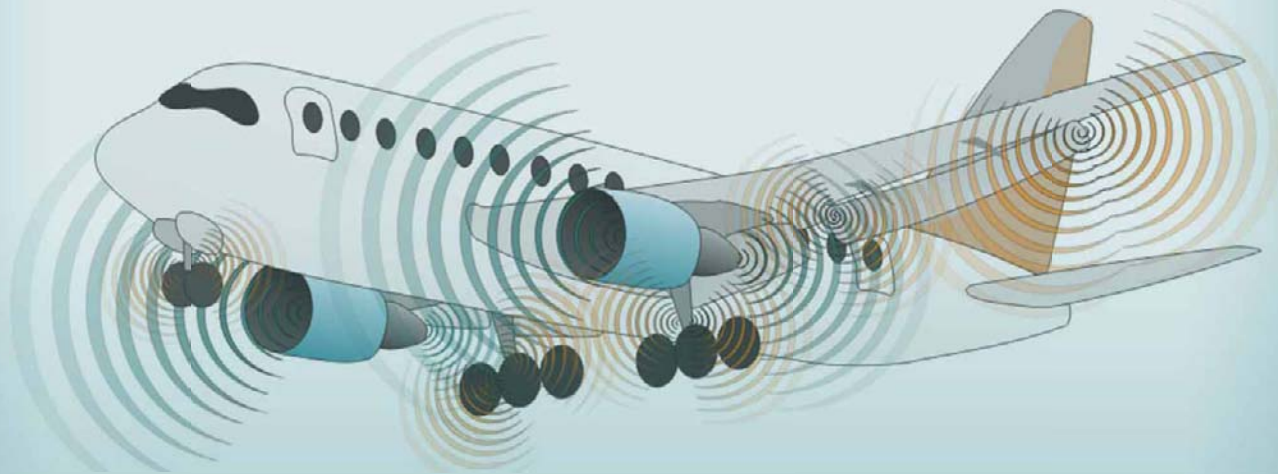




Суперкомпьютерные технологии расчета аэродинамических и акустических характеристик летательных аппаратов



Сектор вычислительной аэроакустики

<http://caa.imamod.ru>

ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

- **Базовая система уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа**

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F(Q)}{\partial x} + \frac{\partial G(Q)}{\partial y} + \frac{\partial H(Q)}{\partial z} = \frac{\partial F_\nu(Q)}{\partial x} + \frac{\partial G_\nu(Q)}{\partial y} + \frac{\partial H_\nu(Q)}{\partial z}$$

Q – вектор переменных (плотность, 3 компоненты скорости, давление),

F, G, H – вектора конвективных потоков

F_ν, G_ν, H_ν – вектора диссипативных потоков.

- **Неструктурированные сетки**

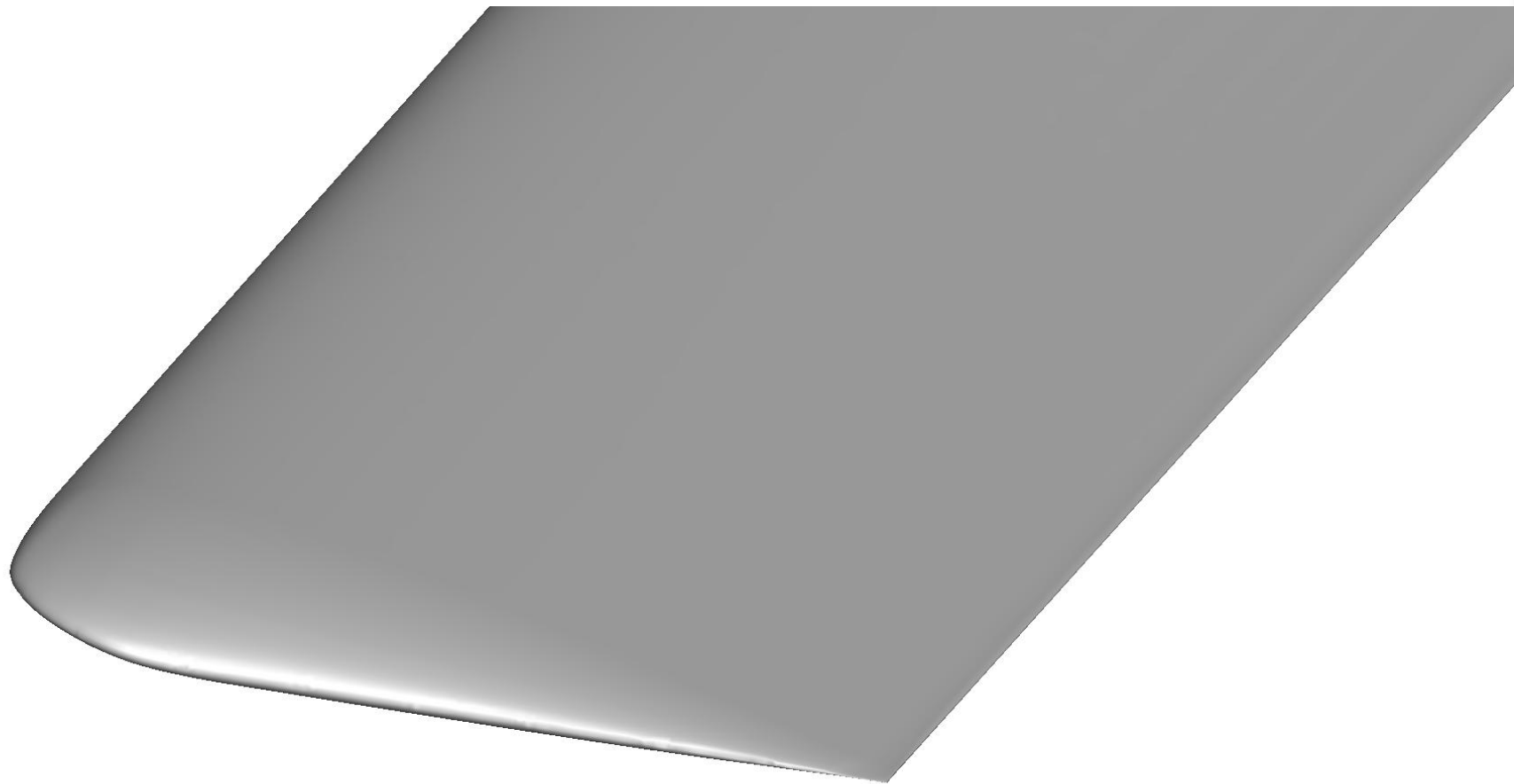
- Треугольные/тетраэдральные сетки
- Гибридные сетки (элементы до 6 граней)

- **Схемы повышенной точности**

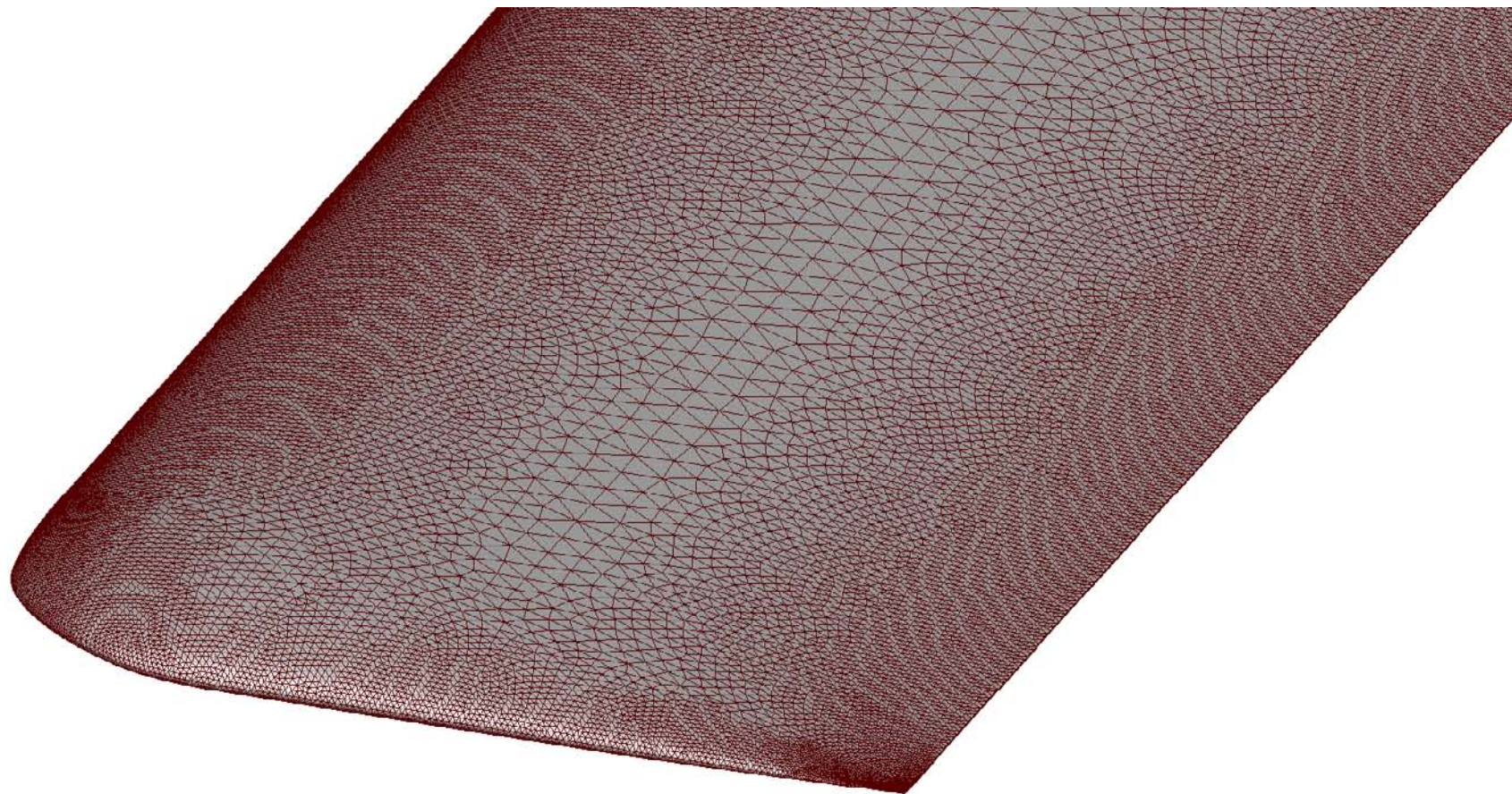
- EBR схемы с квазиодномерной реконструкцией
- Полиномиальная конечно-объемная схема

- **Интегрирование по времени**

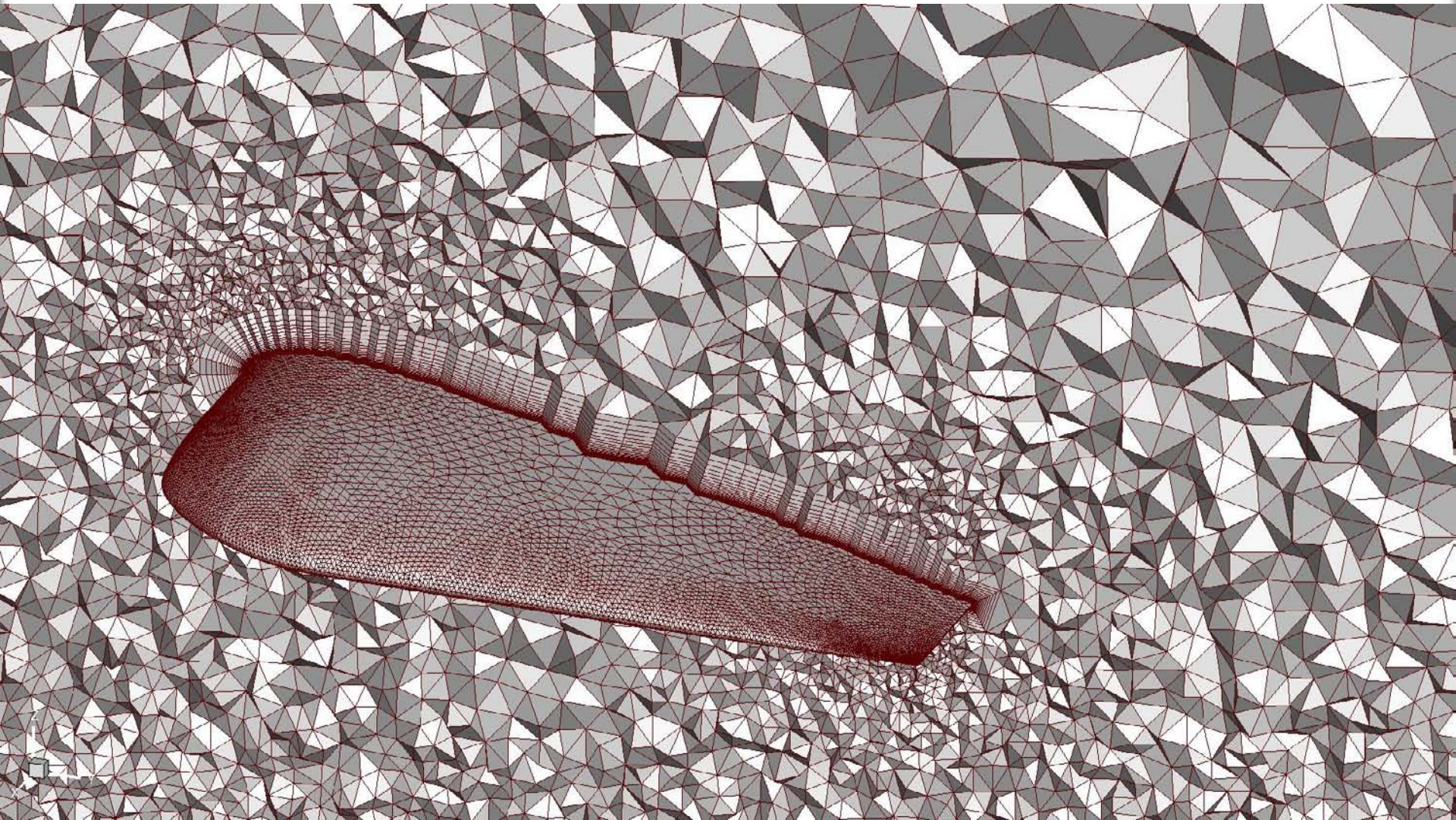
- Явная схема (Рунге-Кутта 1 – 4-го порядка)
- Неявная схема 1-2 порядка с линеаризацией по Ньютону разностной системы уравнений



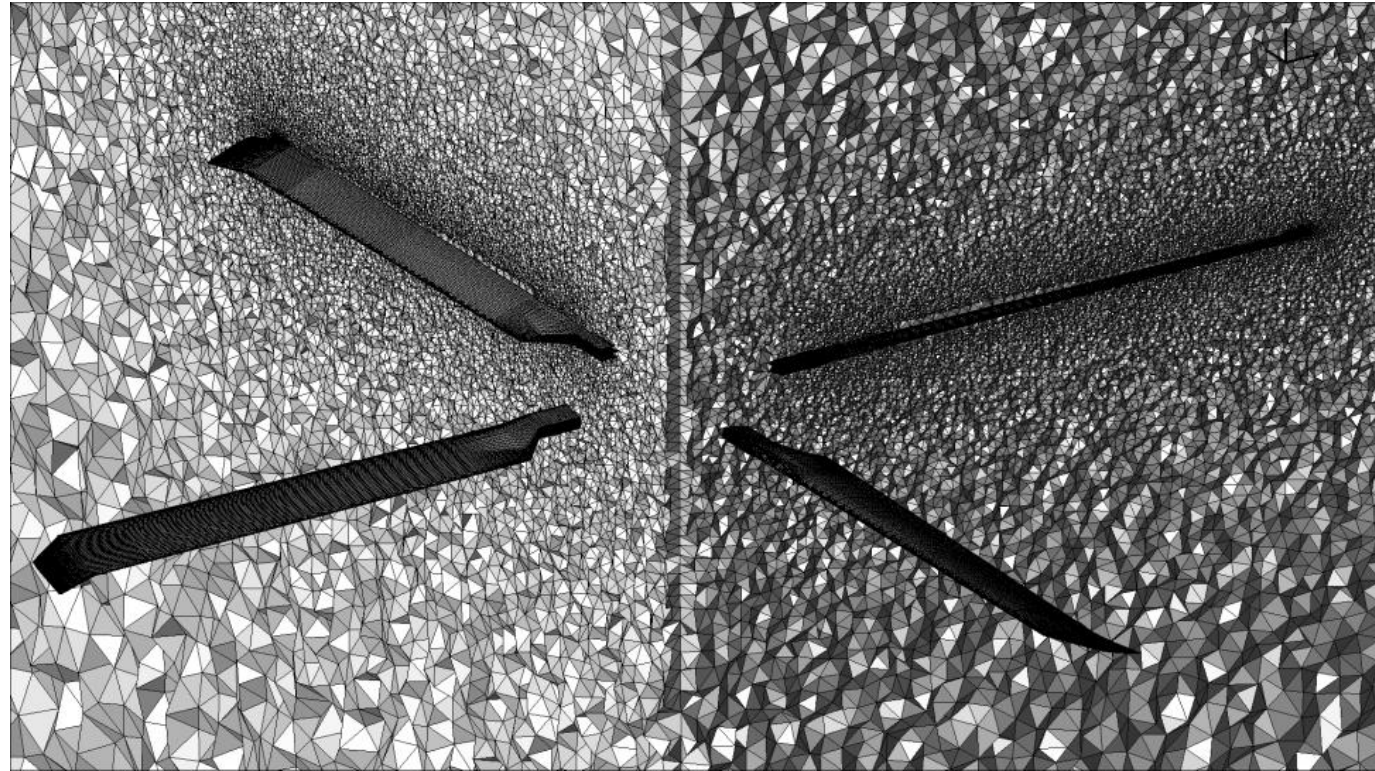
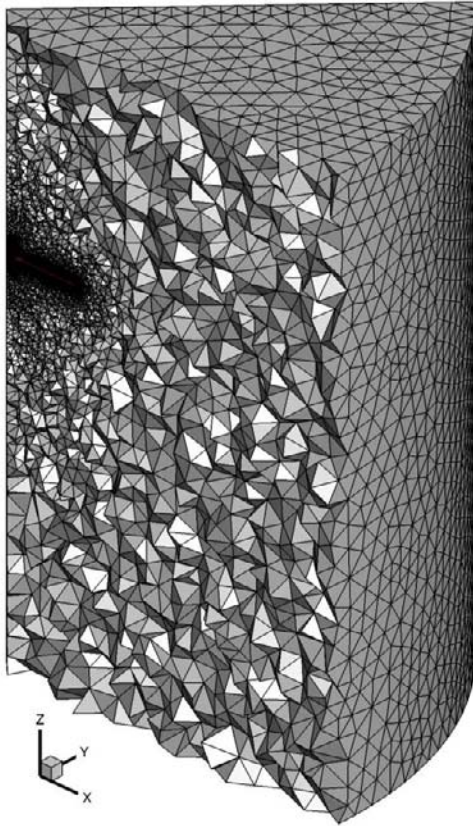
CAD модель лопасти несущего винта



