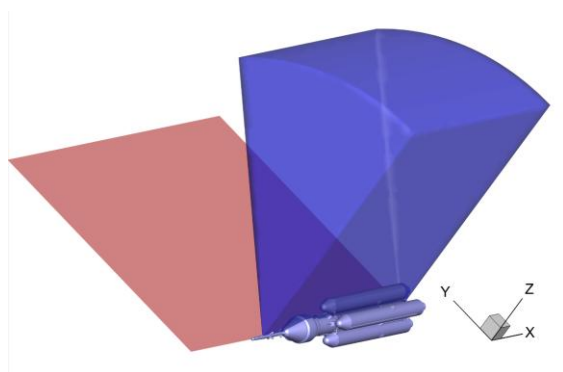
Схема проведения расчетов

Этап 1: RANS в осесимметричной постановке (SA, SST)

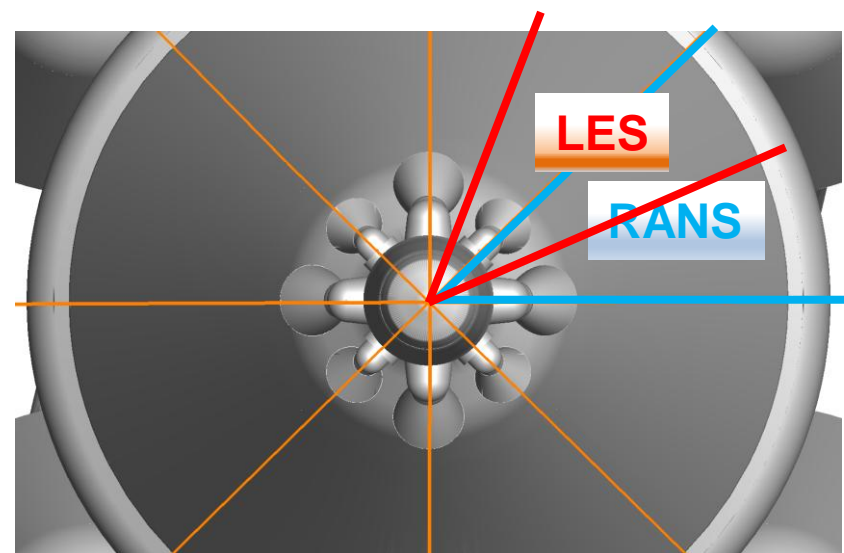
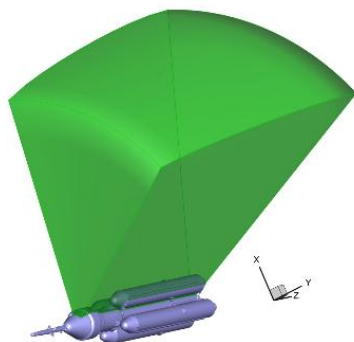
Цель: выявить основные особенности течения, необходимые параметры для 3D RANS и IDDES, зависимость от используемой модели турбулентности, подготовить входные данные для 3D RANS расчета

Этап 2: 3D RANS в секторе 45°

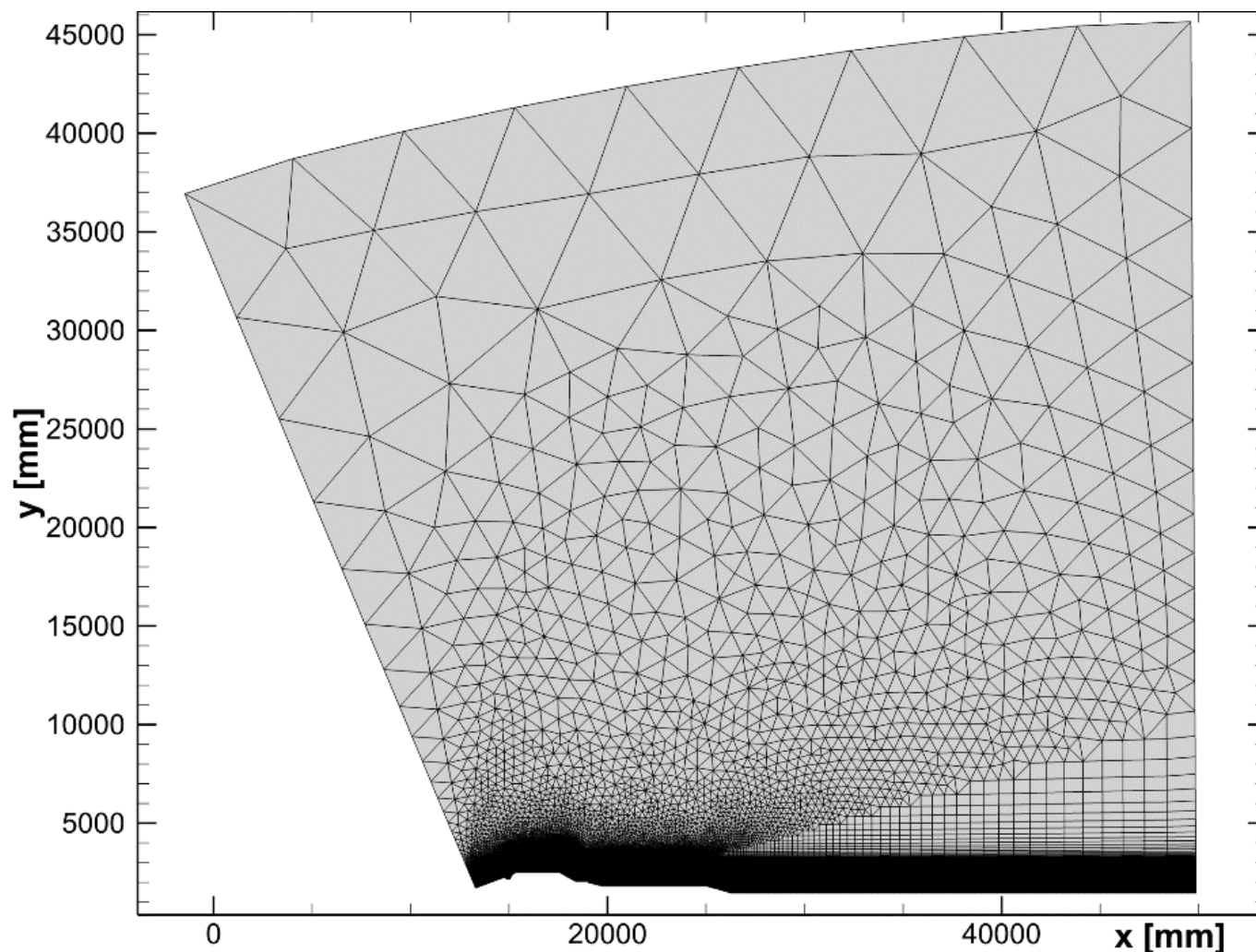
Цель: подготовка 3D IDDES расчета сектора



Этап 3: 3D SA IDDES расчеты сектора 45°



Численные методы и расчетные сетки(1)



Типичное для всех расчетов с использованием RANS и IDDES
2D продольное сечение гибридной сетки.

3D сетка — поворот 2D сетки по азимутальному углу с шагом $\Delta\varphi = 2\pi / N_\varphi$

Численные методы и расчетные сетки (2)

Конечно-объемная вершинно-центрированная схема с квазиодномерной реконструкцией вдоль ребра сетки (EBR)^{*)}

RANS: EBR-WENO реконструкция^{**)}

IDDES: гибридная EBR CD+Upwind+WENO реконструкция^{***)}

Полностью неявная схема интегрирования по времени 2-го порядка точности двух несвязных систем уравнений:

газодинамической системы уравнений (5 уравнений)
и
турбулентной системы уравнений (1 или 2 уравнения)

^{*)}Abalakin I., Bakhvalov P., Kozubskaya T. Edge-based reconstruction schemes for unstructured tetrahedral meshes // Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2016, **81**(6), 331–356.

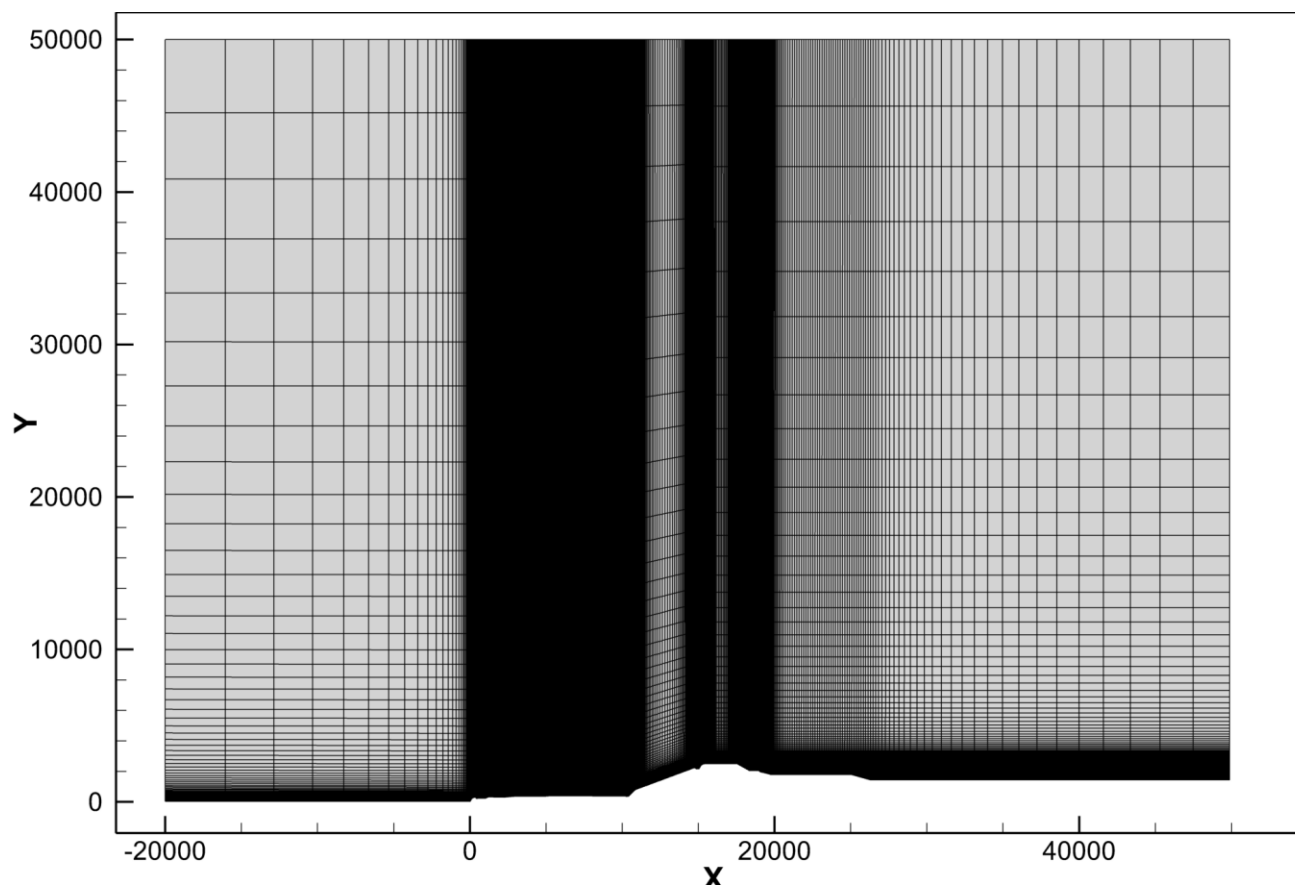
^{**) Bakhvalov P., Kozubskaya T. EBR-WENO scheme for solving gas dynamics problems with discontinuities on unstructured meshes // Comput. Fluids, 2017, **157**, 312-324.}