Сеточная модель лопасти несущего винта



Объемная сетка вокруг лопасти несущего винта



Алгоритм

Заполнение данных для реконструкции
цикл по набору ячеек



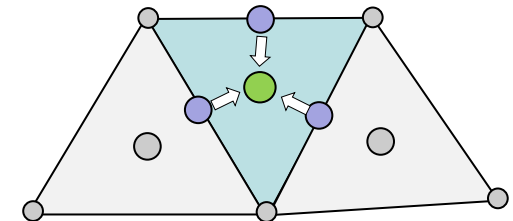
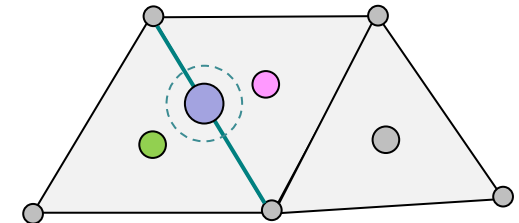
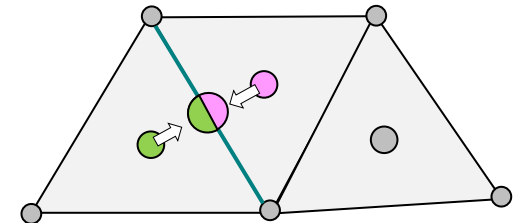
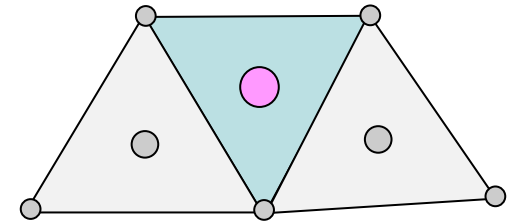
Реконструкция по значениям в ячейках
значений “слева” и “справа” в центрах граней
цикл по набору граней



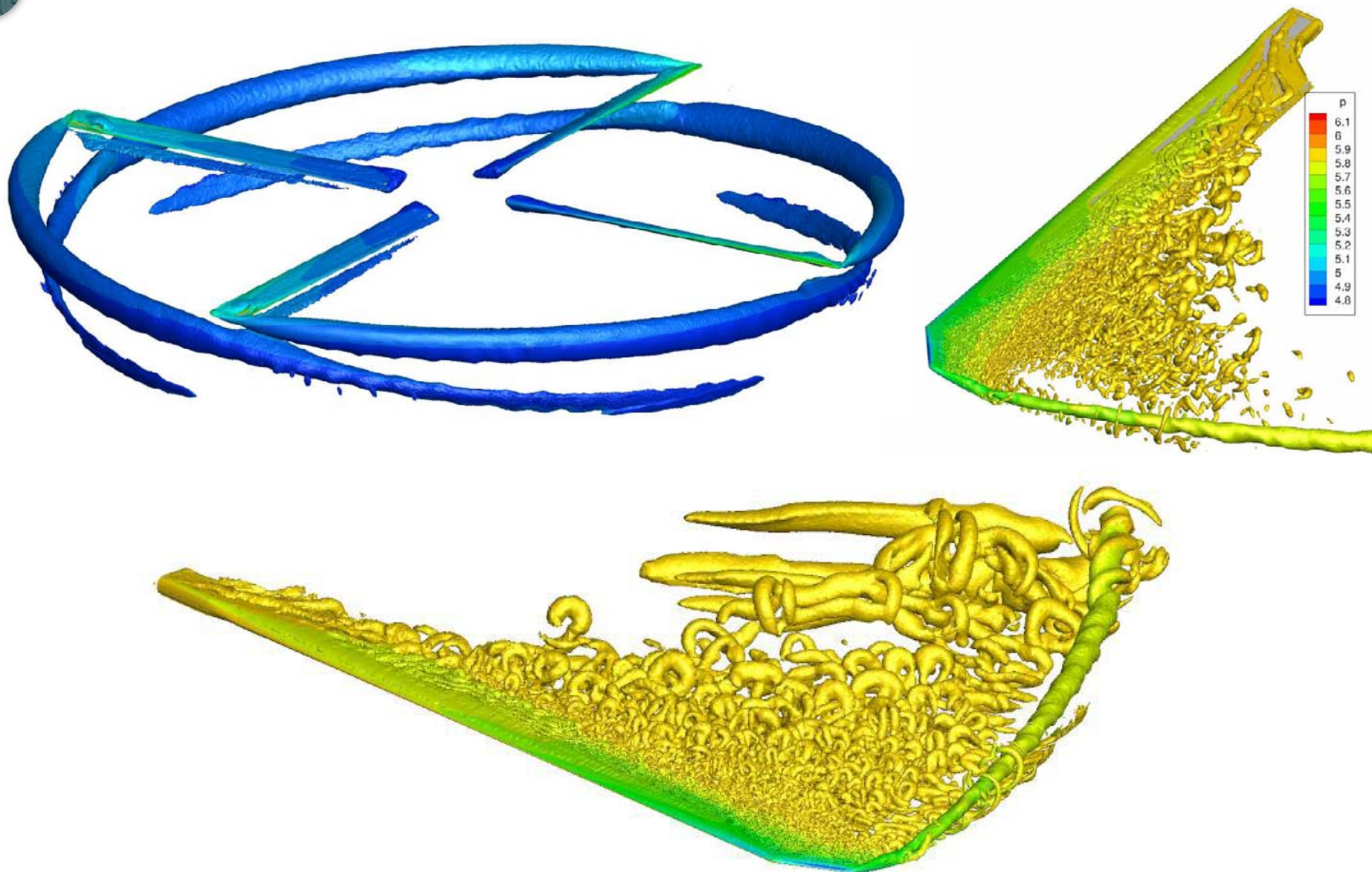
Расчет потока через грань
решение задачи Римана о распаде разрыва
цикл по набору граней



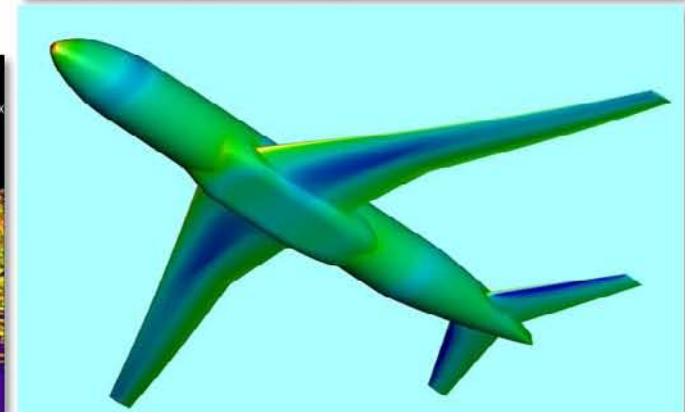
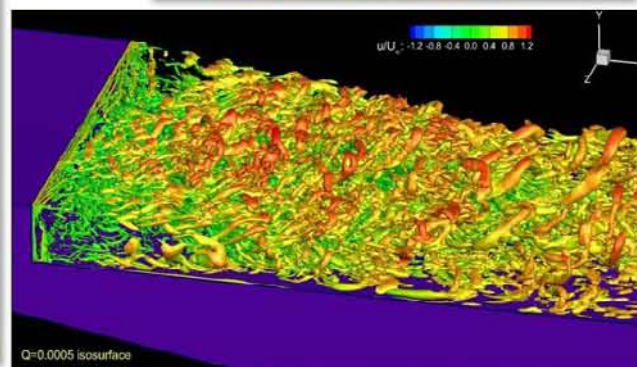
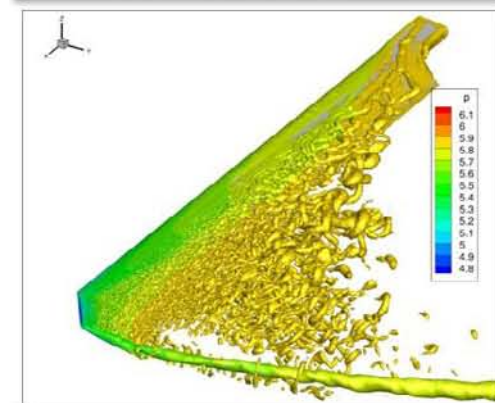
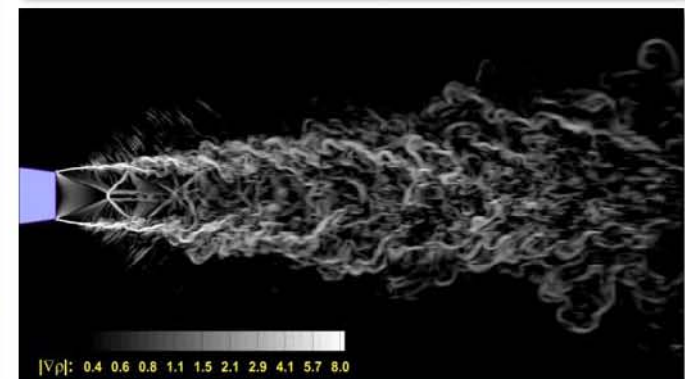
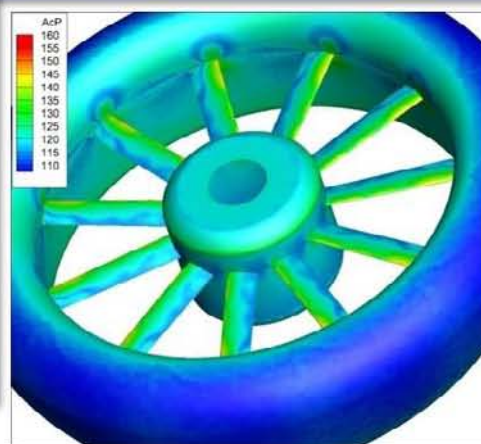
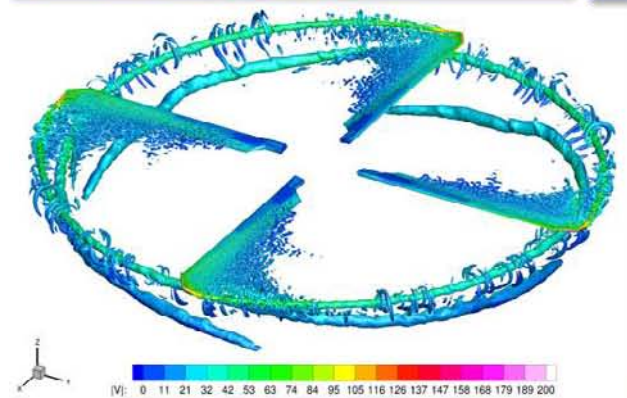
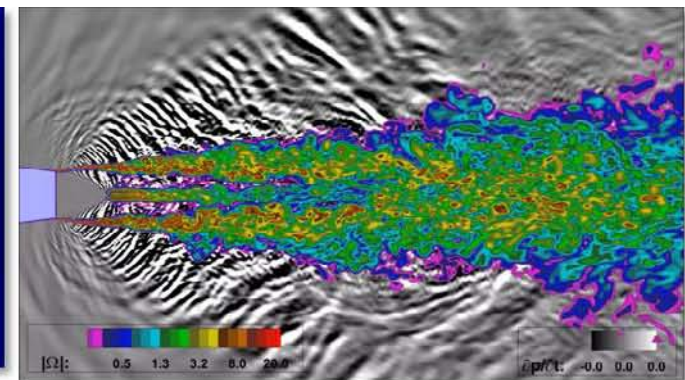
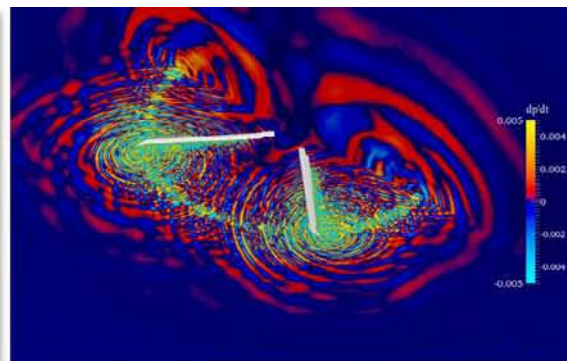
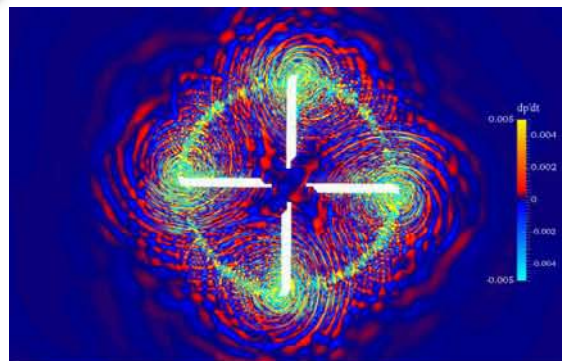
Переход на новый временной слой:
суммирование потоков через грани в ячейки
цикл по набору ячеек



Продвигаясь по временным слоям получаем картину течения

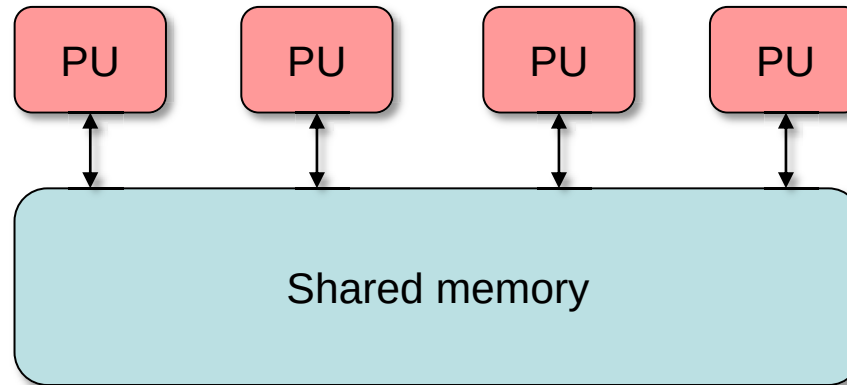


CFD и САА приложения

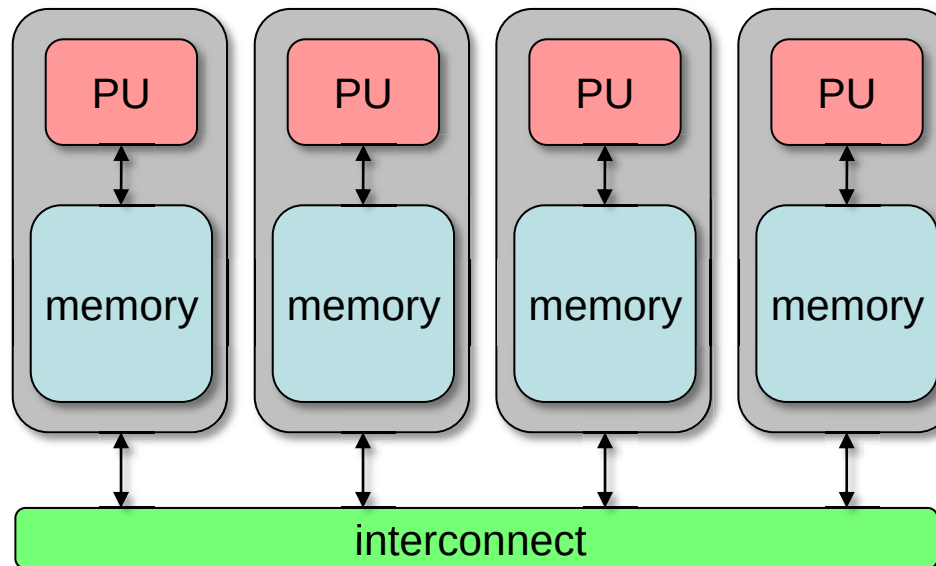


- SISD - Single Instruction, Single Data stream
- MISD - Multiple Instruction, Single Data stream
- SIMD - Single Instruction, Multiple Data streams
- MIMD - Multiple Instruction, Multiple Data streams