^{***)} Duben A.P. and Kozubskaya T.K. Jet Noise Simulation Using Quasi-1D Schemes on Unstructured Meshes. AIAA Paper 2017-3856, 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Denver, Colorado, 2017.

1 этап: расчеты в осесимметричной постановке (1)

Вычислительная постановка задачи

- Подход: SA RANS, SST RANS, осесимметричная (RZ) постановка
- Численная схема: EBR-WENO повышенной точности
- Сетка: 0.52 млн. узлов, $\Delta y_1^+ < 1$

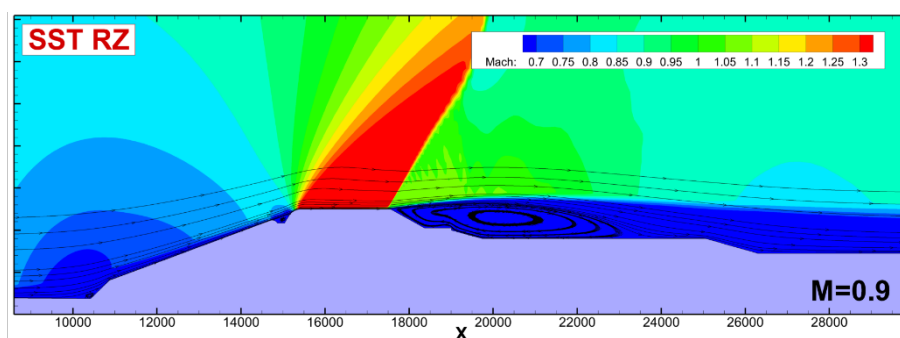
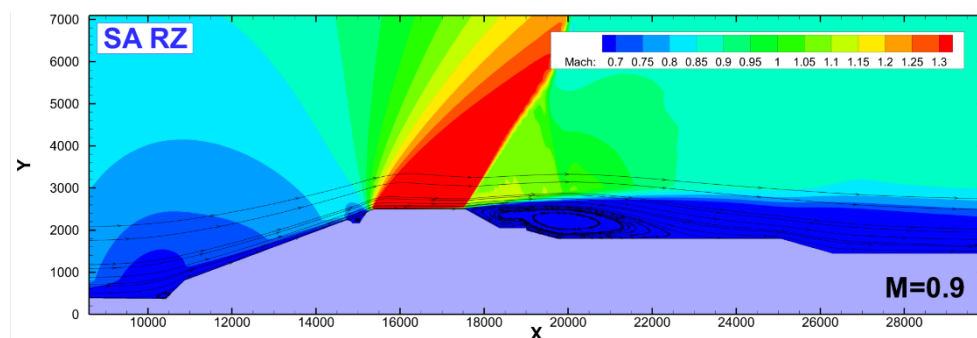
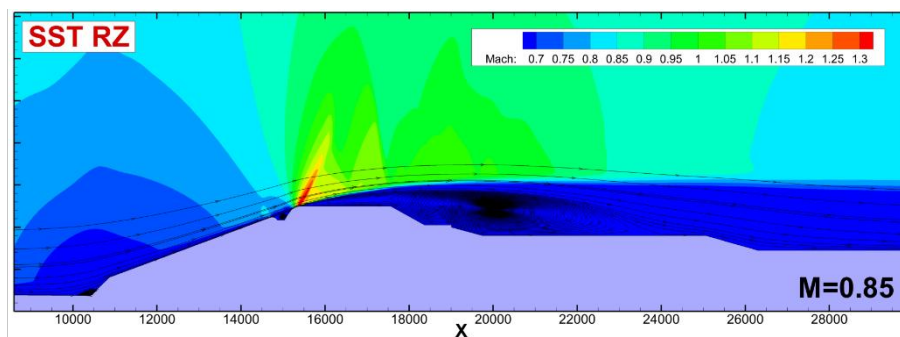
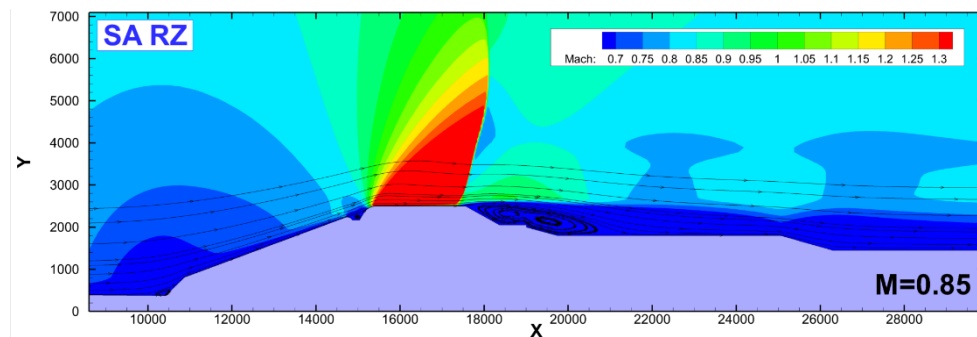
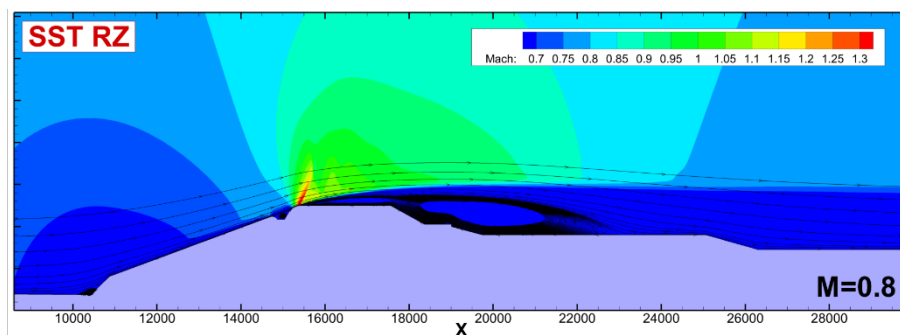
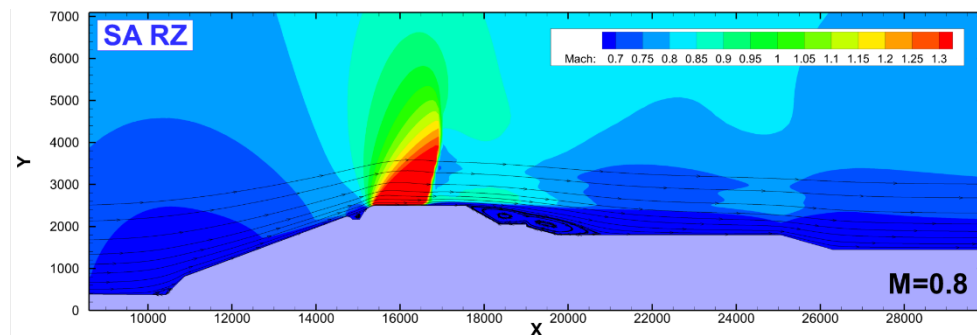


1 этап: расчеты в осесимметричной постановке (2)

Основные особенности течения
в зависимости от используемой модели турбулентности

SA

SST

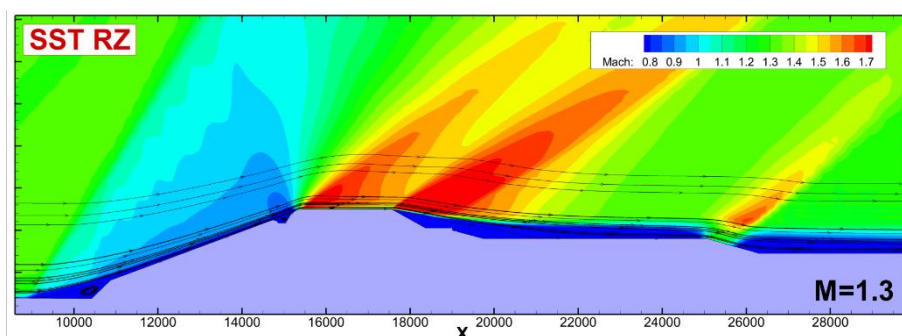
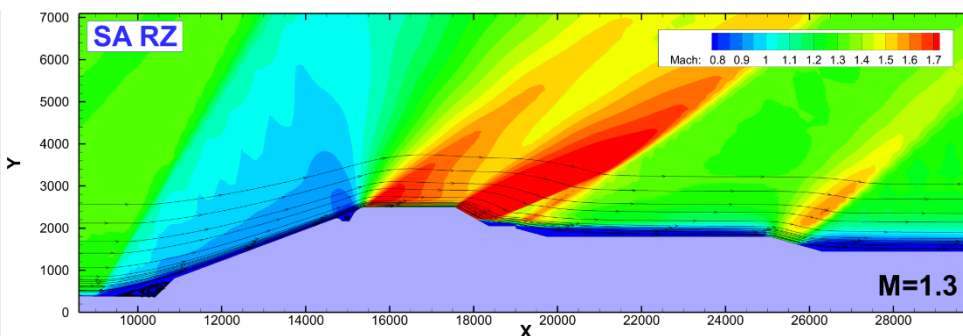
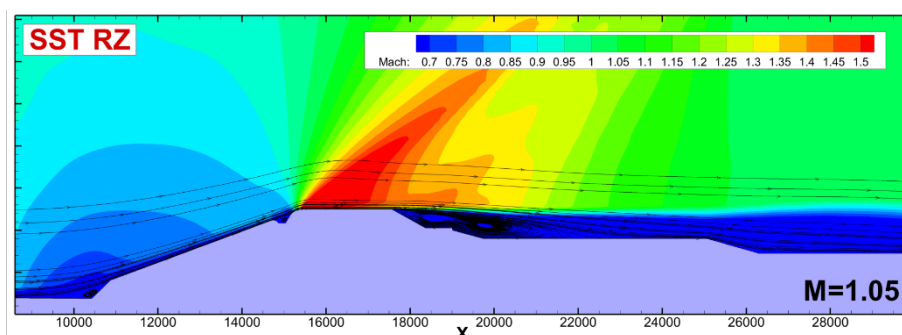
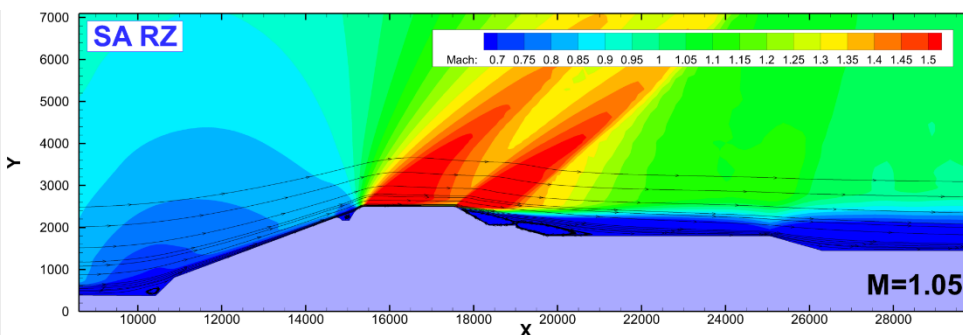
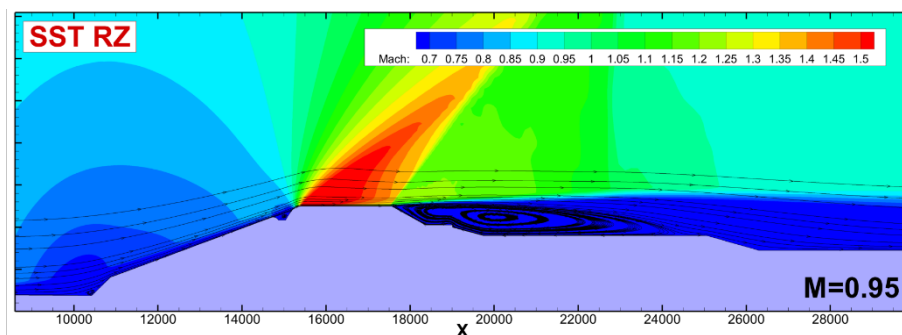
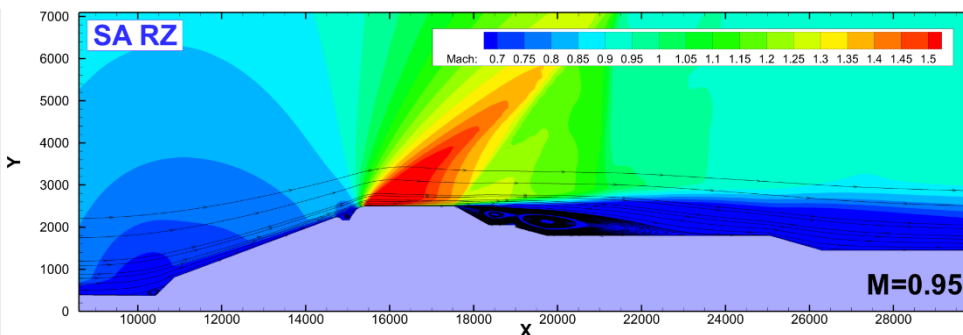


1 этап: расчеты в осесимметричной постановке (3)

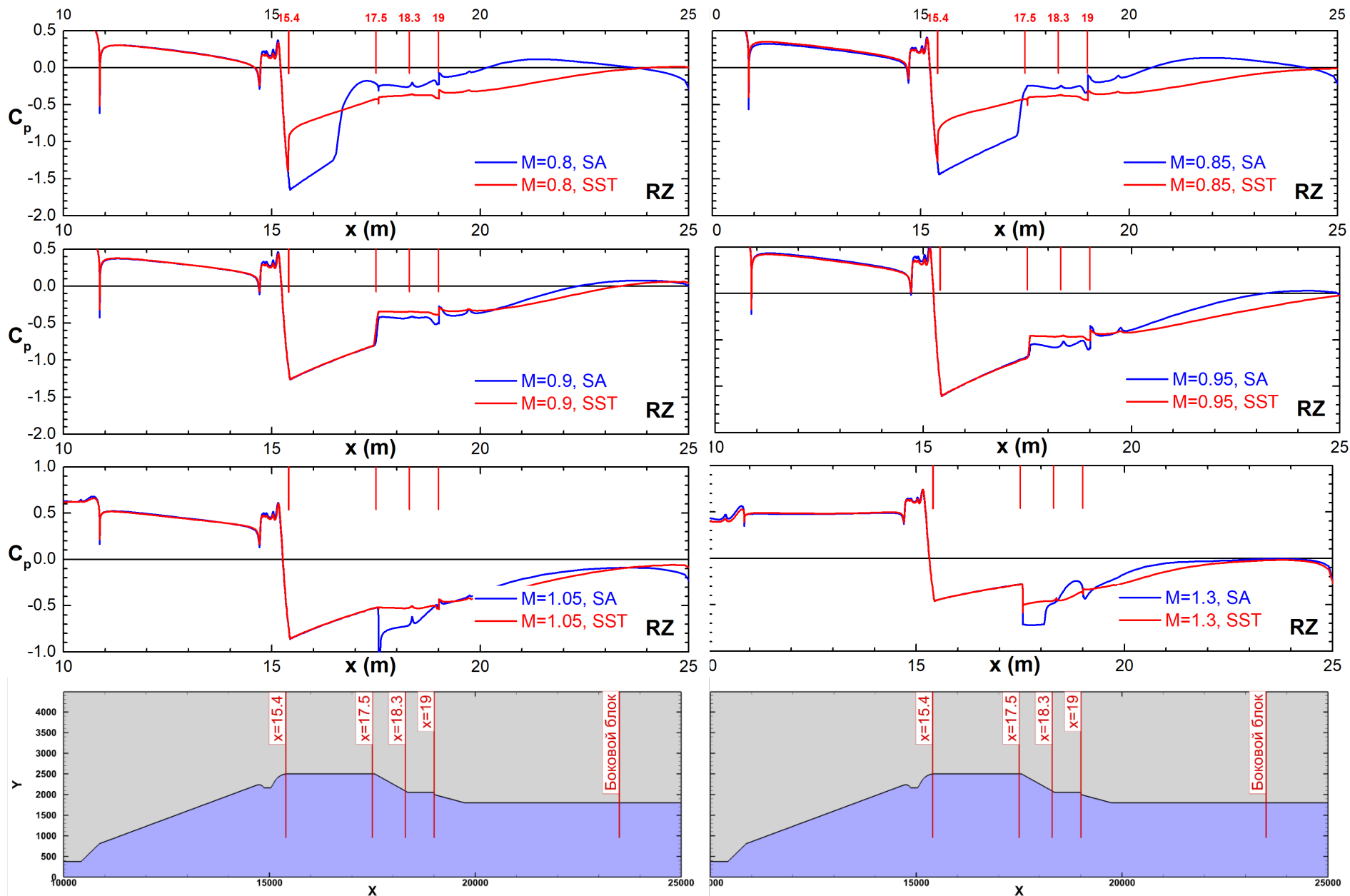
Основные особенности течения в зависимости от используемой модели турбулентности

SA

SST



1 этап: расчеты в осесимметричной постановке (4)



1 этап: 3D RANS расчет в секторе 45° (1)