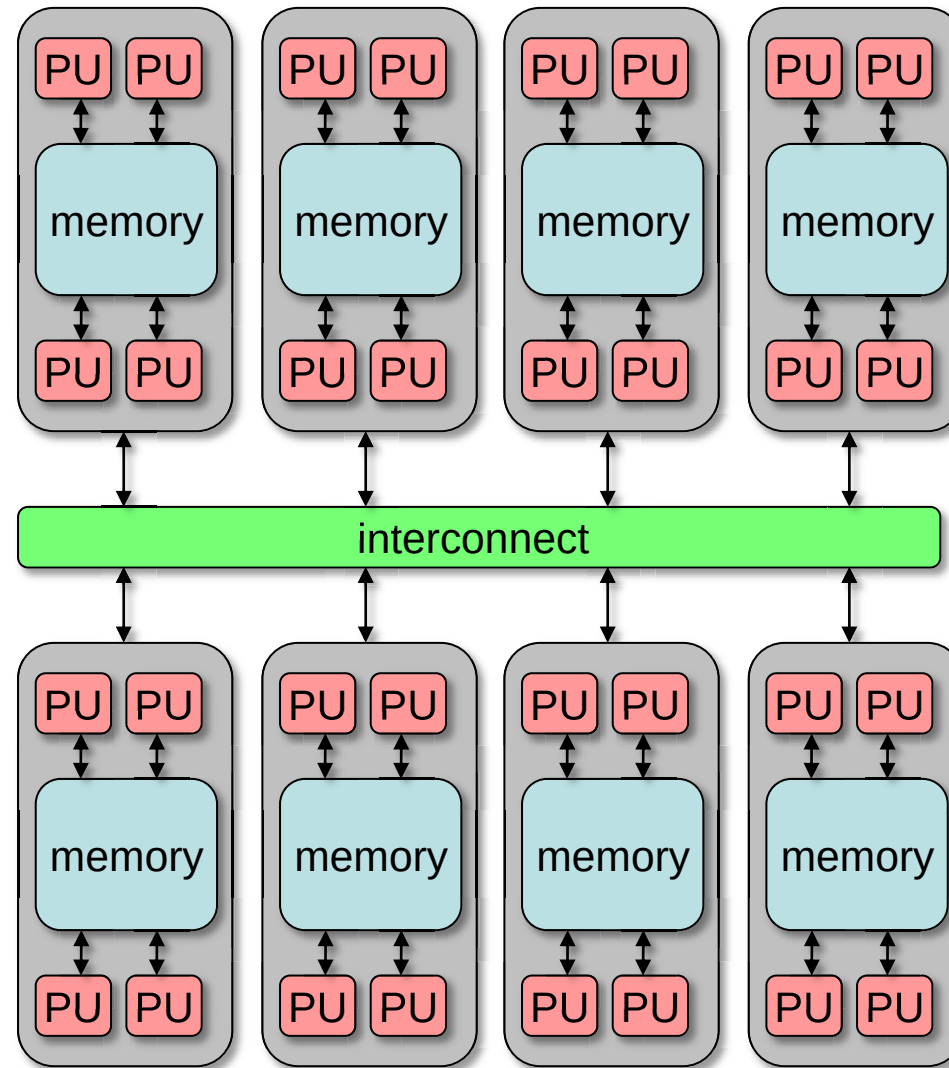
Shared memory
MIMD



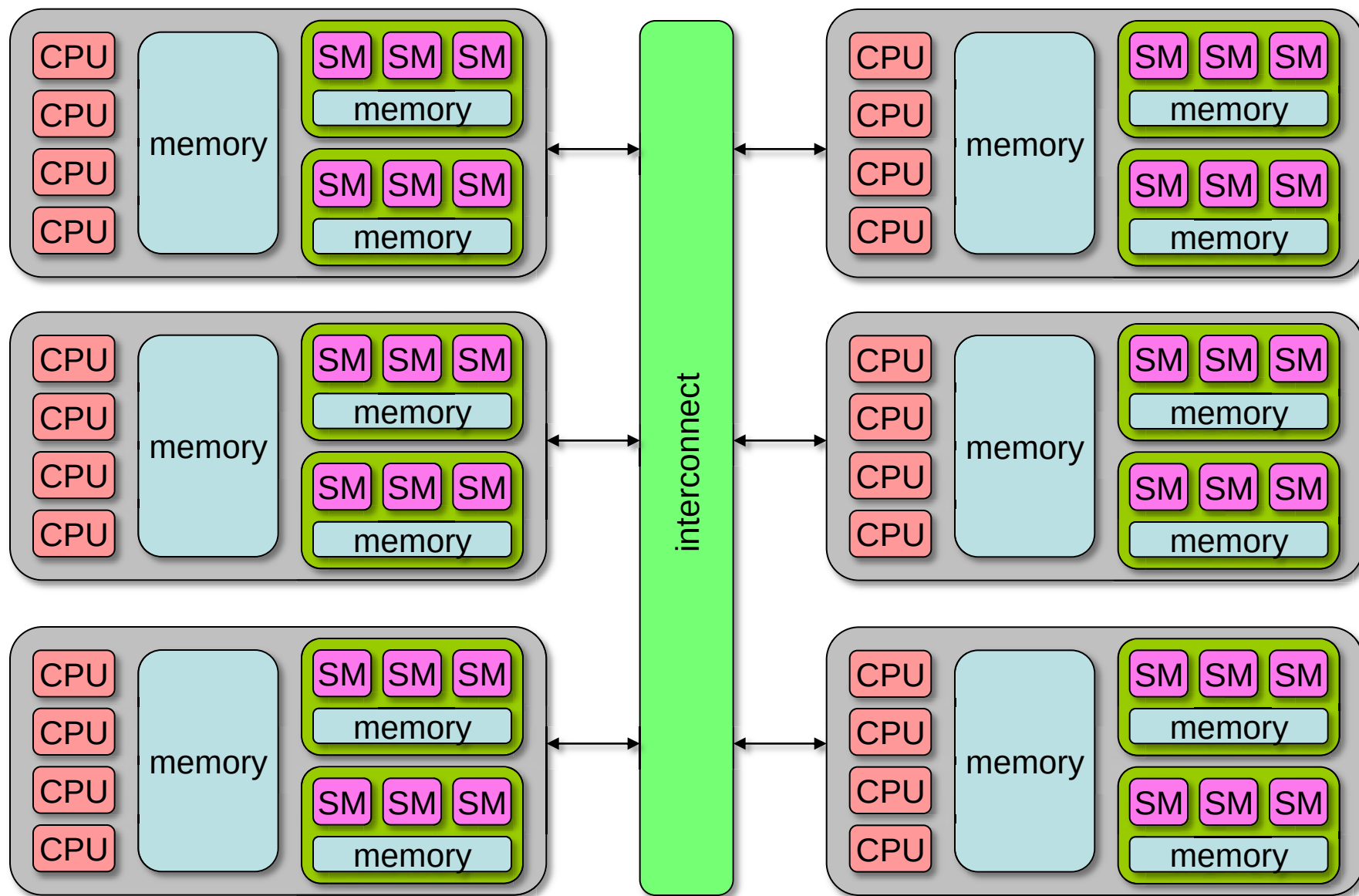
Distributed memory
MIMD



MIMD – общая и распределенная память



Гибридная система CPU + GPU



CPU: multicore, superscalar, out-of-order или WLIV, SIMD

Векторные процессоры NEC

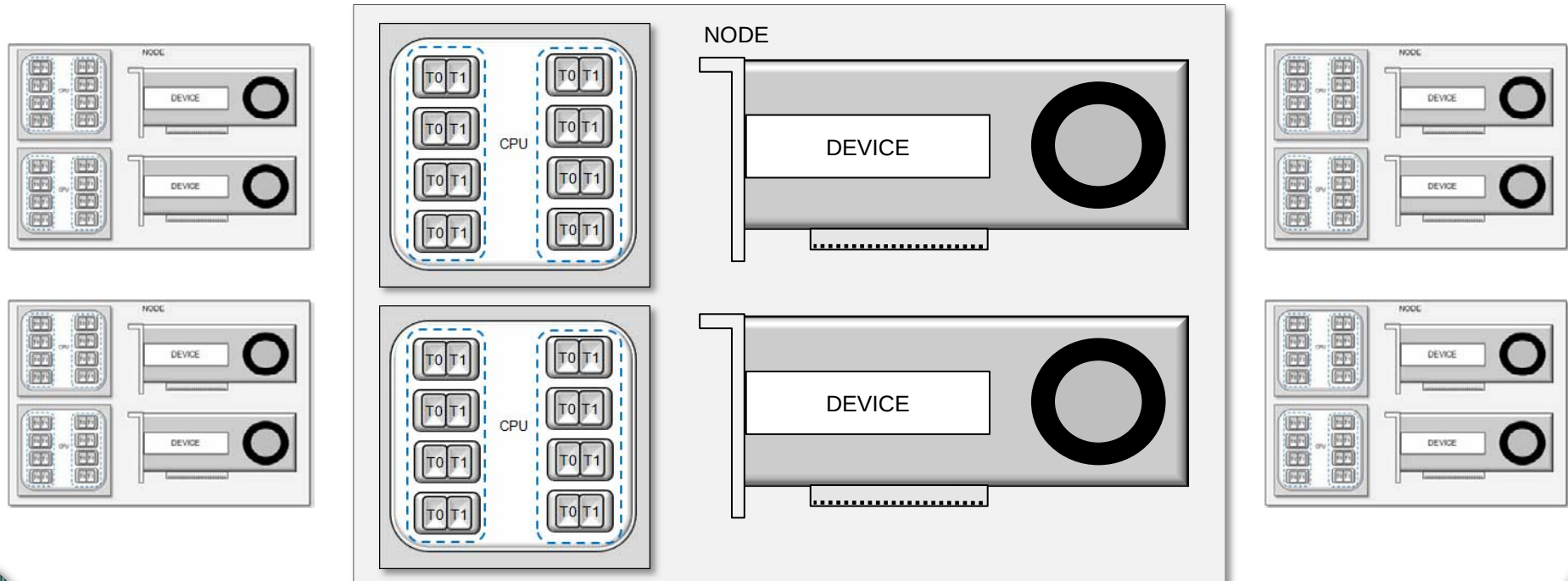
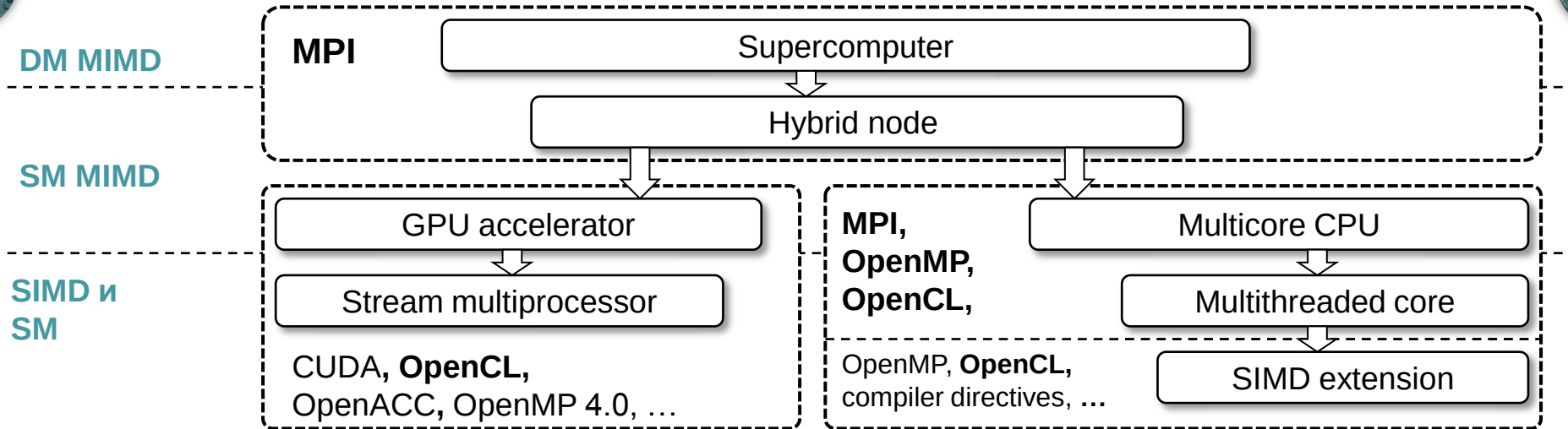
MIC: manycore процессоры и ускорители Intel Xeon Phi

GPU: stream processing

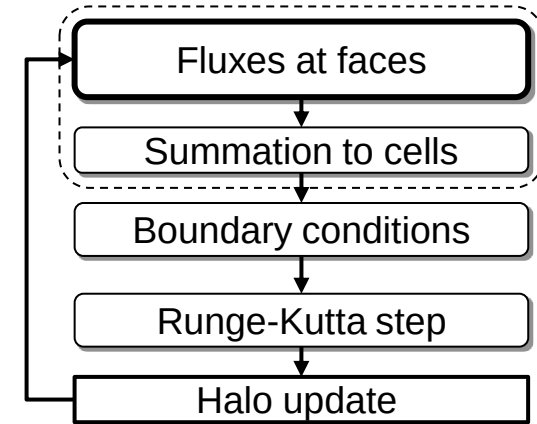
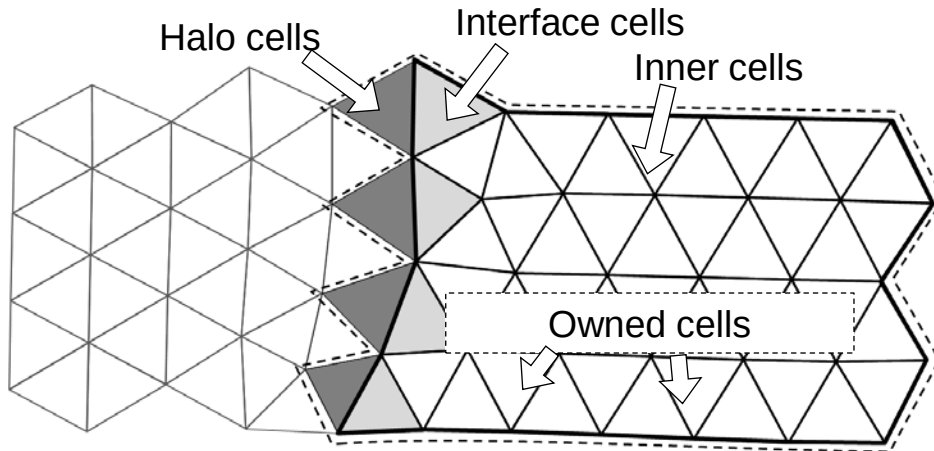
SoC: совмещенные CPU+GPU устройства

FPGA ускорители

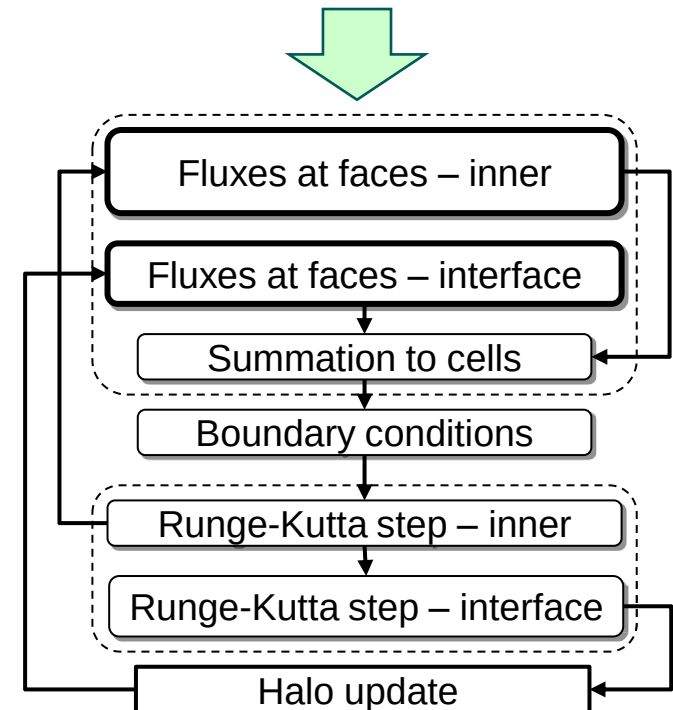
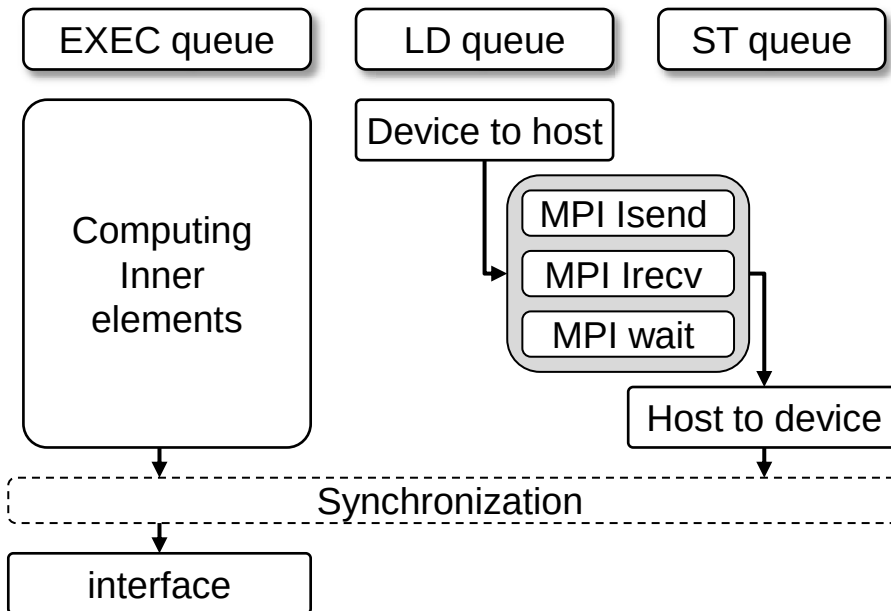
Уровни параллелизма и средства разработки