Вычислительная постановка задачи

Подход: SA RANS, SST RANS секторе 45°

Граничные условия: входная граница – профили из RANS RZ

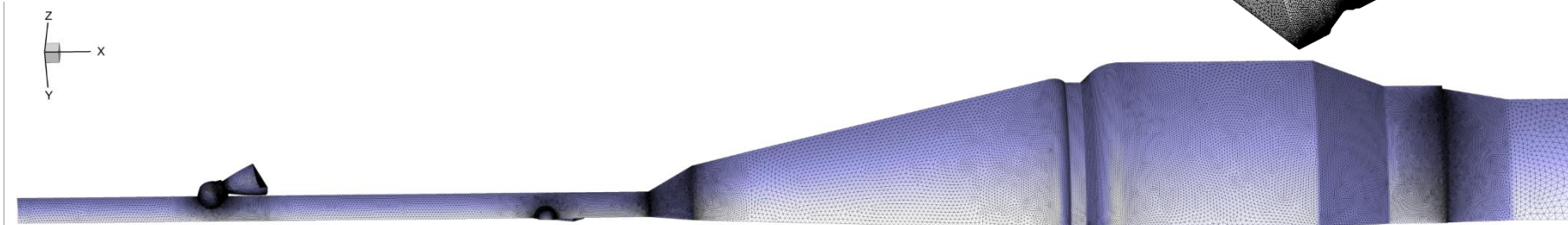
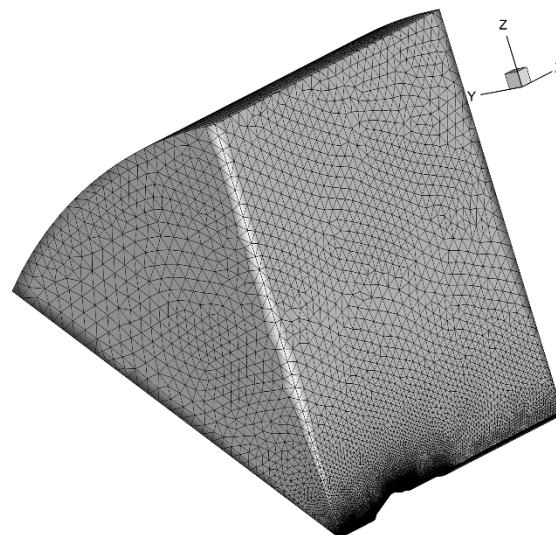
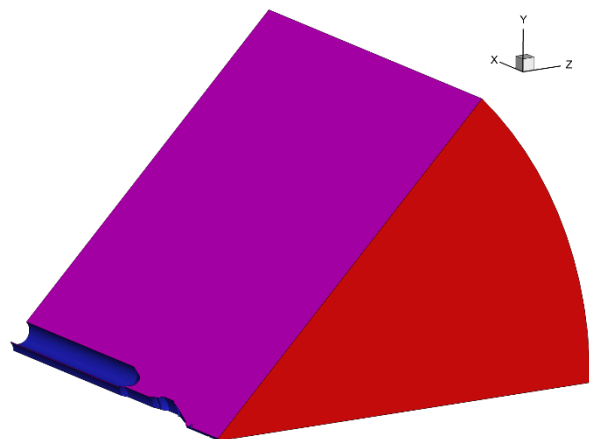
условия симметрии

поверхности КГЧ и РН – условия прилипания

выход – снос по характеристики

Численная схема: EBR-WENO

Сетка: 3.5 млн. узлов, 8.7 млн. элементов

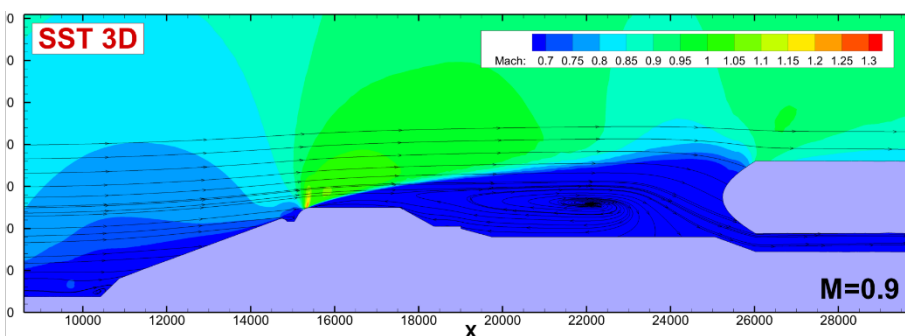
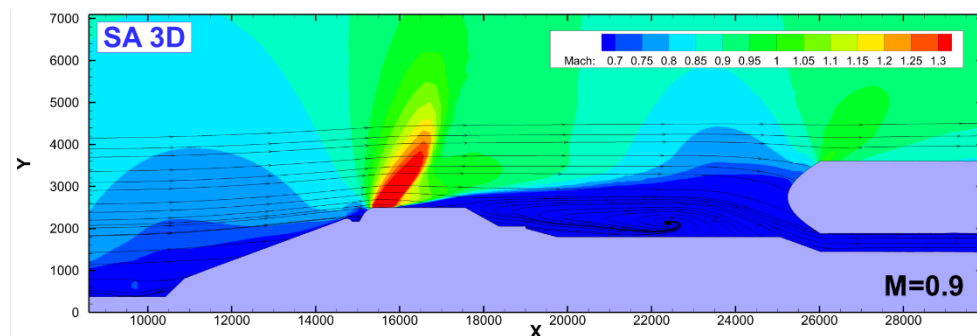
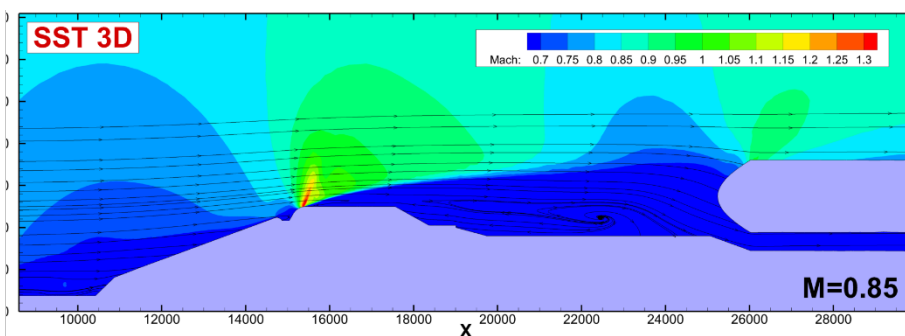
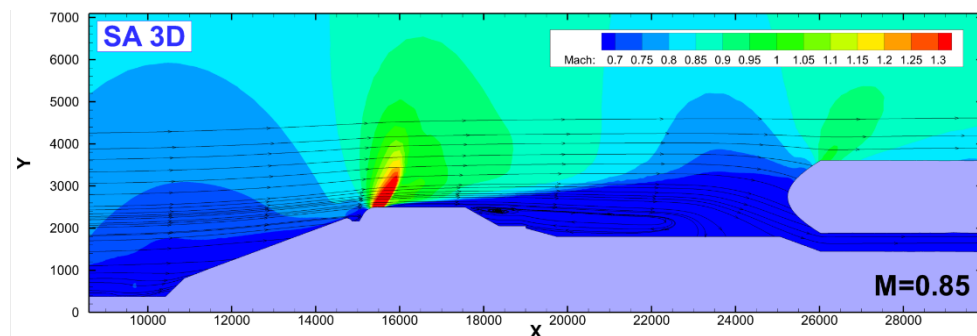
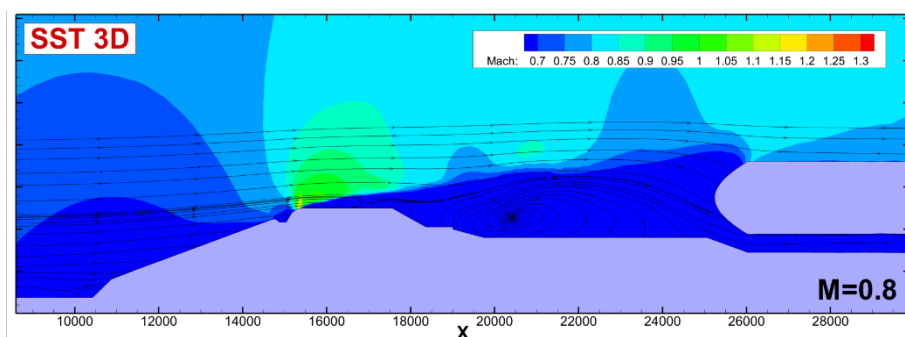
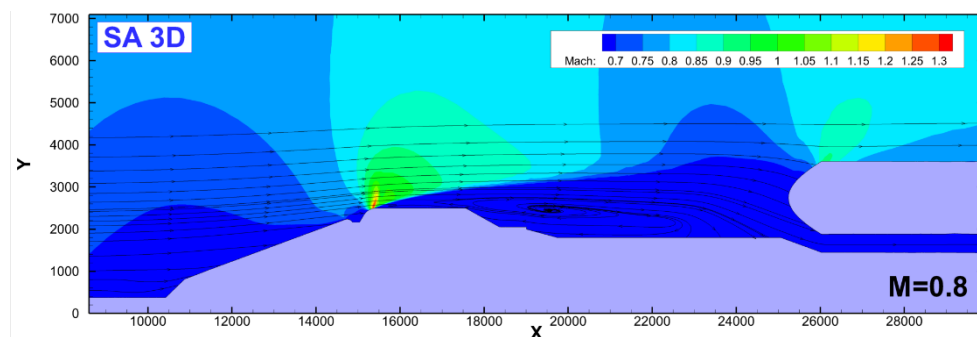


1 этап: 3D RANS расчет в секторе 45° (2)

Основные особенности течения
в зависимости от используемой модели турбулентности

SA

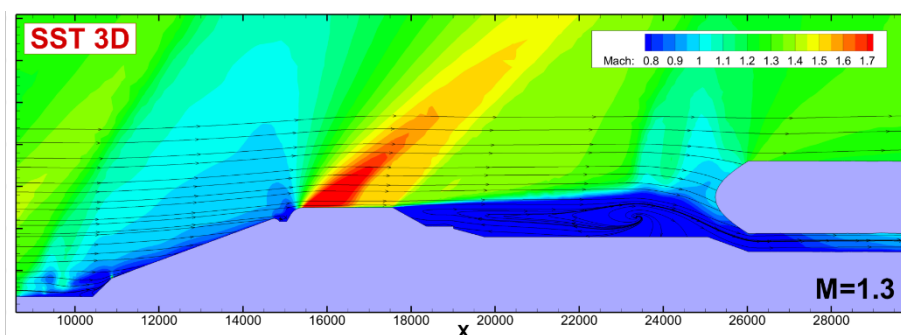
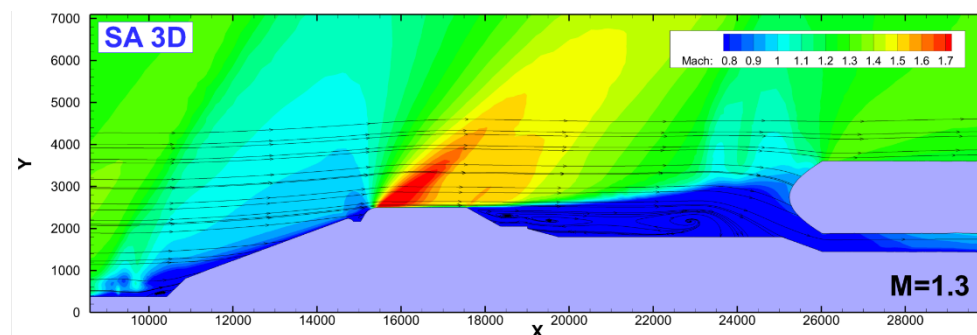
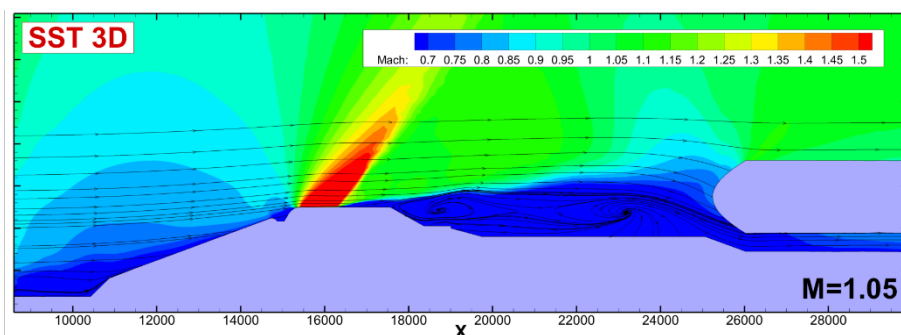
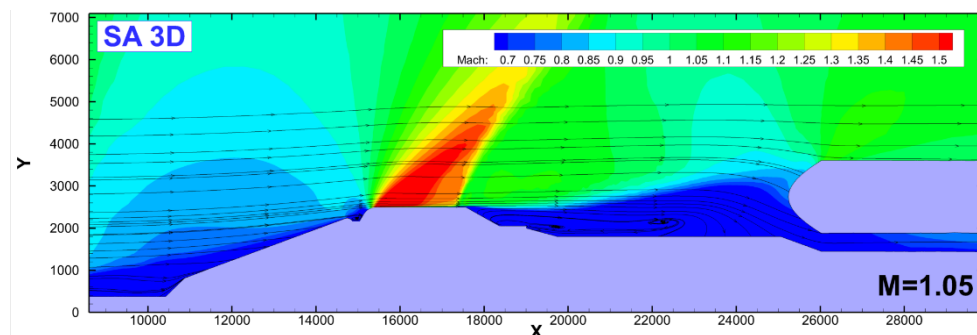
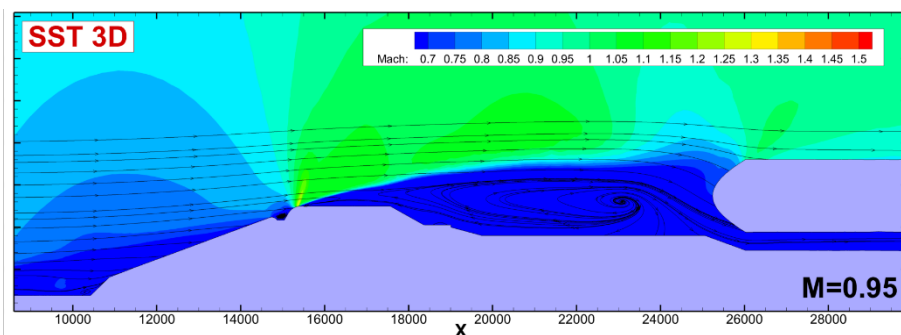
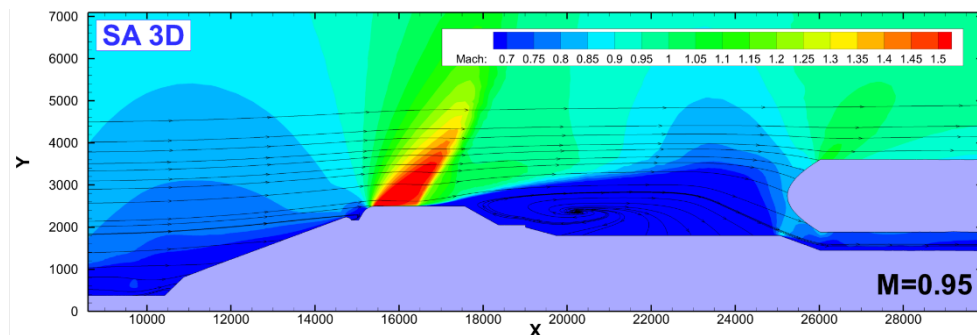
SST



1 этап: 3D RANS расчет в секторе 45° (2)

Основные особенности течения
в зависимости от используемой модели турбулентности

SA **SST**

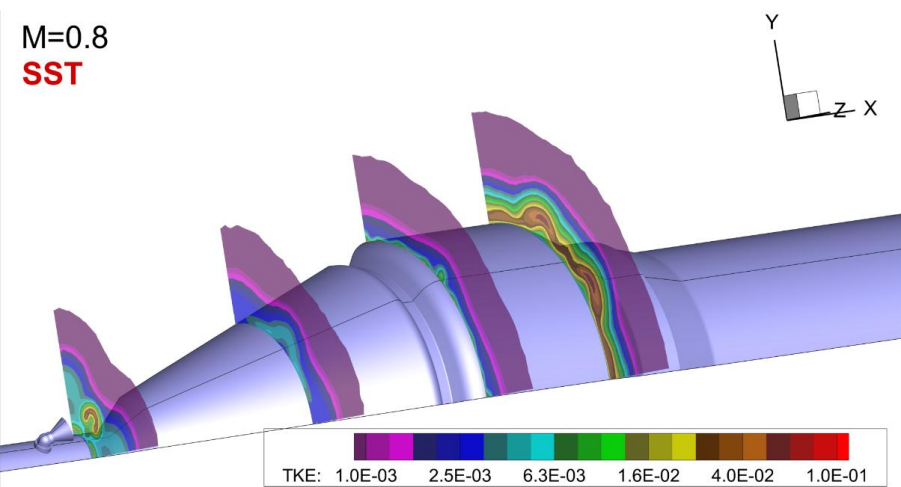


1 этап: 3D RANS расчет в секторе 45° (4)

Турбулентная энергия в зависимости от азимутального угла

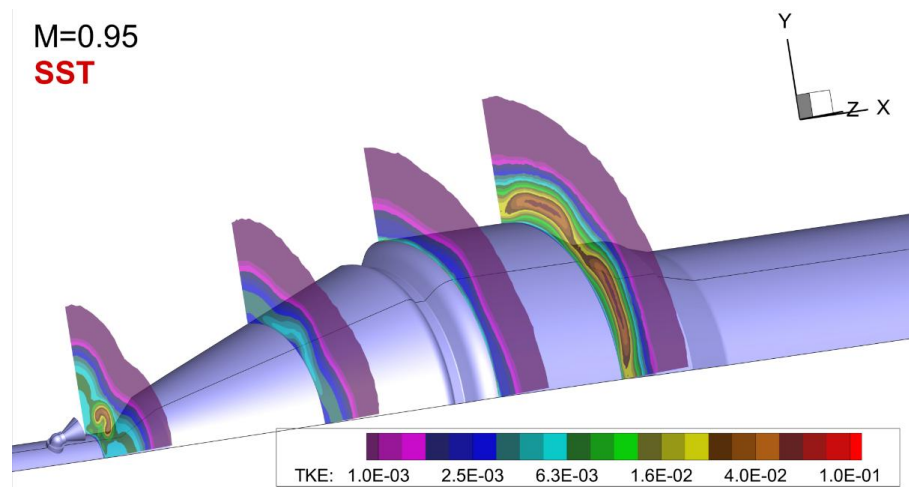
M=0.8

SST



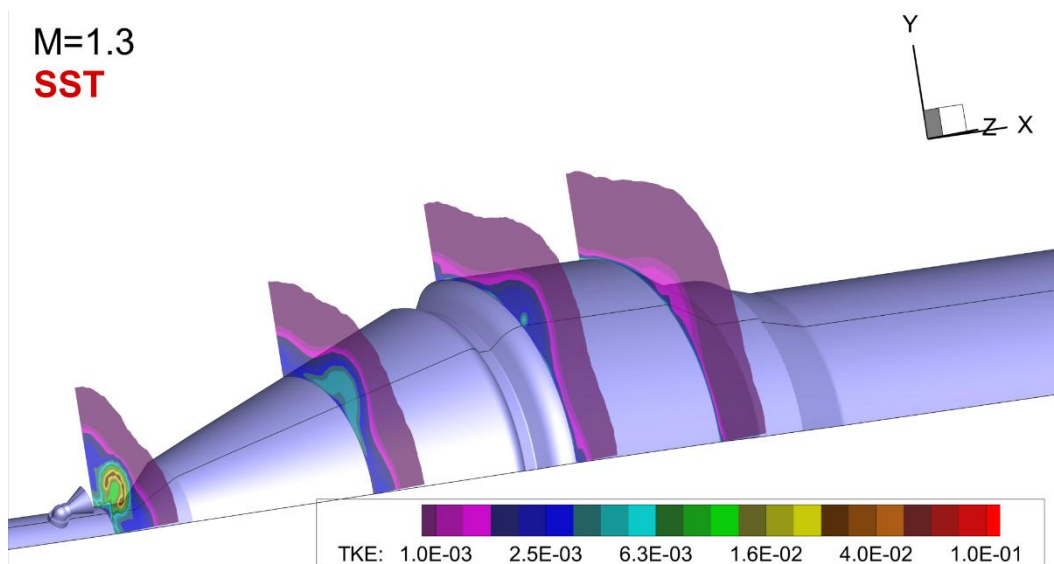
M=0.95

SST



M=1.3

SST

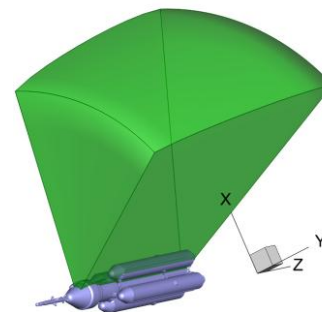


1 этап: SA IDDES расчет в секторе 45° (1)

Вычислительная постановка задачи

Модель: SA IDDES в секторе 45°

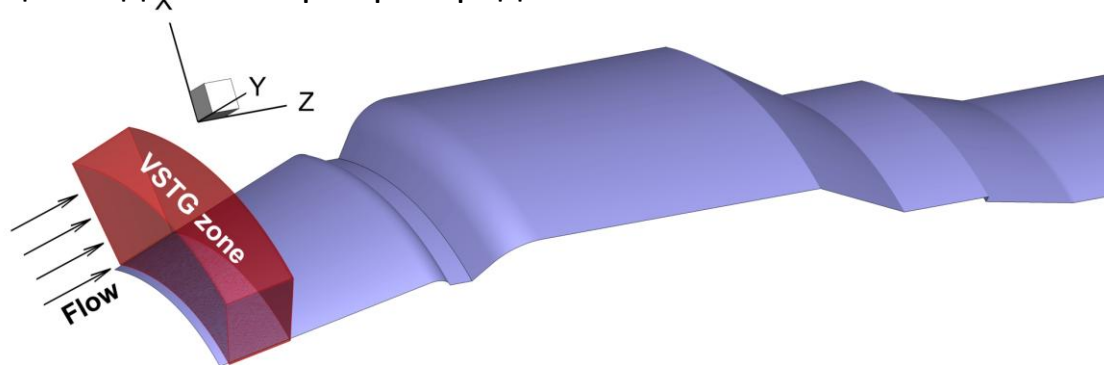
- подсеточный линейный масштаб турбулентности адаптирован к слоям смешения: $\Delta = \Delta_{SLA}$ ^{*)}
- угловая периодика по азимутальному направлению



Численная схема: гибридная EBR CD+Upwind+WENO

Создание турбулентных пульсаций в пограничном слое перед выемкой:

- генератор синтетической турбулентности — STG ^{**)}
- турбулентные пульсации задаются через распределенный объемный источник — VSTG ^{***)}



^{*)} Shur M., Spalart P., Strelets M., Travin A. // Flow Turbul. Combust., 2015, **95**(4), 2015, 709-737.