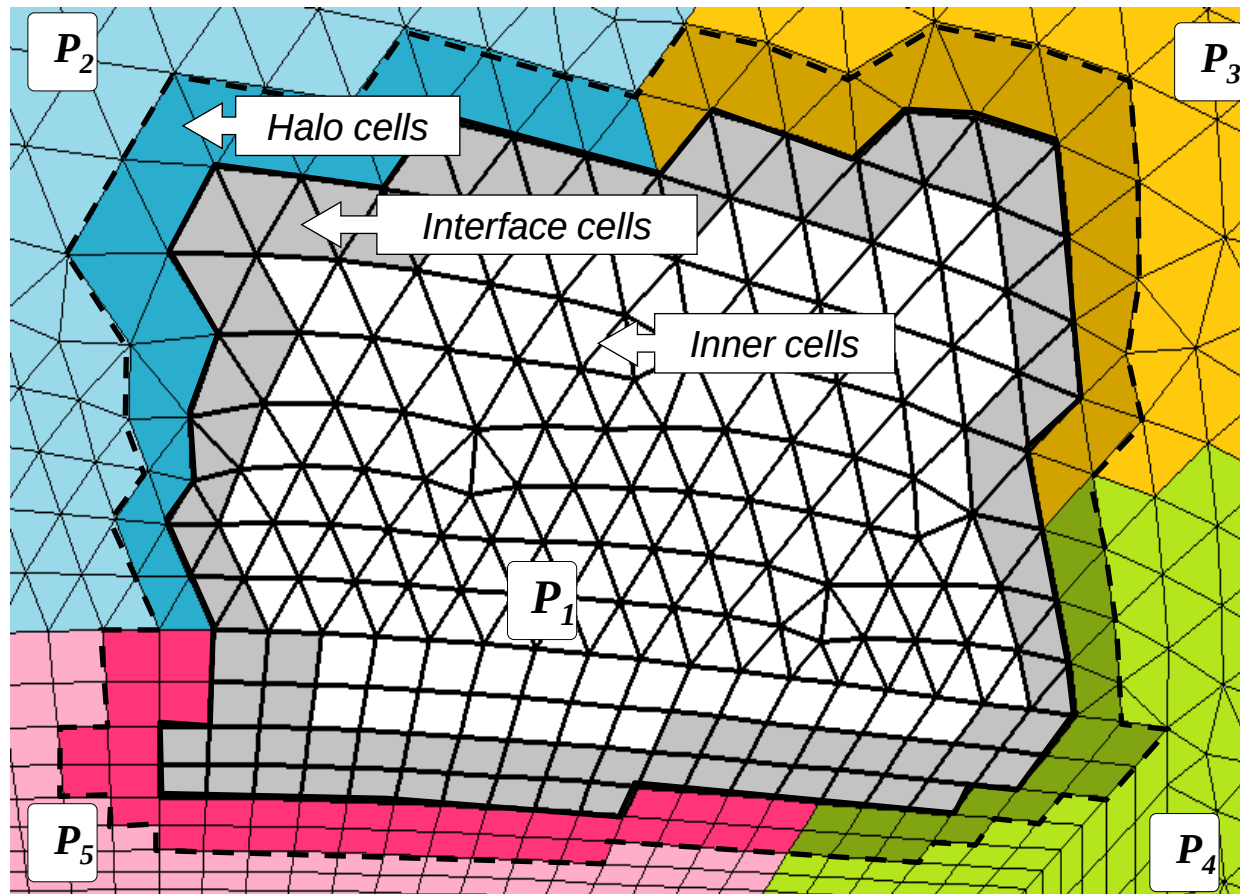
Overlap: сокрытие обменов за вычислениями



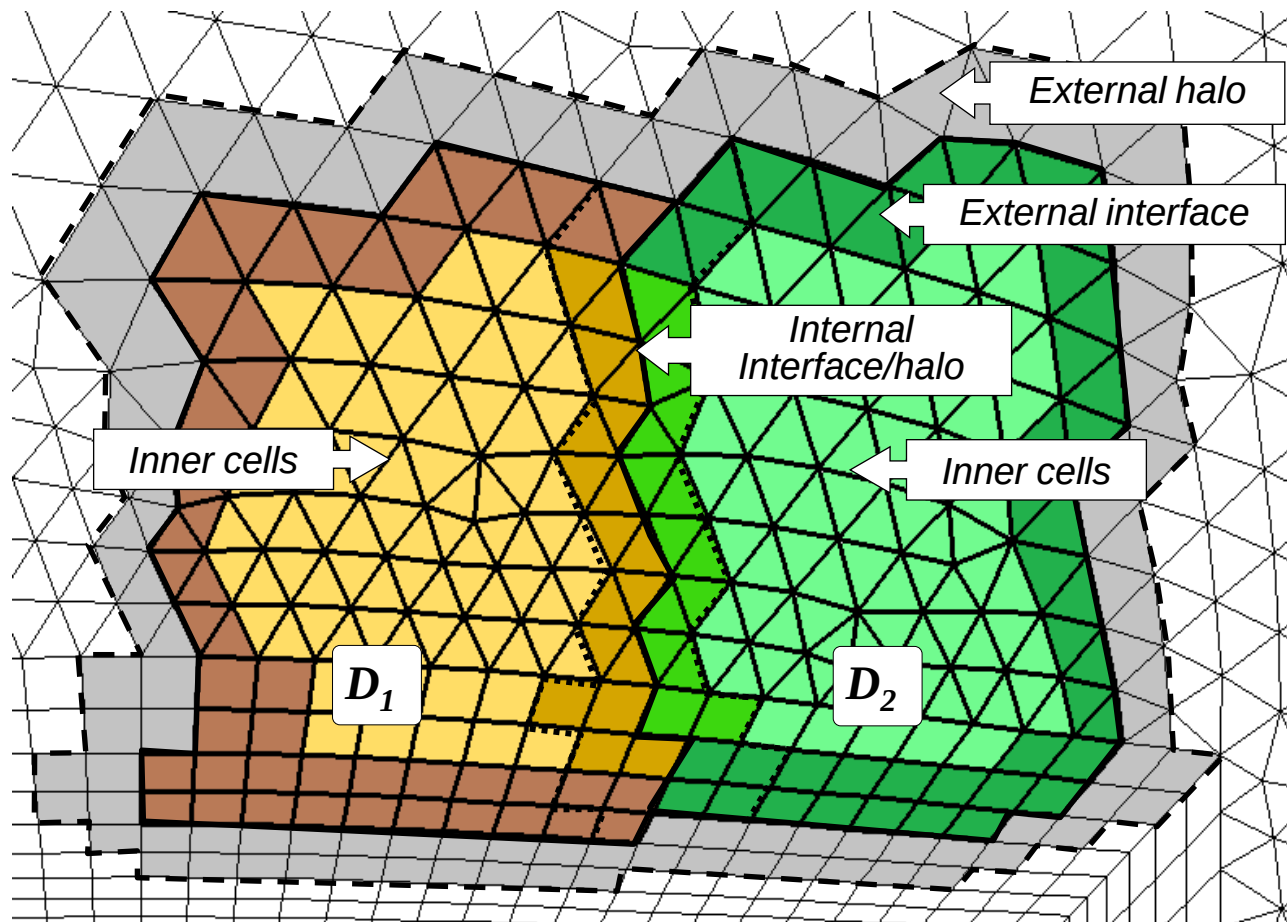
Вычисления и обмен данными

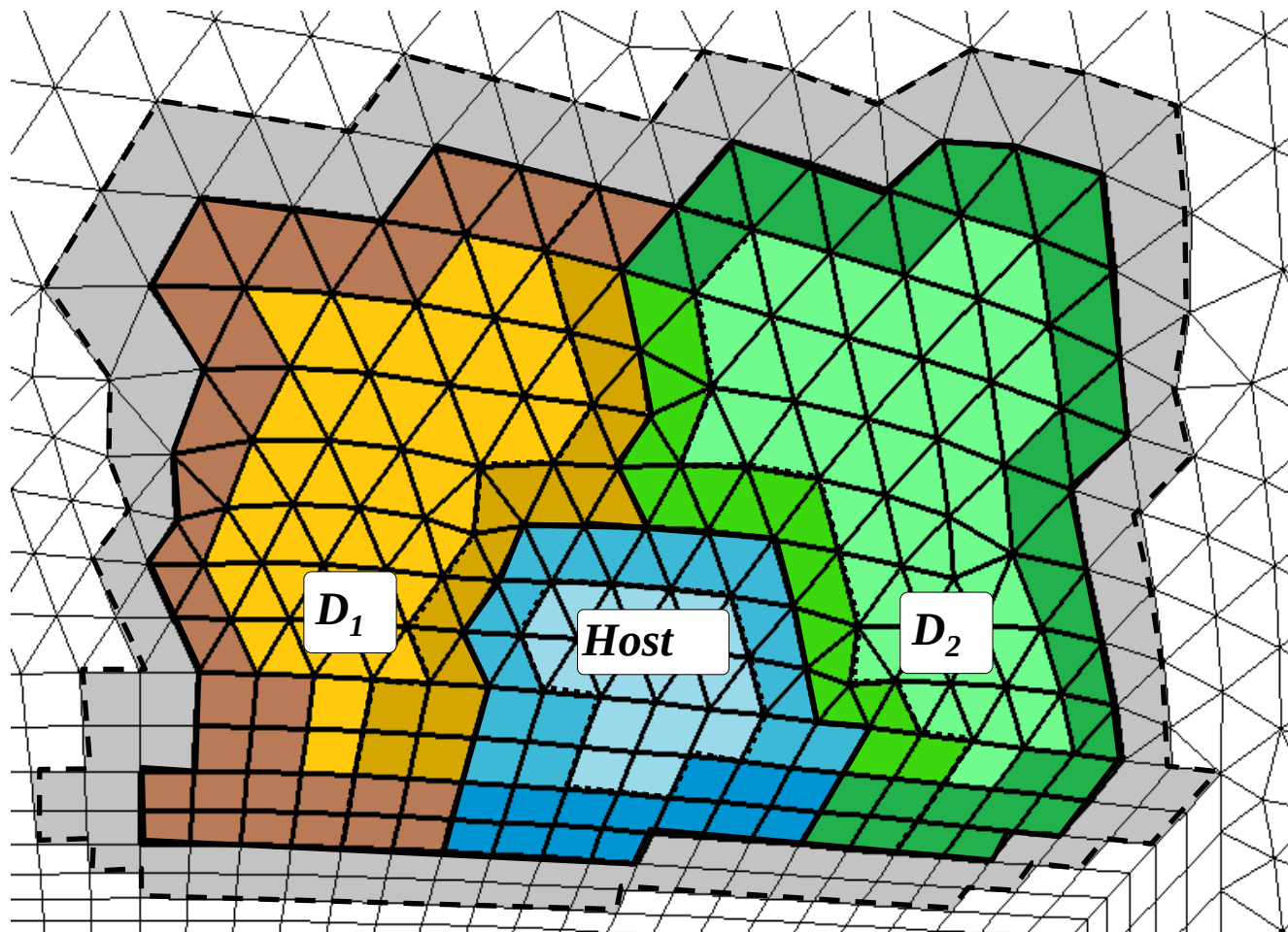


Многоуровневая декомпозиция

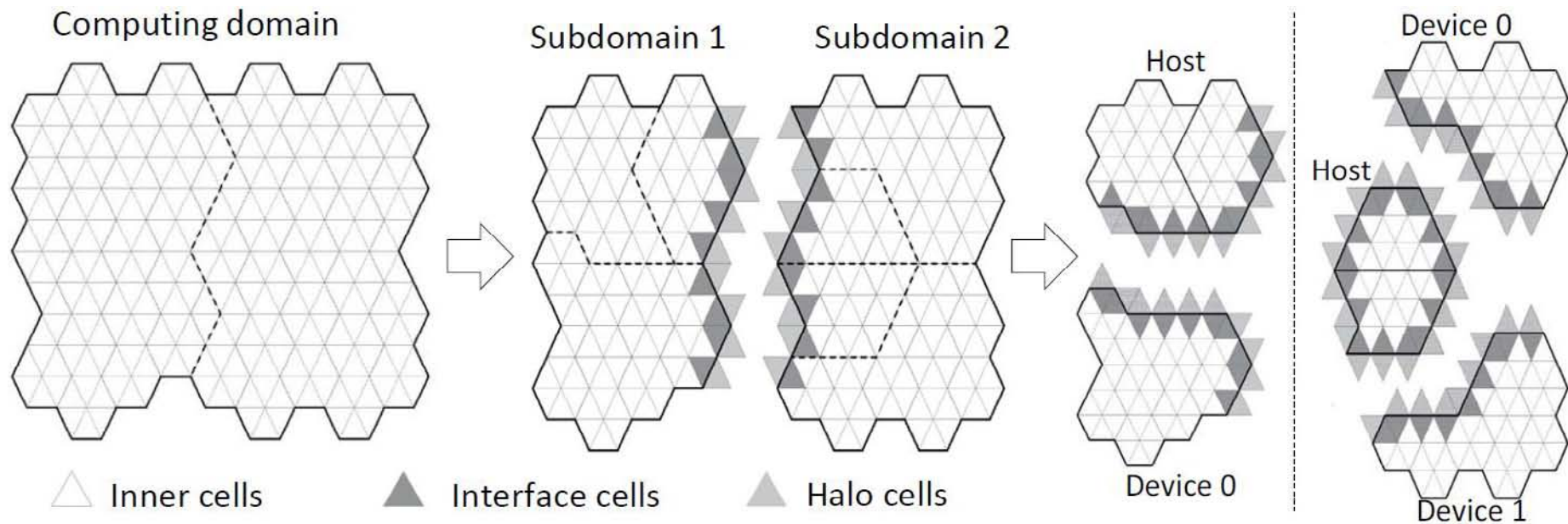


Многоуровневая декомпозиция





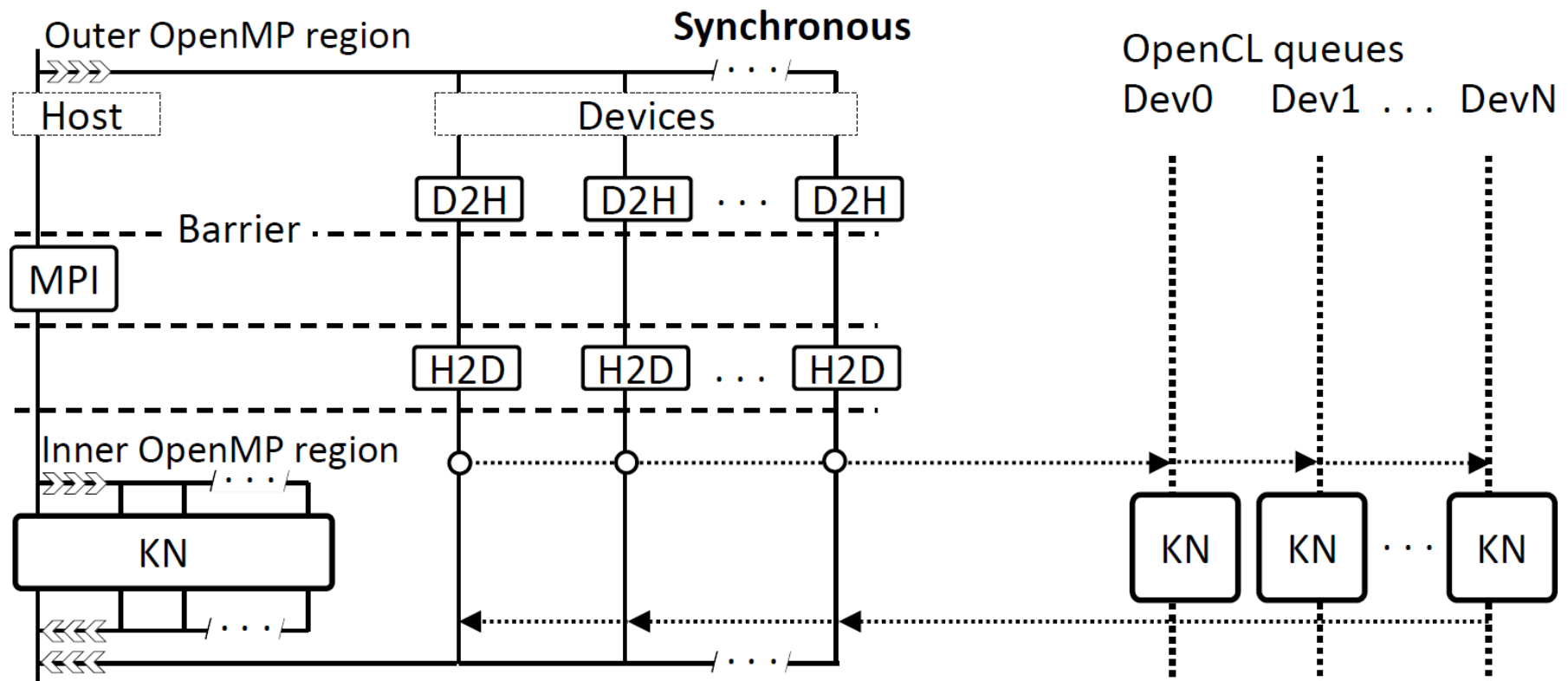
Многоуровневая декомпозиция

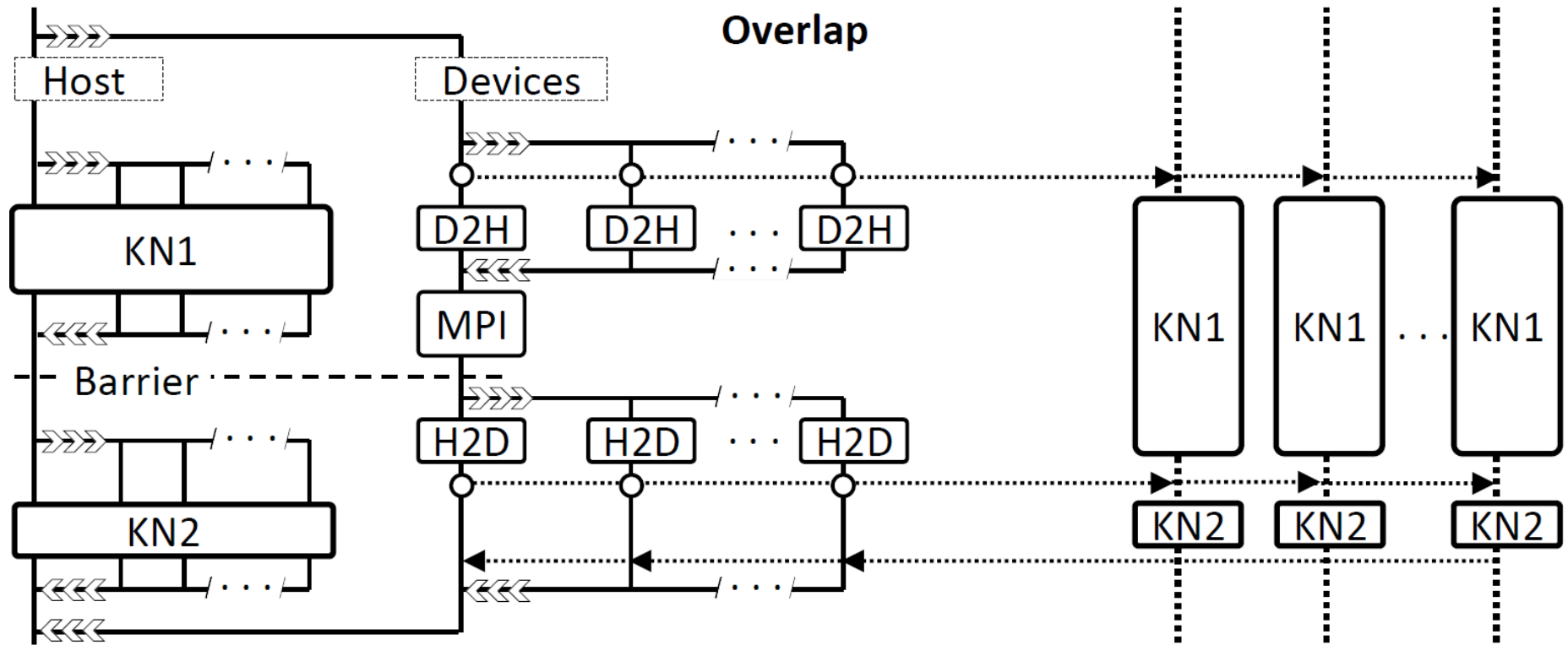


$$t_{sync} = t_{HD} + t_{MPI} + \max(N^{d_k})C_D$$

$$t_{HD} = T_{HD}(\max(N_I^{d_k}) + \max(N_H^{d_k}))$$

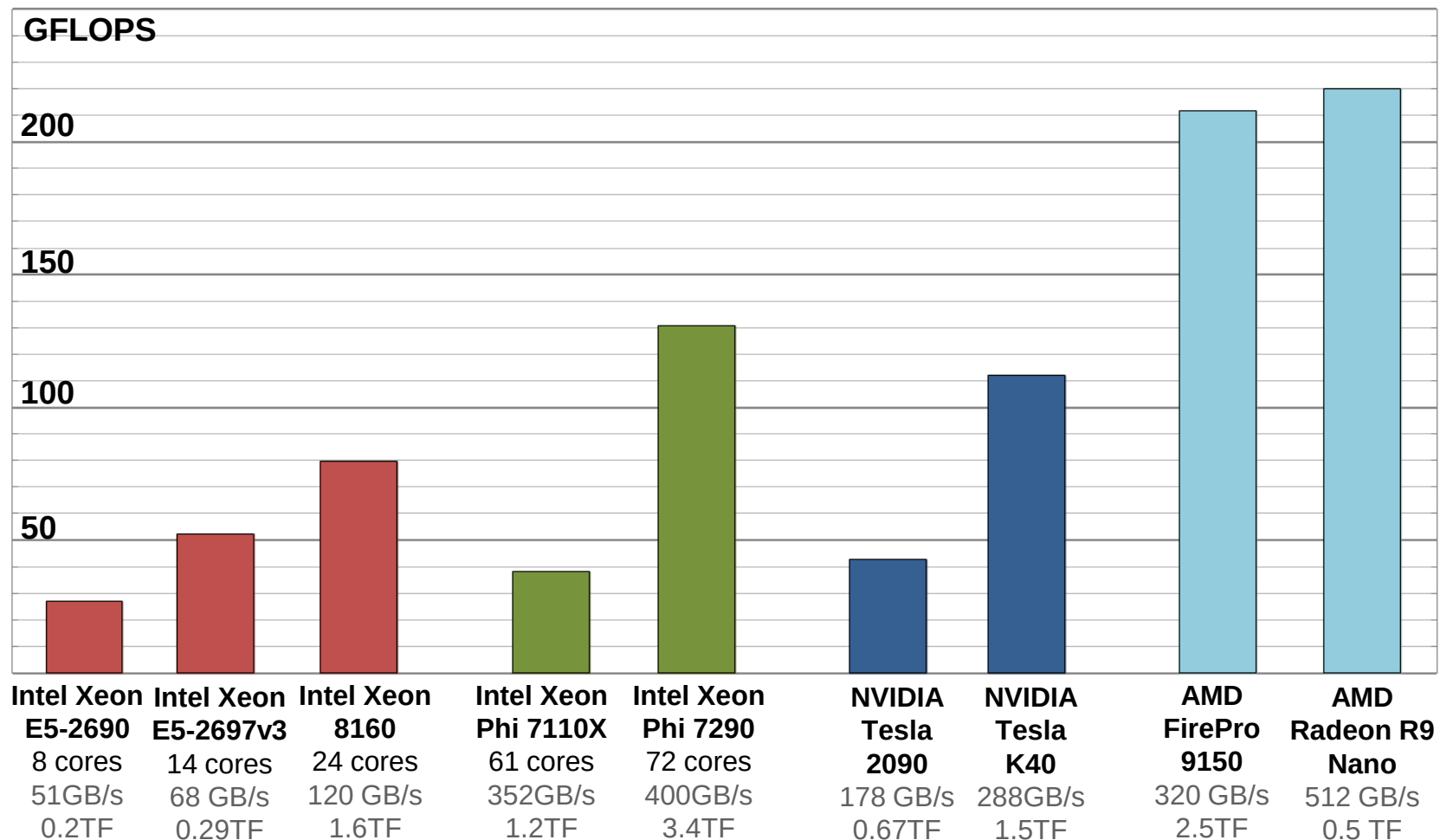
$$t_{MPI} = T_{MPI}(N_I + N_H)$$





$$t_{over} = \max(t_{HD} + t_{MPI}, \max(N_L^{d_k})C_D) + \max(N_I^{d_k})C_D$$

Сравнение производительности

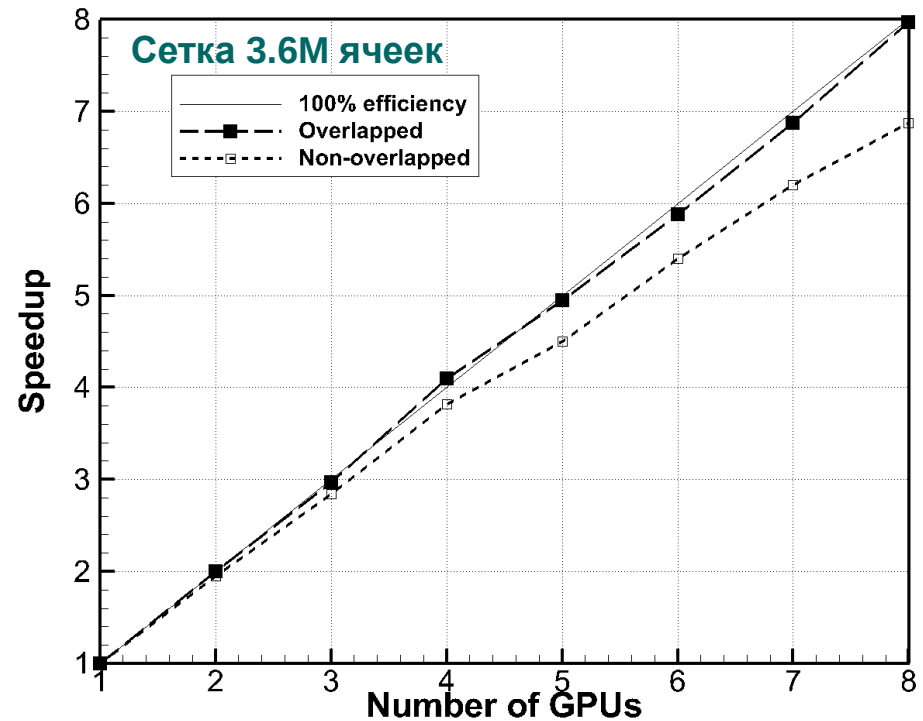
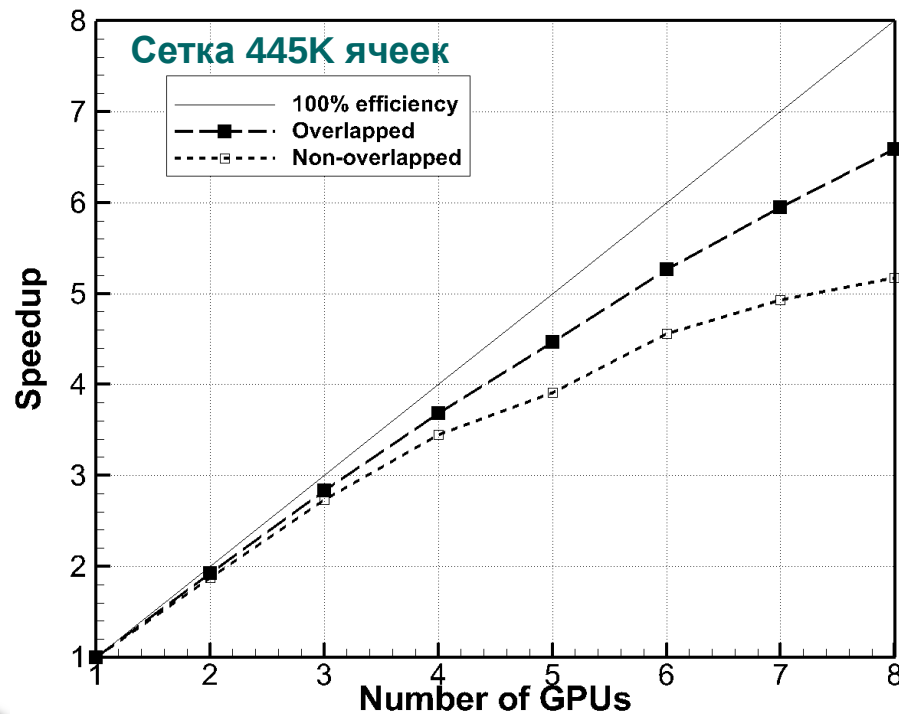


Mesh 445K cells. 1 time step takes from 90 ms on X5670 to 5 ms on AMD Nano
 computing density ~2 FLOP per byte, ~2.5 KFLOP per cell, ~1.1KB per cell