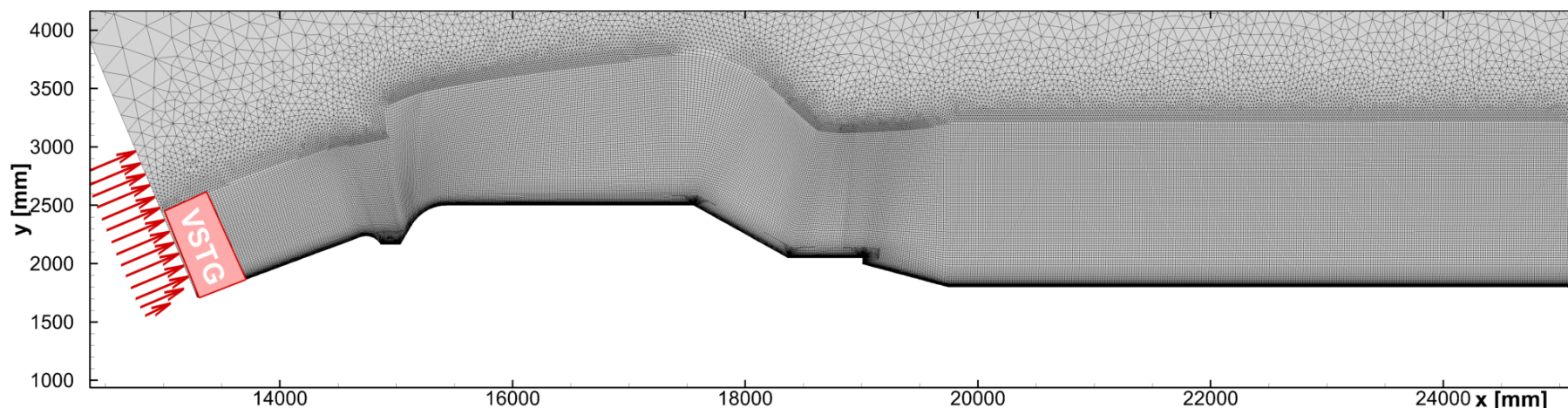
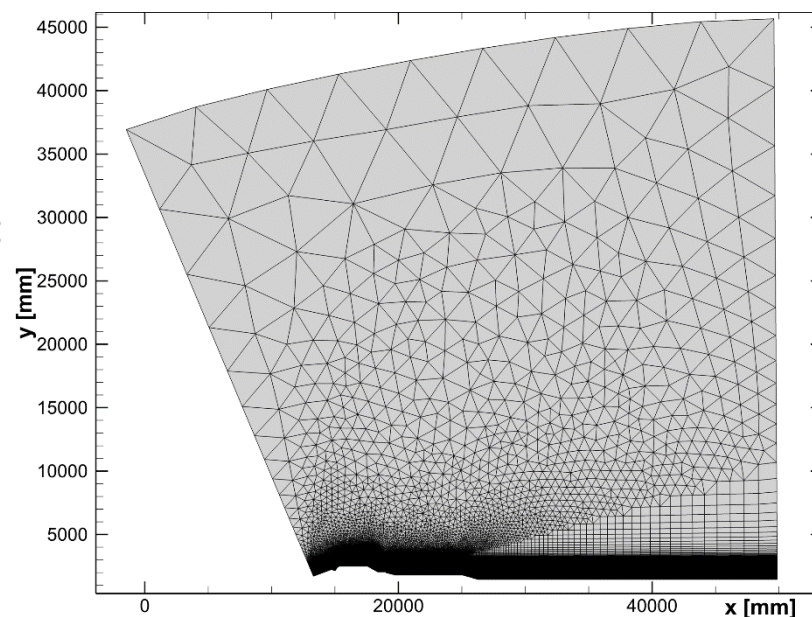
^{**)} Shur M., Spalart P., Strelets M., Travin A. // Flow, Turbul. Combust., 2014, **93**(1), 63-92.

^{***)} M. Shur, M. Strelets, A. Travin, et al. // C. Mockett et al. (eds.), Go4Hybrid: Grey Area Mitigation for Hybrid RANS-LES Methods, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design 134, 15-87

1 этап: SA IDDES расчет в секторе 45° (2)

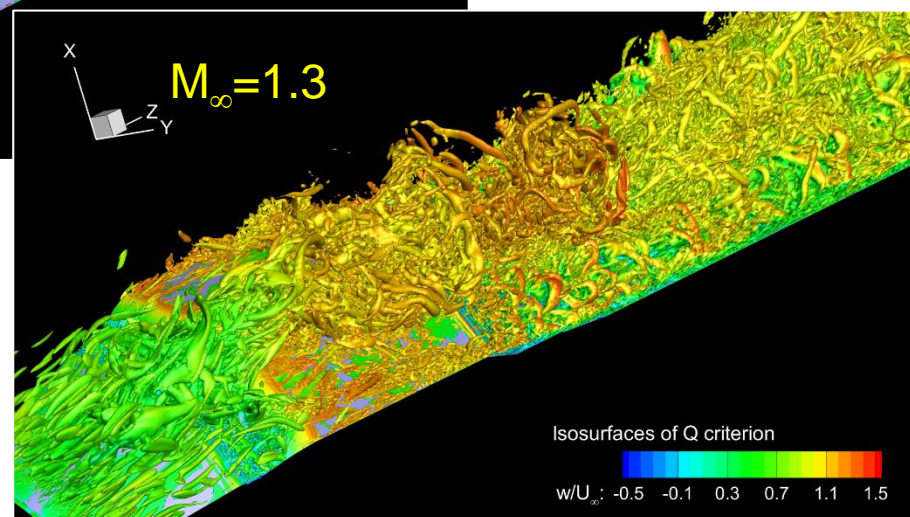
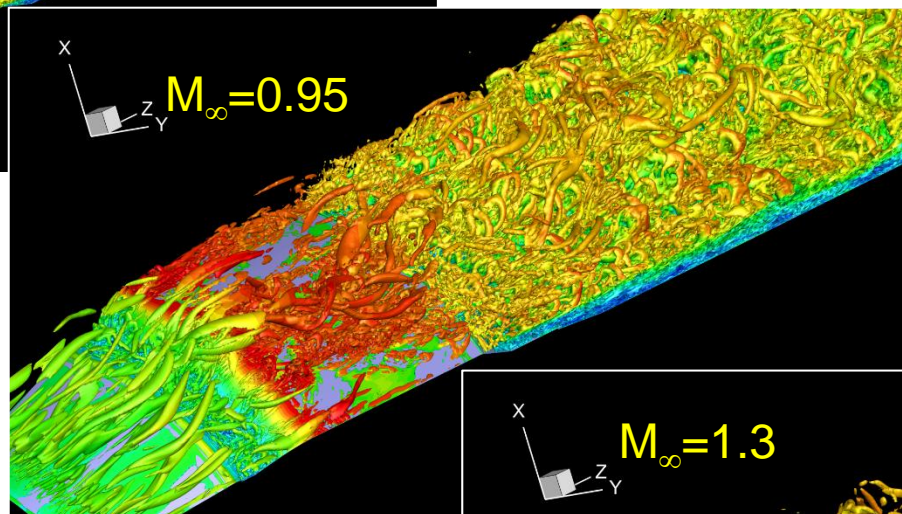
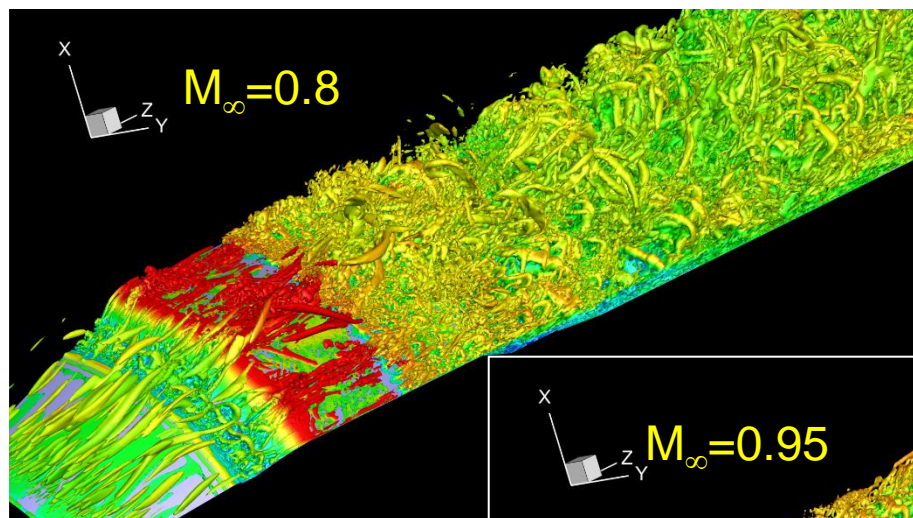
Расчетная сетка