Мульти-GPU на одиночном узле

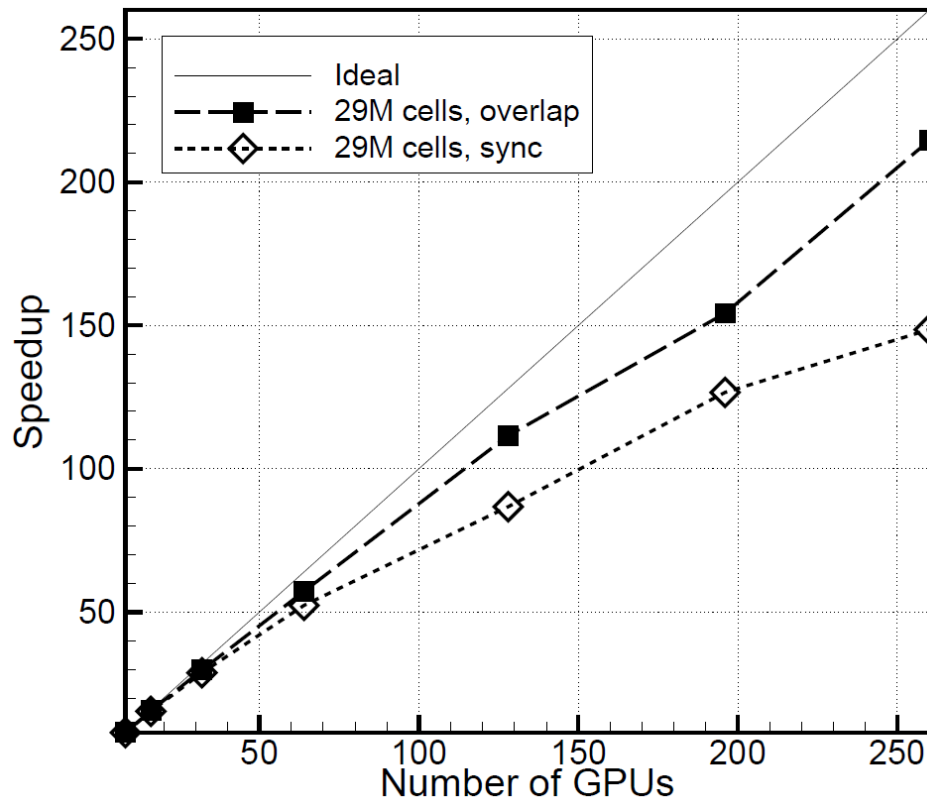
“Fat node” 8 GPU

- NVIDIA GTX Titan
288GB/s, 1.5TF
- PCI-E 3

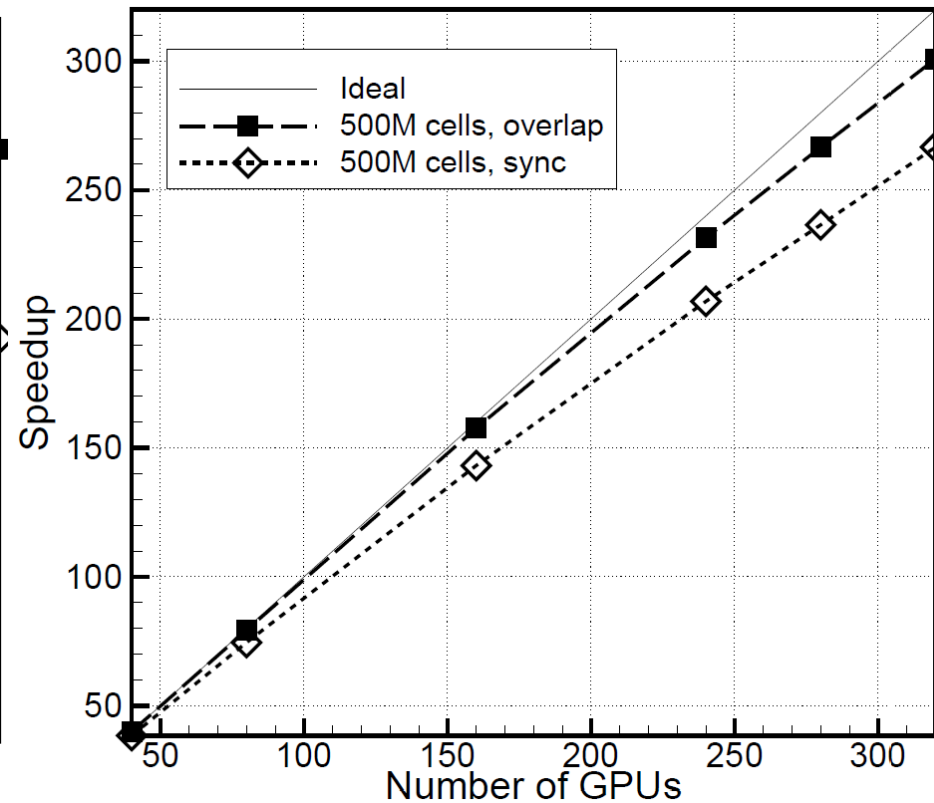


Мульти-GPU на гибридном суперкомпьютере

Lomonosov-2:
14C Xeon E5-2697v3
NVIDIA K40, IB FDR



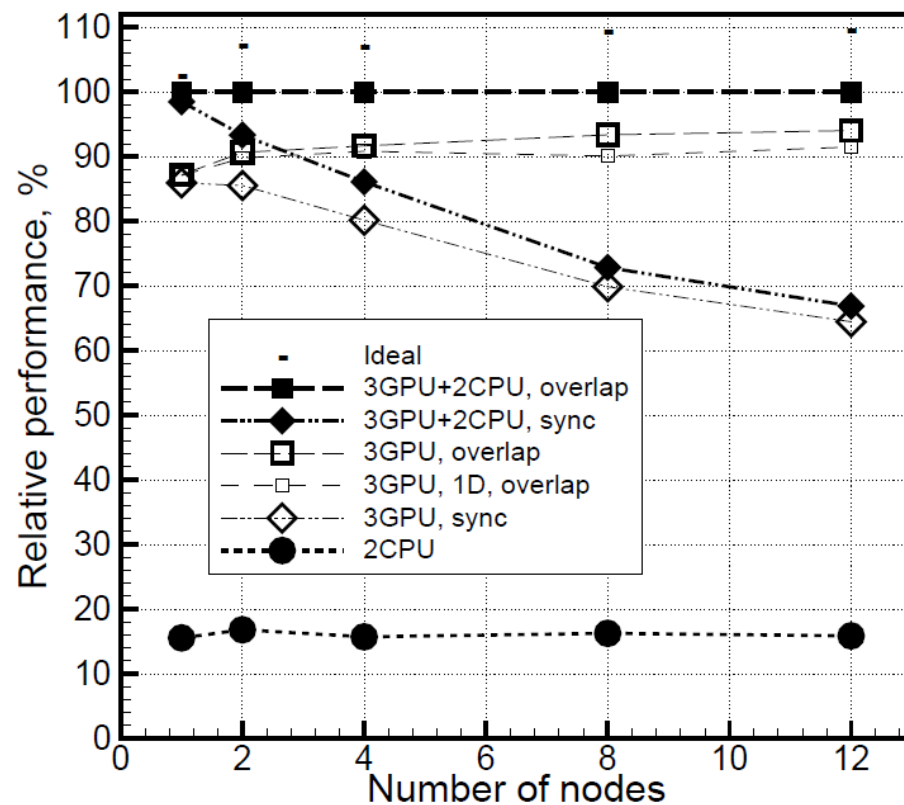
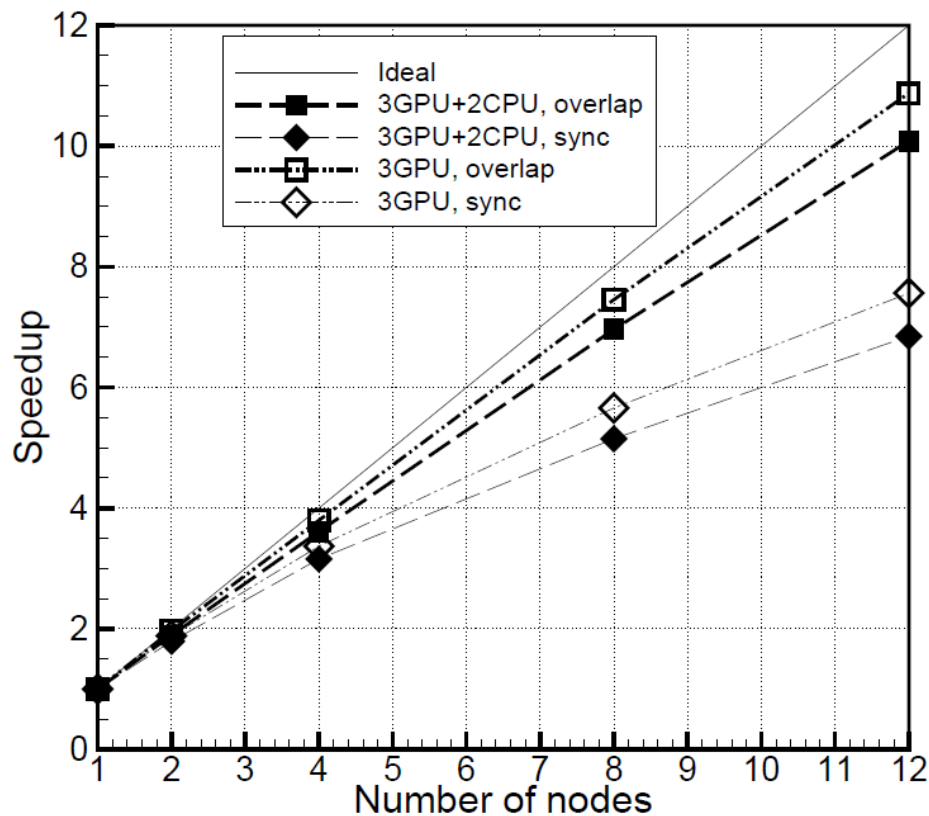
HPC5:
2x 8C Xeon E5-2650v2,
2x NVIDIA K80, IB FDR



Гетерогенный режим CPU+GPU

K-10: 2 x 8C Xeon E5-2690 + 3 x NVIDIA 2090, IB QDR

Mesh 12M cells



- MPI на первом уровне
- OpenMP реализация для многоядерных процессоров и ускорителей
- OpenCL реализация для потоковых ускорителей
- Двухуровневая декомпозиция с балансировкой загрузки по фактической производительности
- Overlap режим – сокрытие обменов за вычислениями

- **Прямое численное моделирование DNS**
СТОИМОСТЬ ##### ТОЧНОСТЬ #####
1-100M CPUh
1E20 FLOP
- **Моделирование крупных вихрей LES**
СТОИМОСТЬ ##### ТОЧНОСТЬ #####
100K-10M CPUh
- **RANS – осредненные уравнения Н-С**
СТОИМОСТЬ # ТОЧНОСТЬ ###
100 – 10K CPUh
- **RANS-LES гибридные подходы (DES)**
СТОИМОСТЬ ### ТОЧНОСТЬ #####

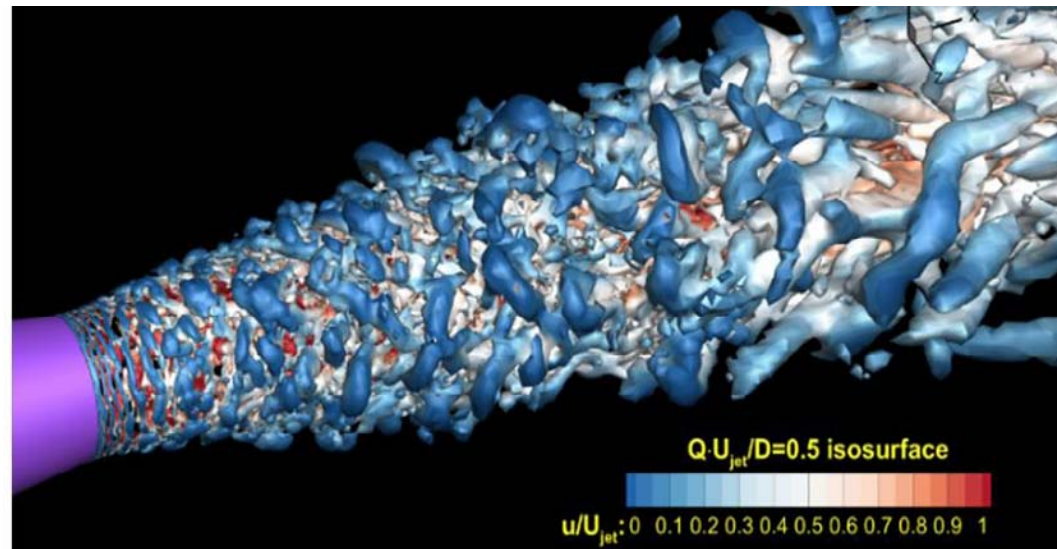
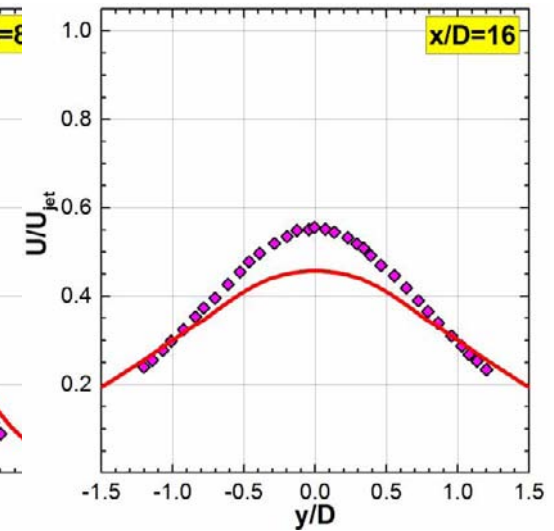
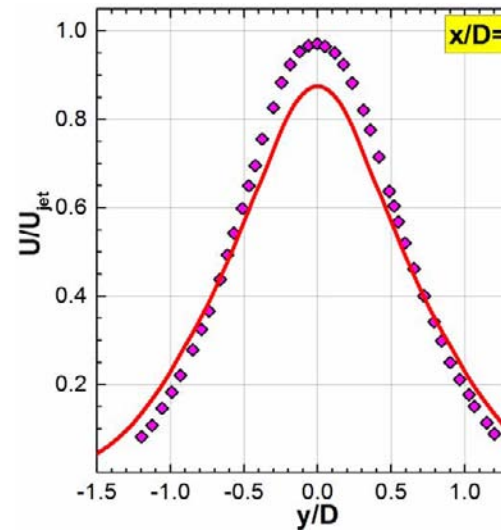
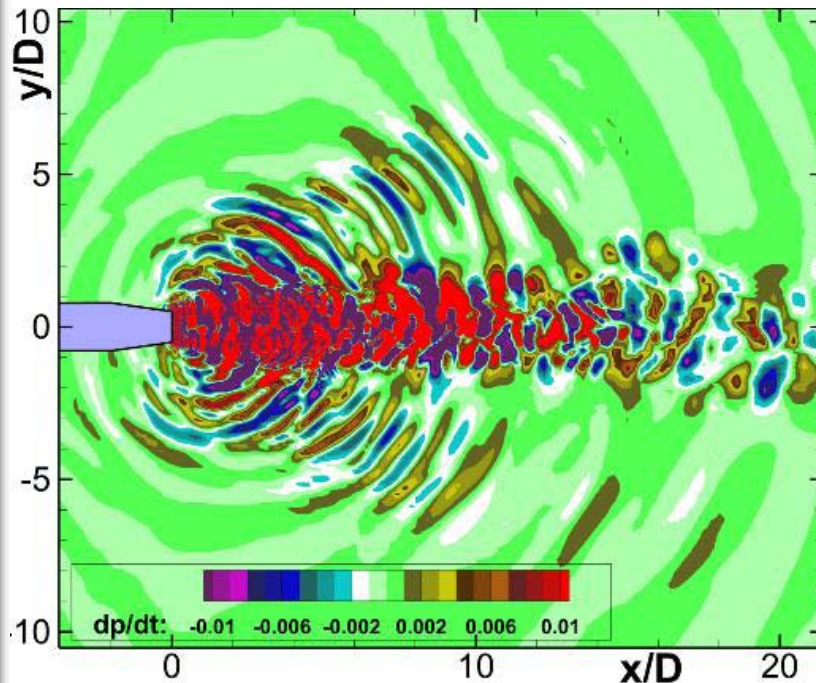
- Анизотропные сетки, сеточная адаптация
- Неявные схемы интегрирования по времени
- Периодические граничные условия
- Экономичные схемы повышенной точности
- “Протяжка” начального поля течения, интерполяция с грубой сетки
- . . .

Влияние пространственного разрешения

Сетка 1.5 млн узлов

Параметры течения:

$Re=1.1 \cdot 10^6$, $M=0.9$

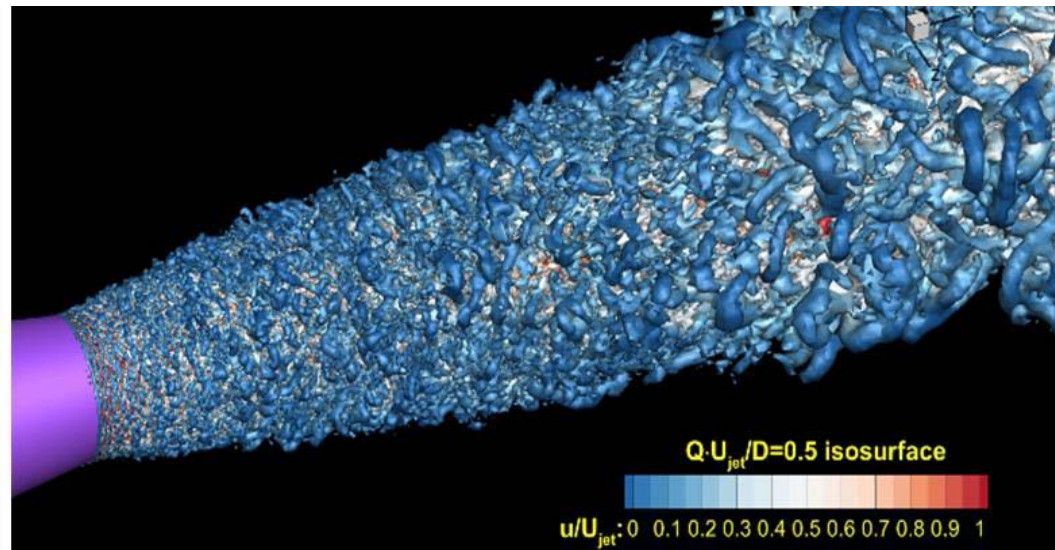
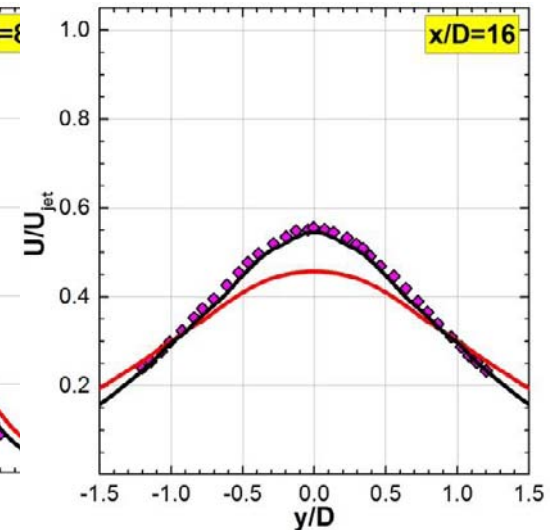
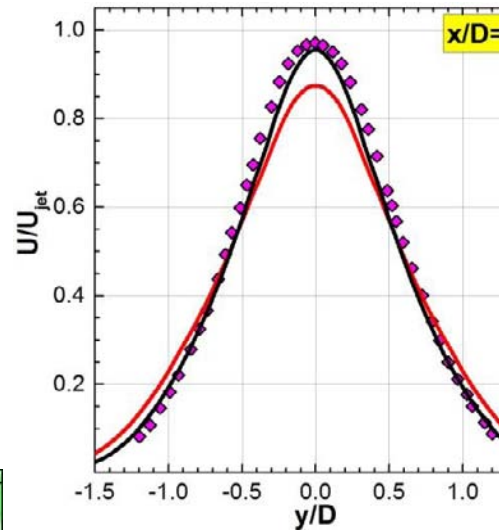
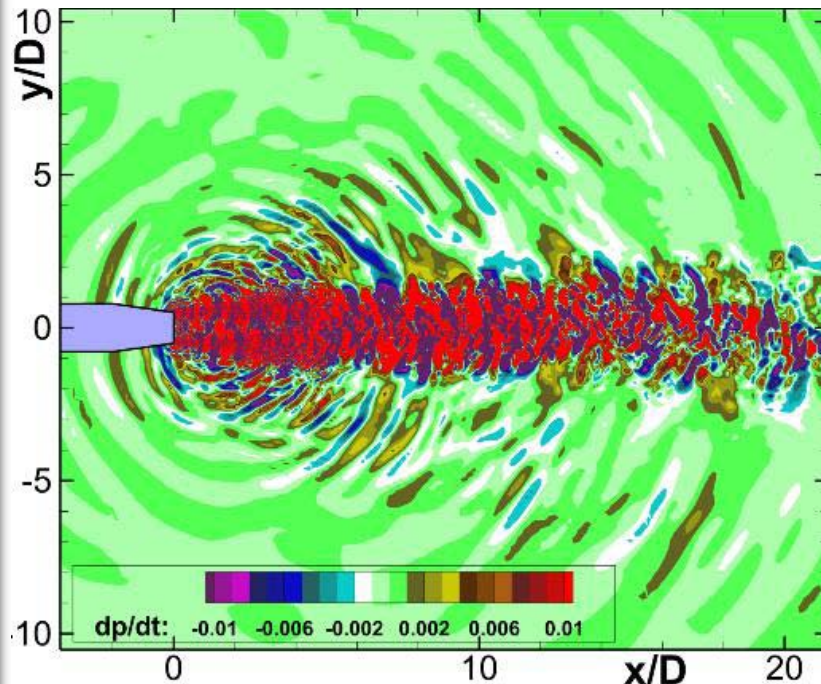


Влияние пространственного разрешения

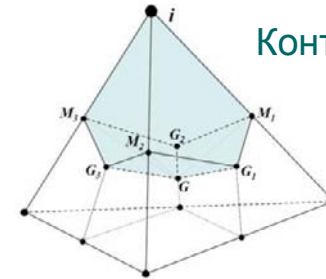
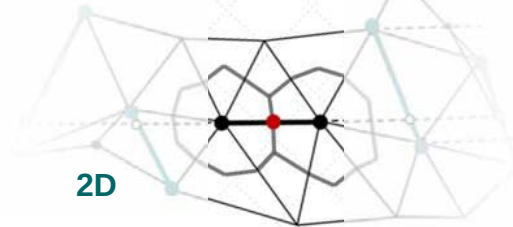
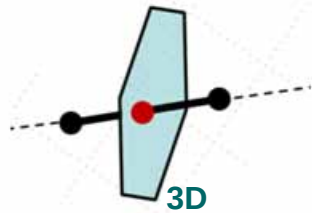
Сетка 8.8 млн узлов

Параметры течения:

$Re=1.1 \cdot 10^6$, $M=0.9$



Базовая схема расчета потока через грань ячейки



Контрольный объем

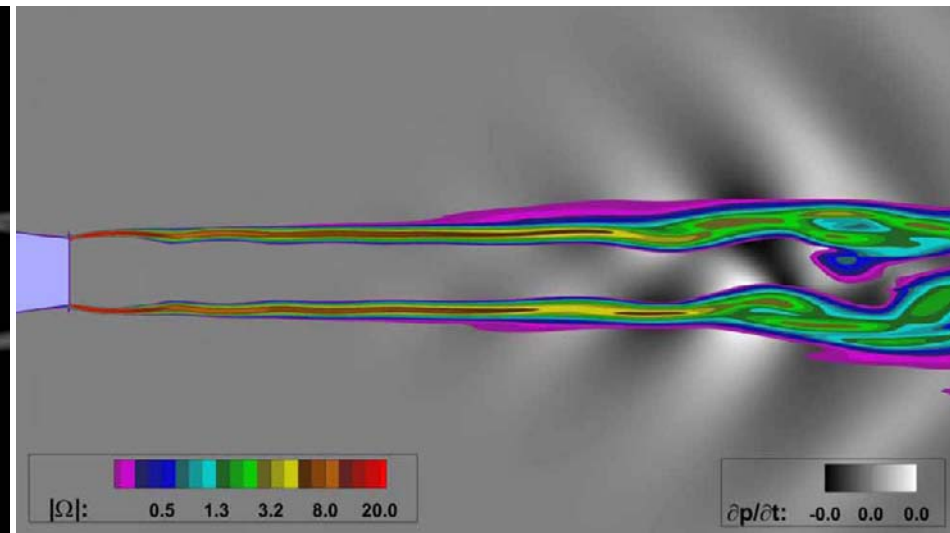
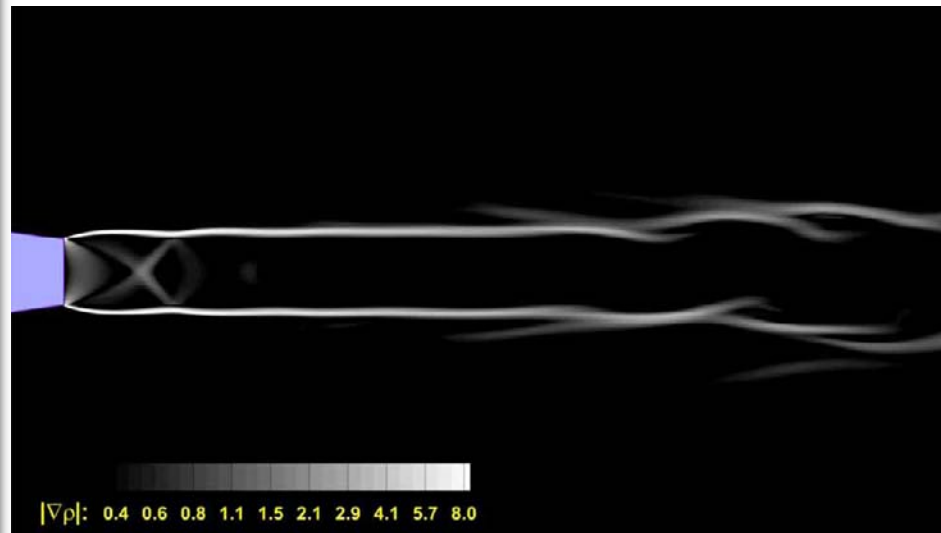
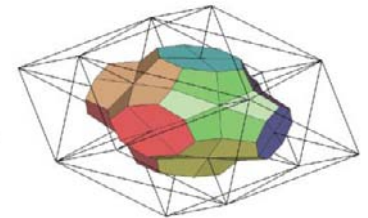
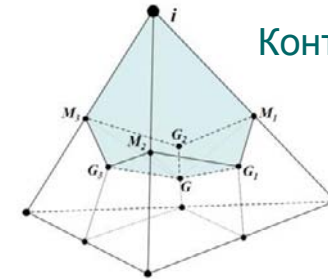
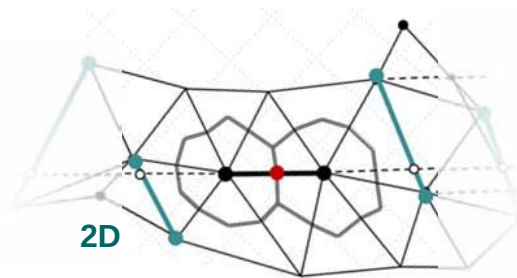
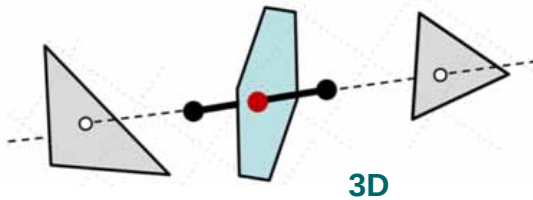


Схема EBR3-WENO



Контрольный объем

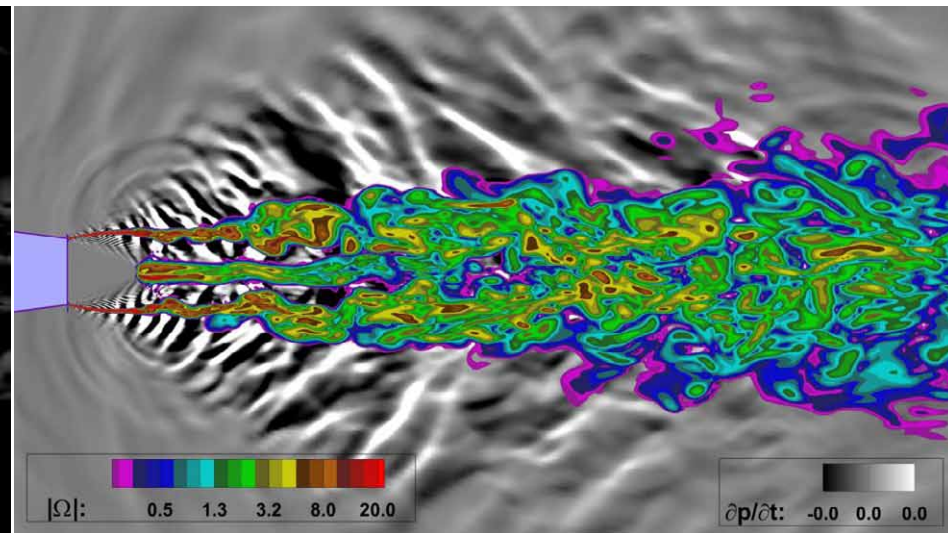
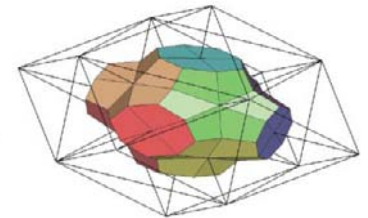
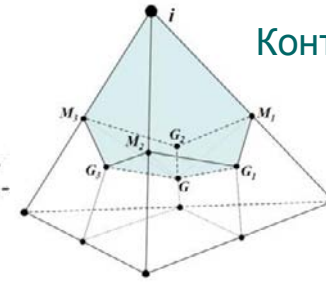
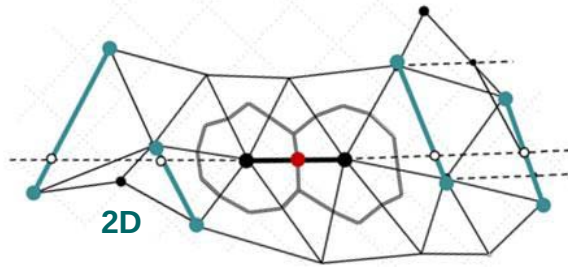
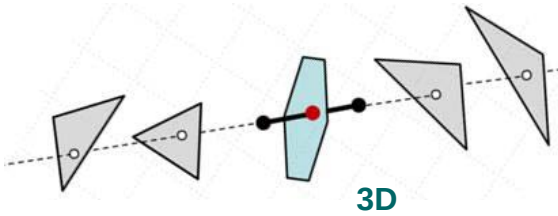
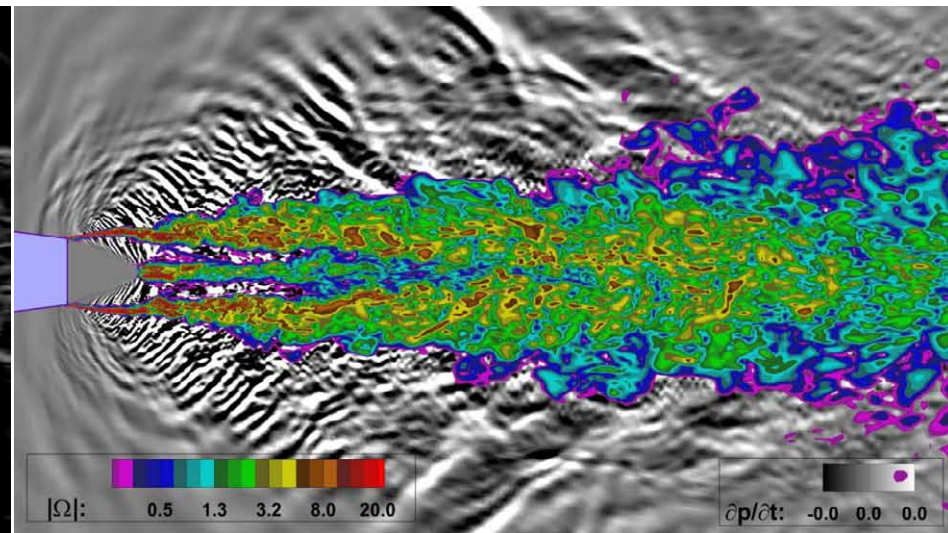
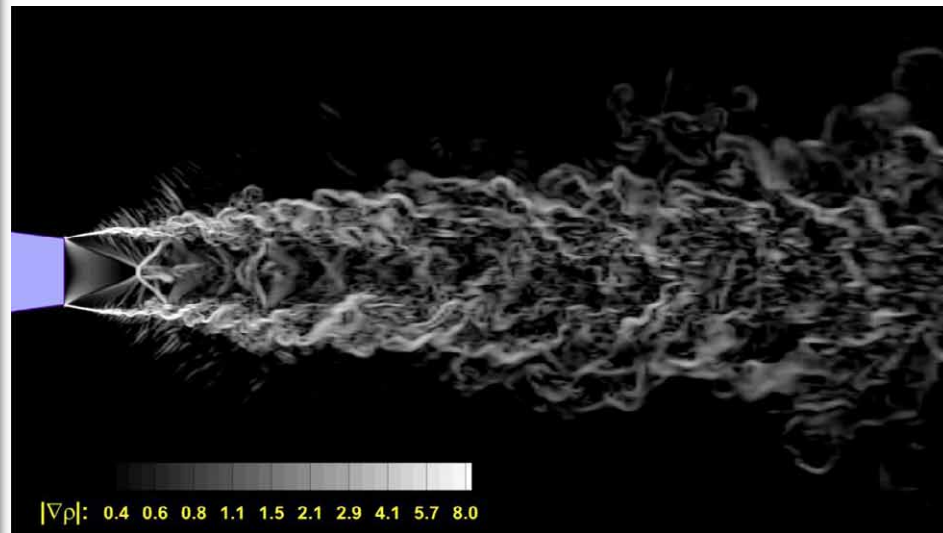
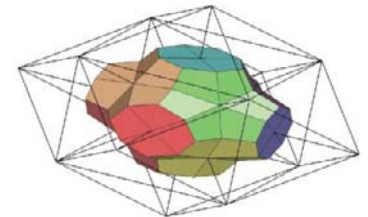