- 27.2 млн. узлов, 2D: 0.132 млн. узлов
- 200 ячеек в азимутальном направлении
- Характерные размеры ячеек в WMLES зоне:
 - $\Delta x \leq \delta/10 = 20$ мм ($\delta = \delta_{0.99}$ – примерная толщина пограничного слоя)
 - $\Delta_{az} \leq \delta/20 = 10$ мм (азимутальное)
 - $\Delta_{y,1}^+ \leq 1$



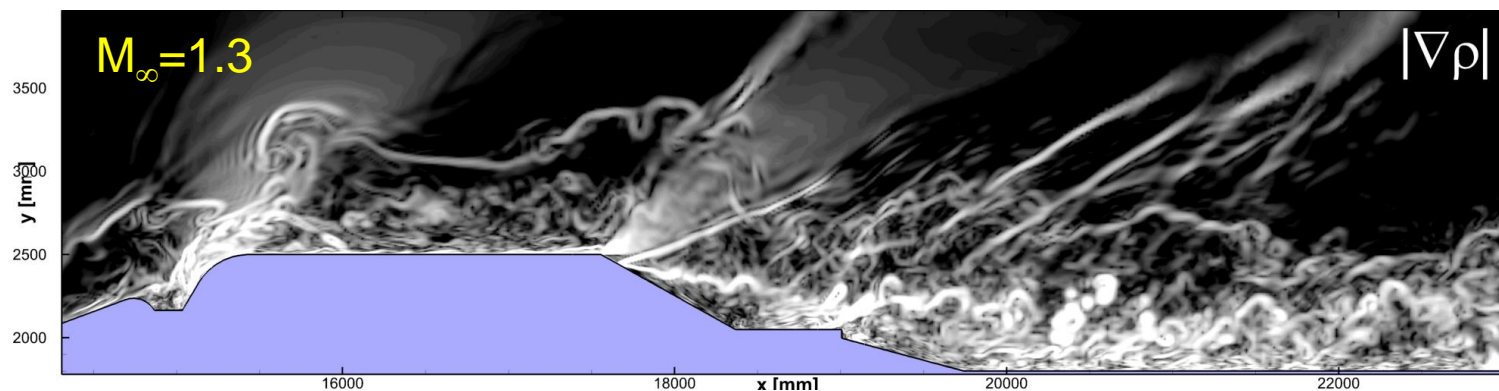
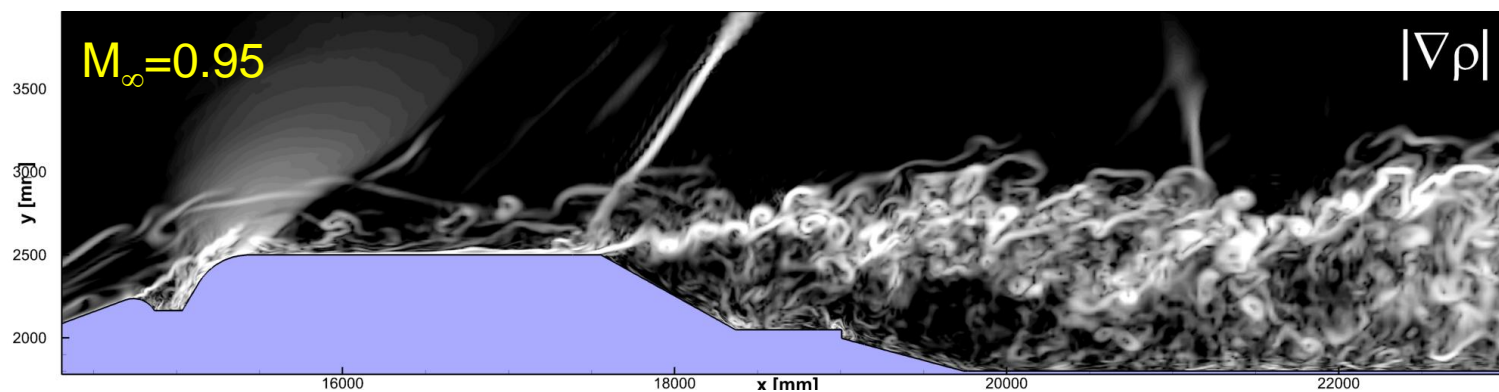
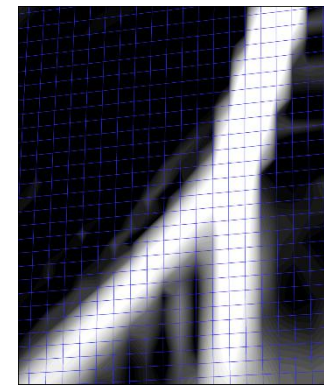
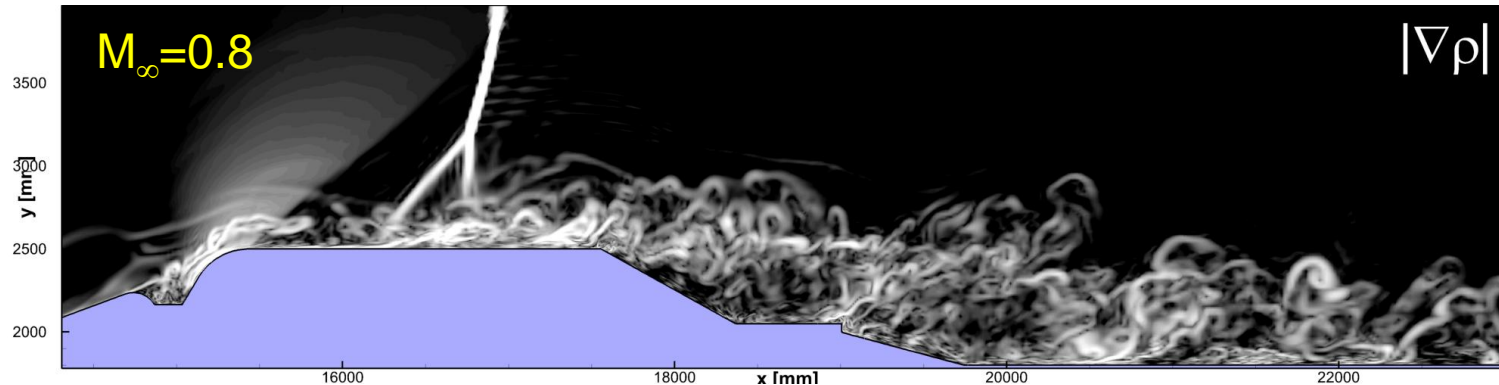
1 этап: SA IDDES расчет в секторе 45° (3)

Мгновенное течение: изоповерхности Q-критерия



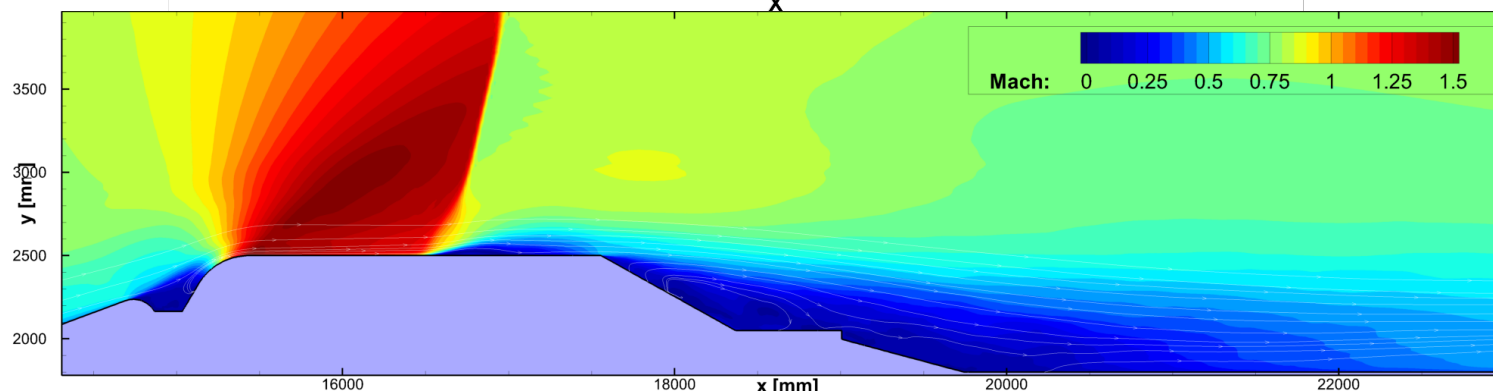
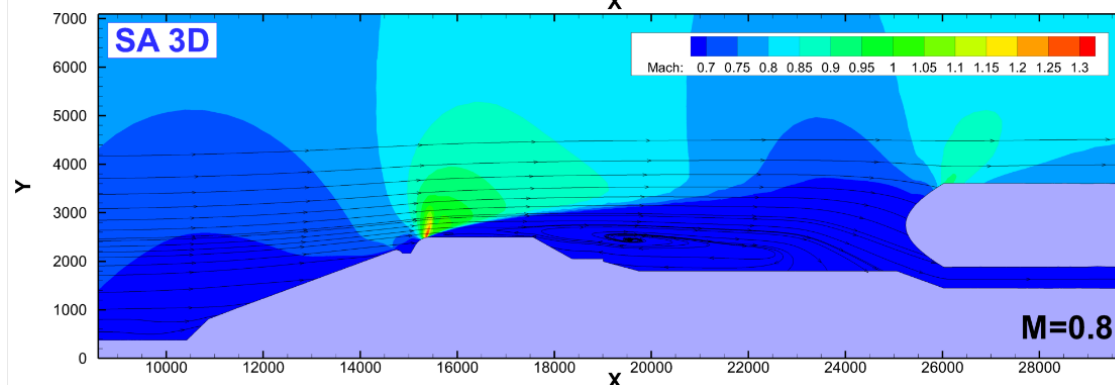
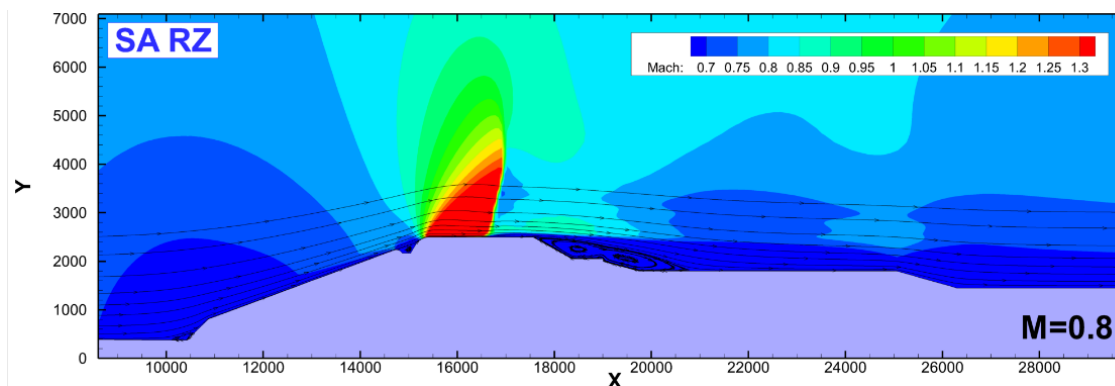
1 этап: SA IDDES расчет в секторе 45° (4)

Мгновенное течение: schlieren визуализация



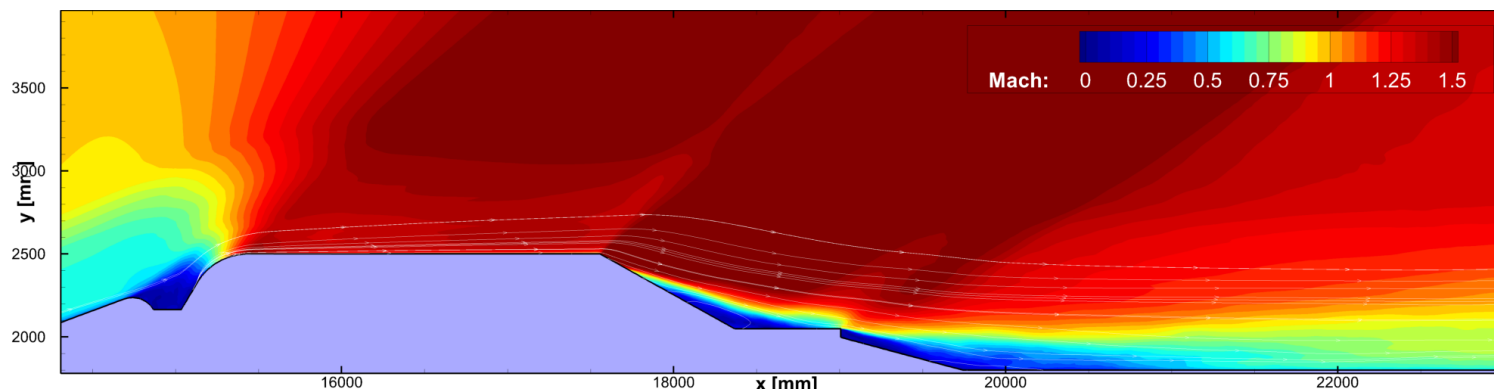
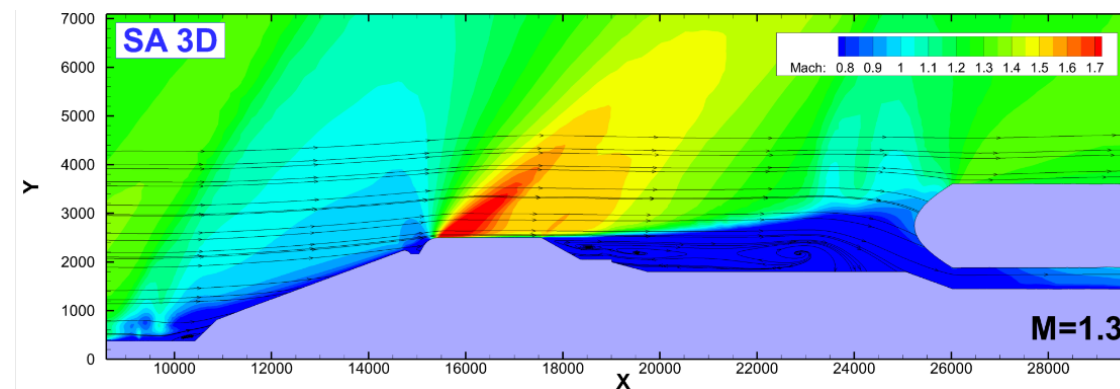
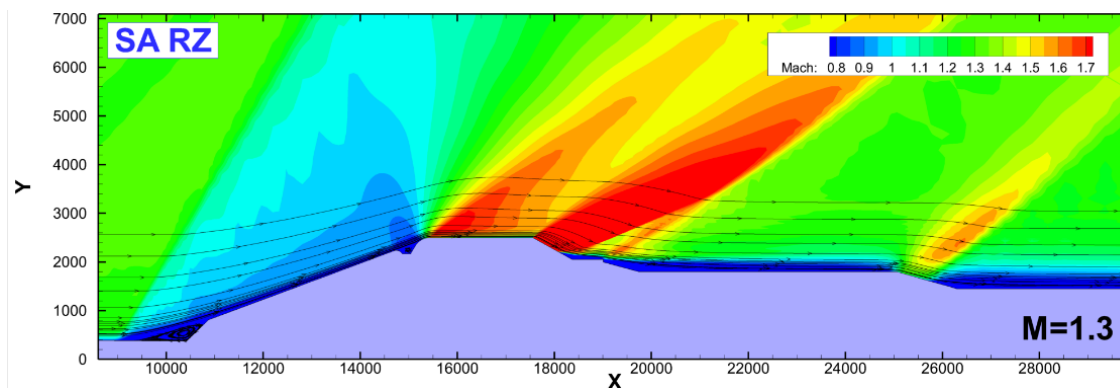
1 этап: SA IDDES расчет в секторе 45° (5)

Среднее IDDES vs RZ-RANS-SA vs 3D-RANS-SA ($M = 0.8$)



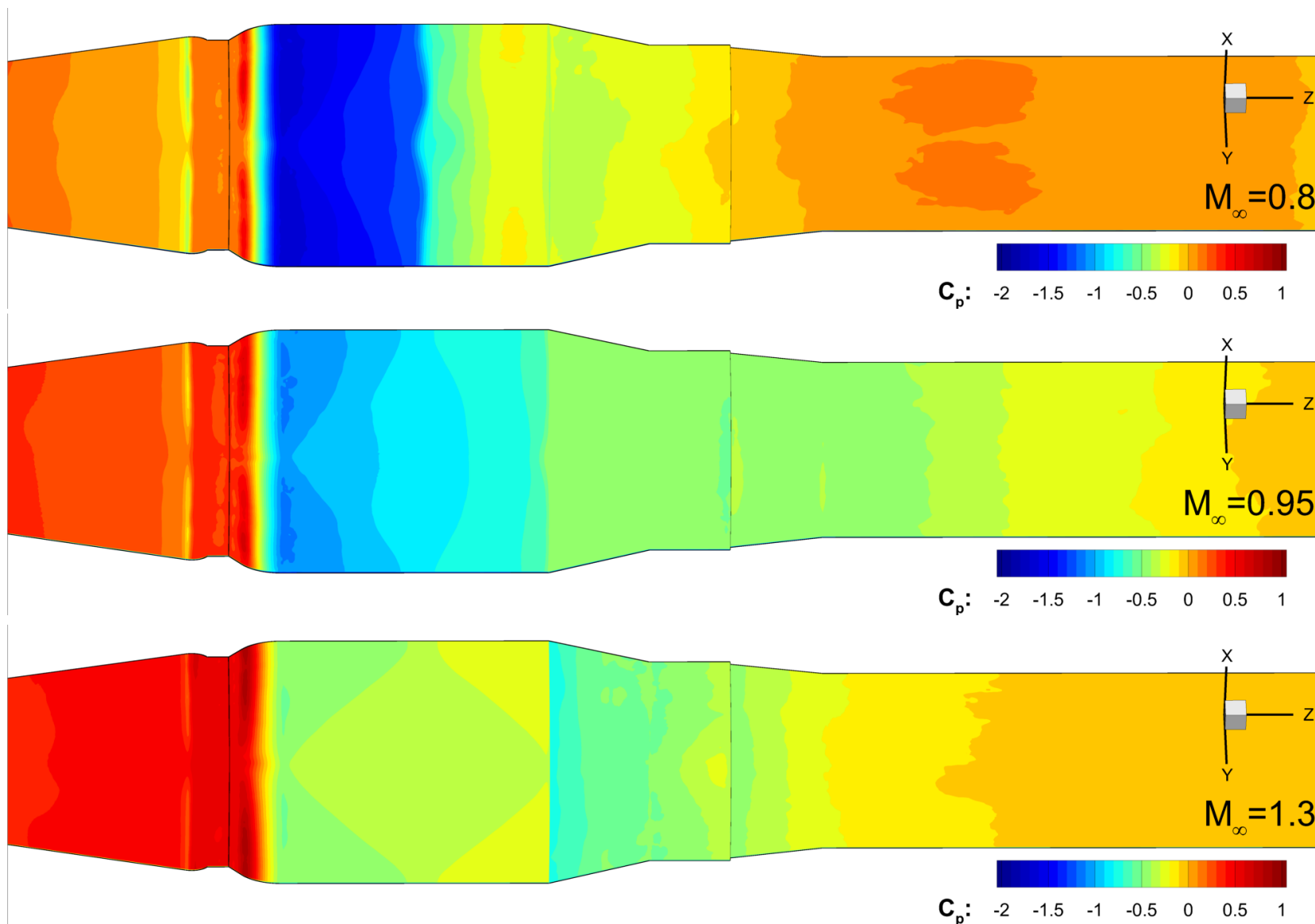
1 этап: SA IDDES расчет в секторе 45° (6)

Среднее IDDES vs RZ-RANS-SA vs 3D-RANS-SA ($M = 1.3$)



1 этап: SA IDDES расчет в секторе 45° (7)

Среднее значение коэффициента давления на твердой поверхности



1 этап: SA IDDES расчет в секторе 45° (8)

Среднеквадратичное значение пульсаций давления на твердой поверхности