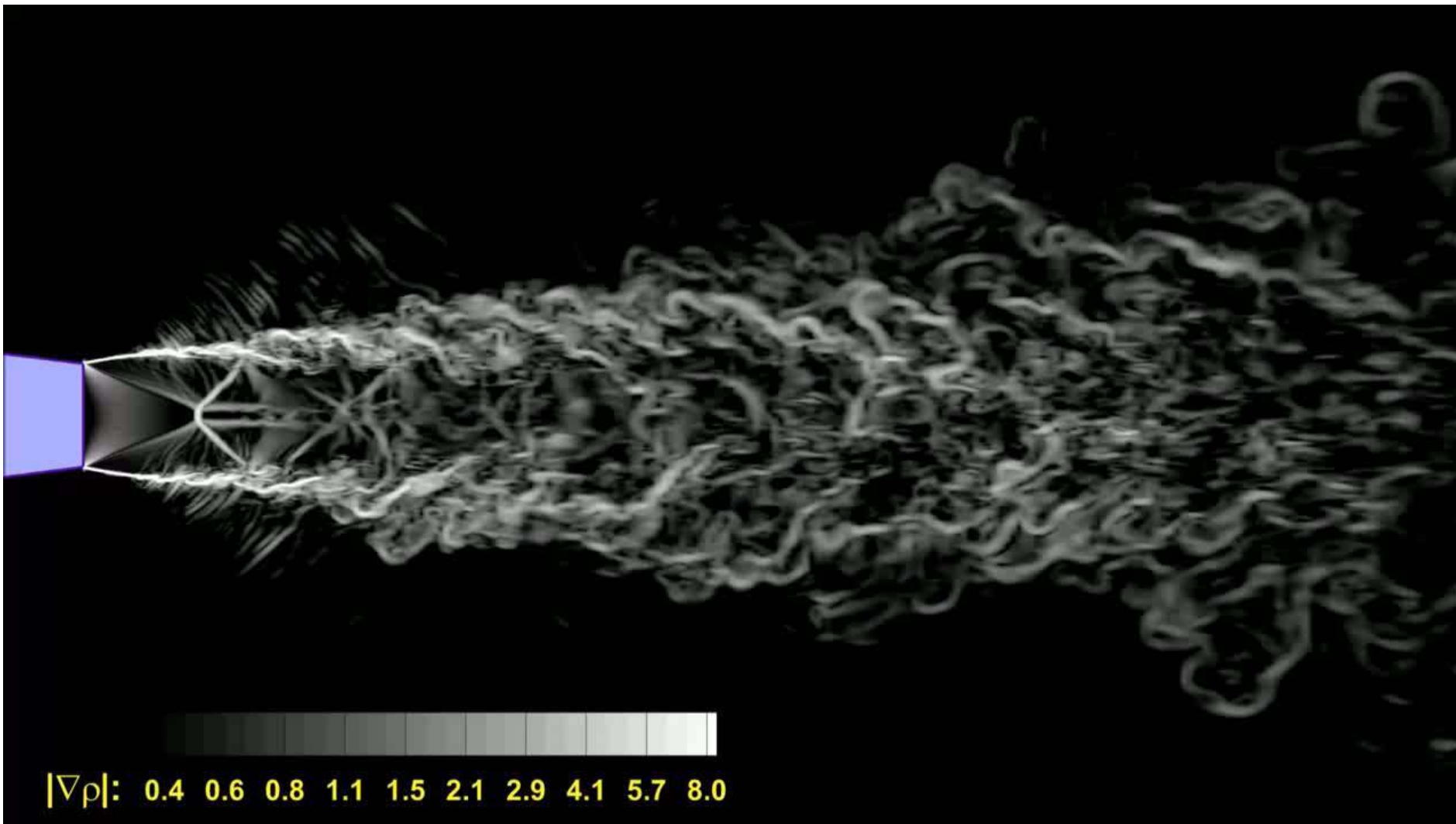
Схема EBR5-HYB

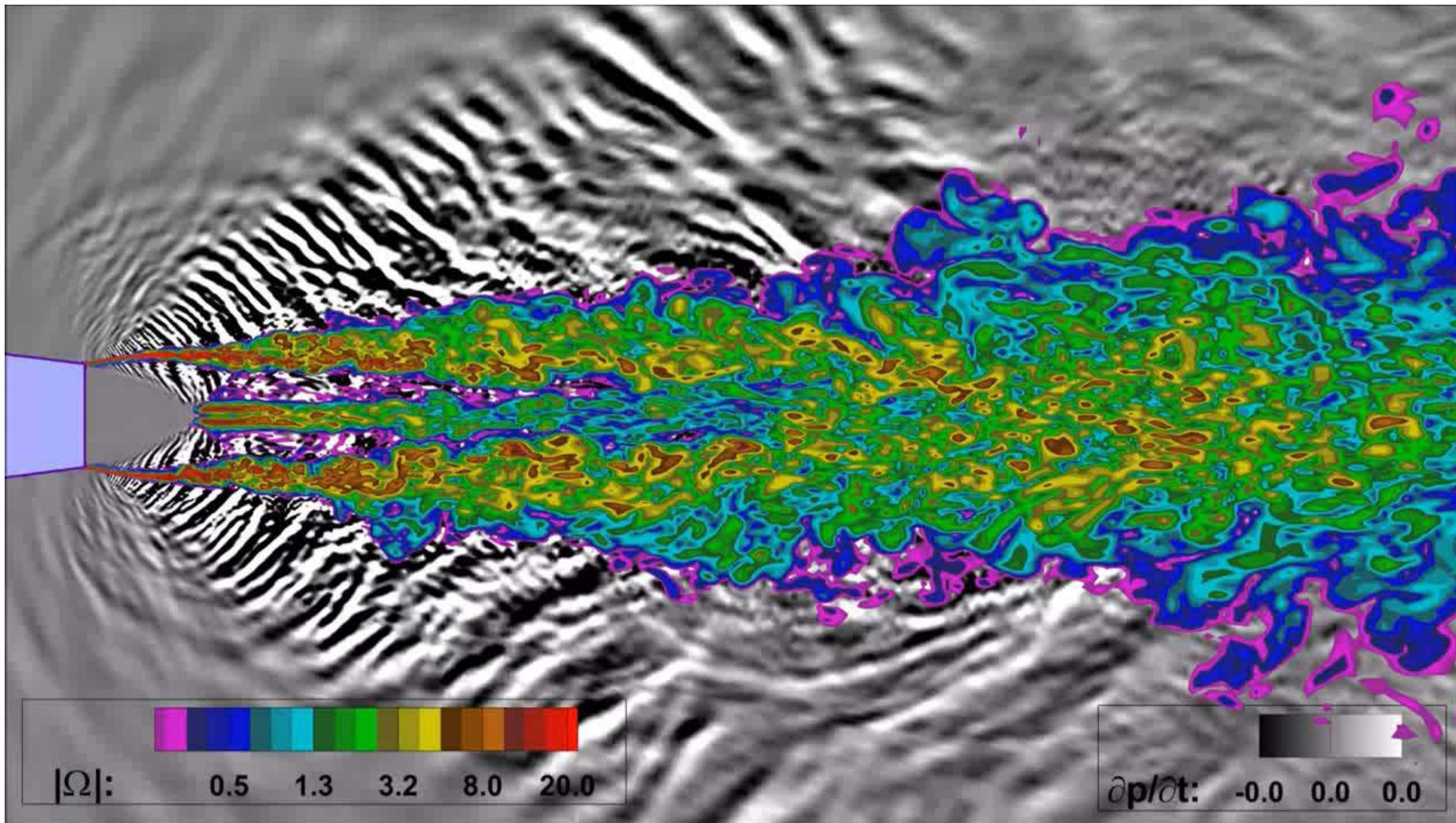


Контрольный объем

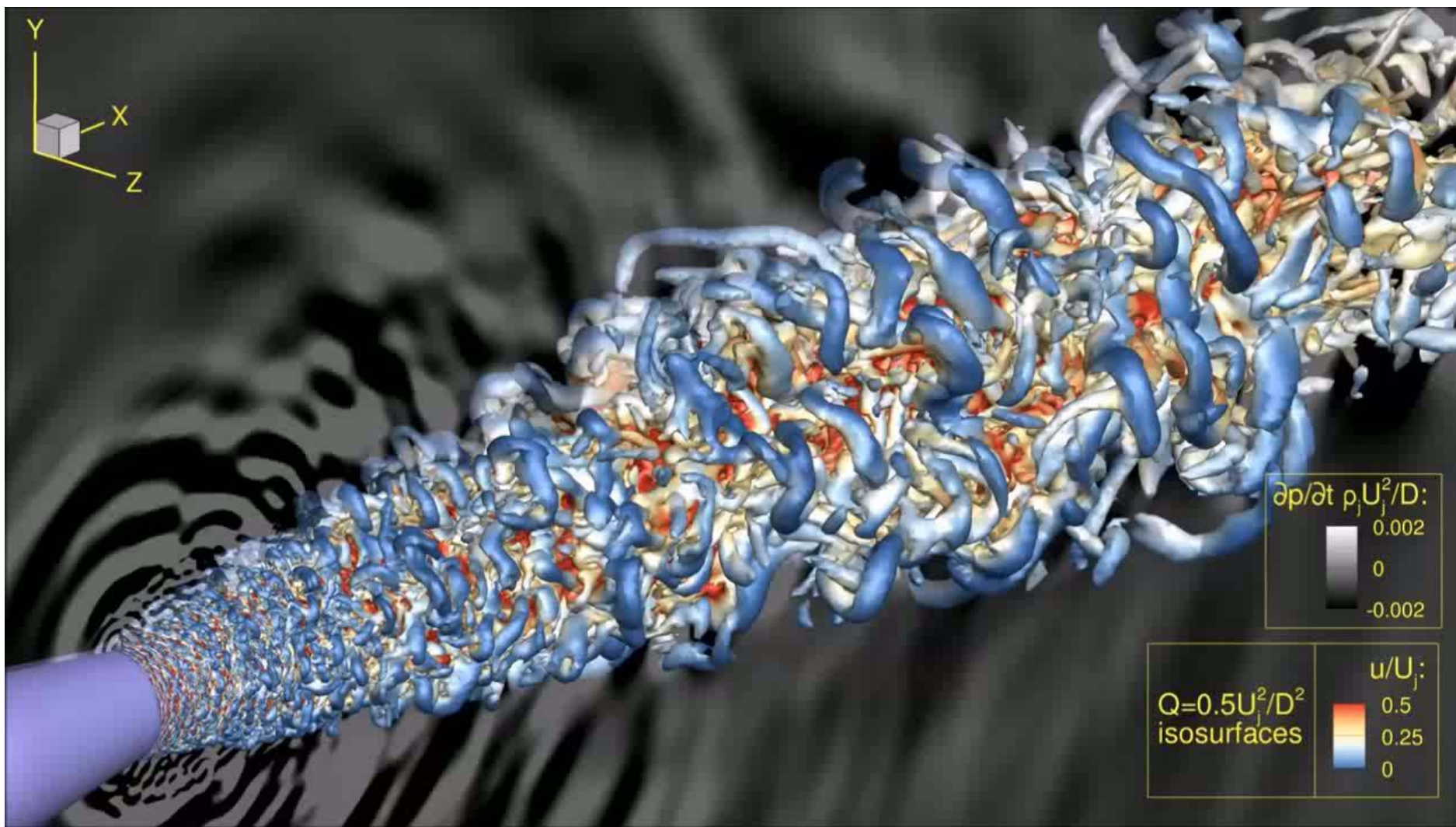


Сверхзвуковая струя

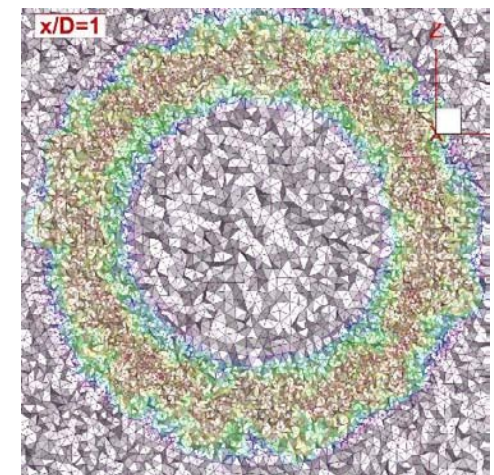
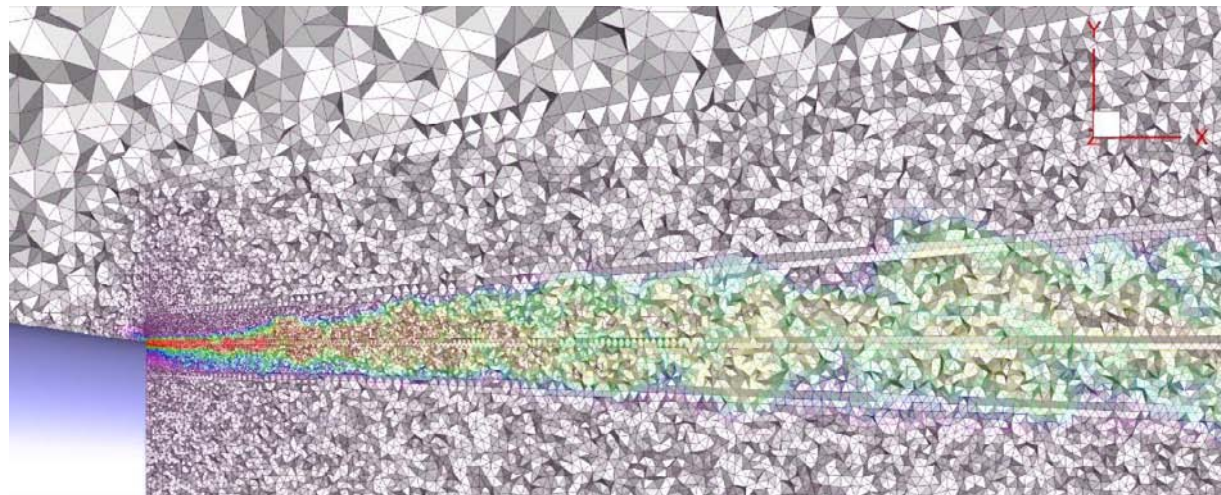
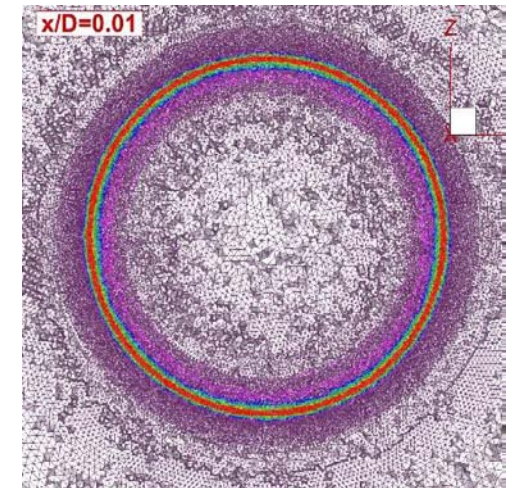
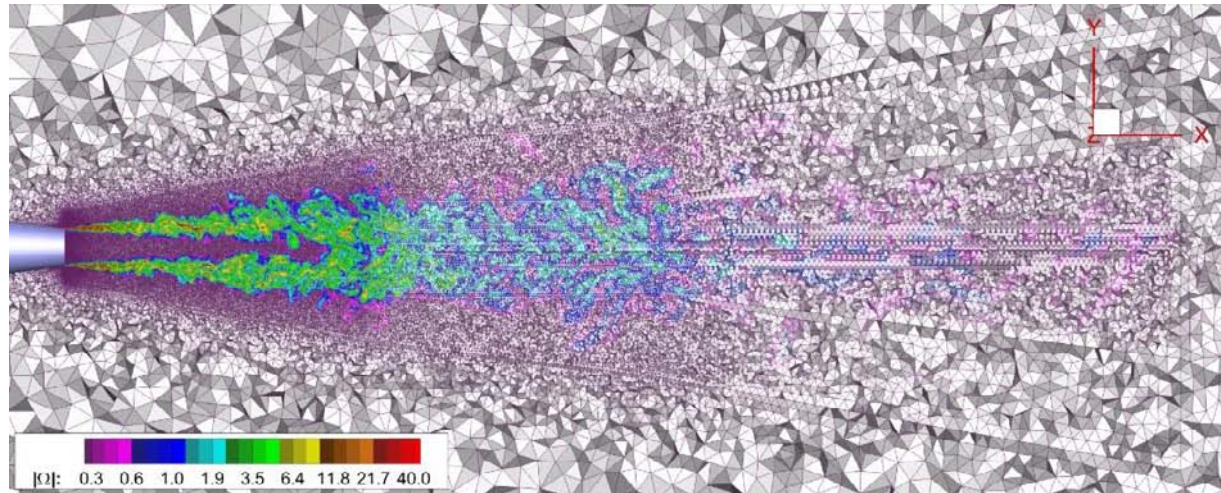




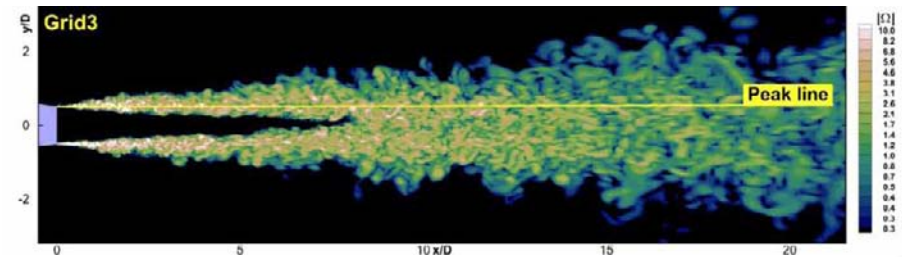
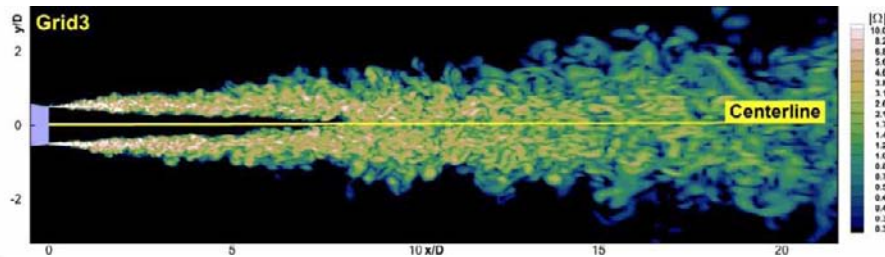
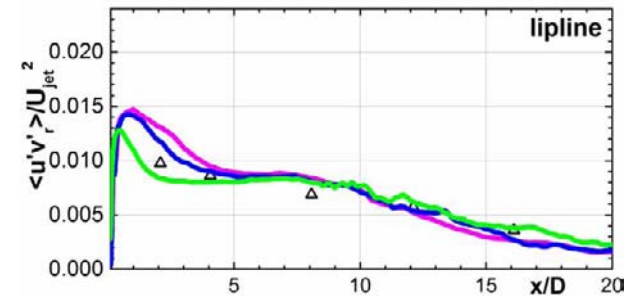
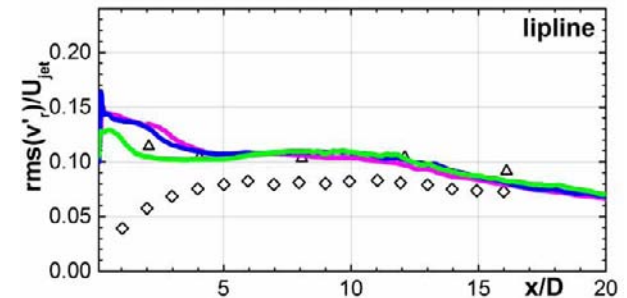
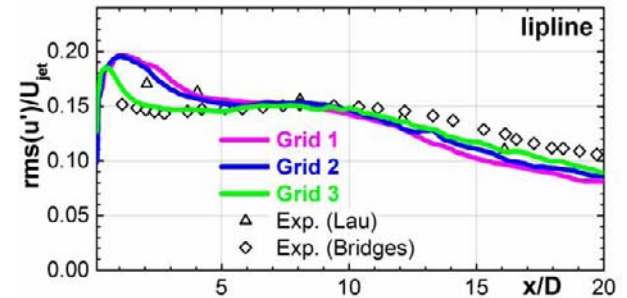
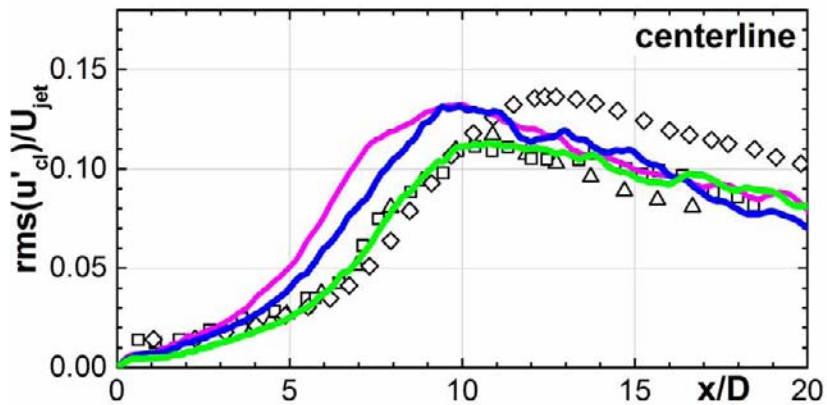
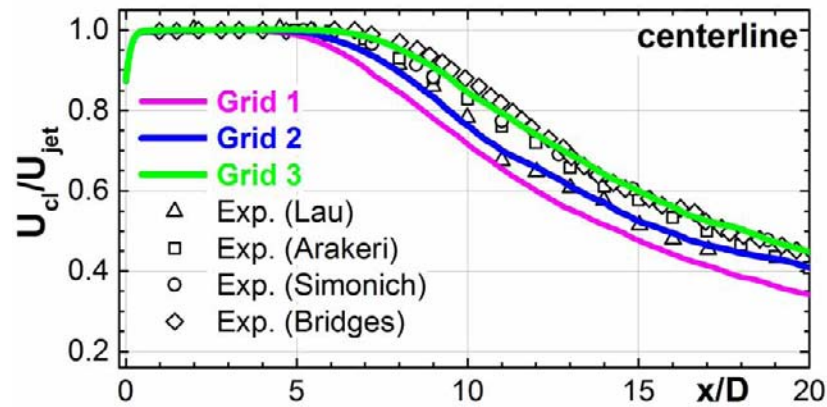
Дозвуковая струя



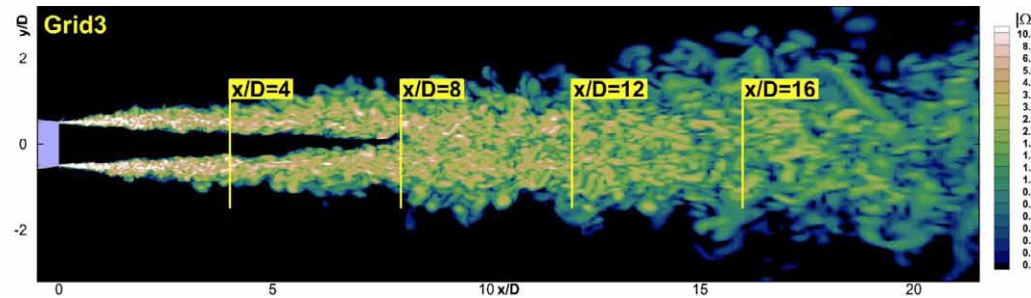
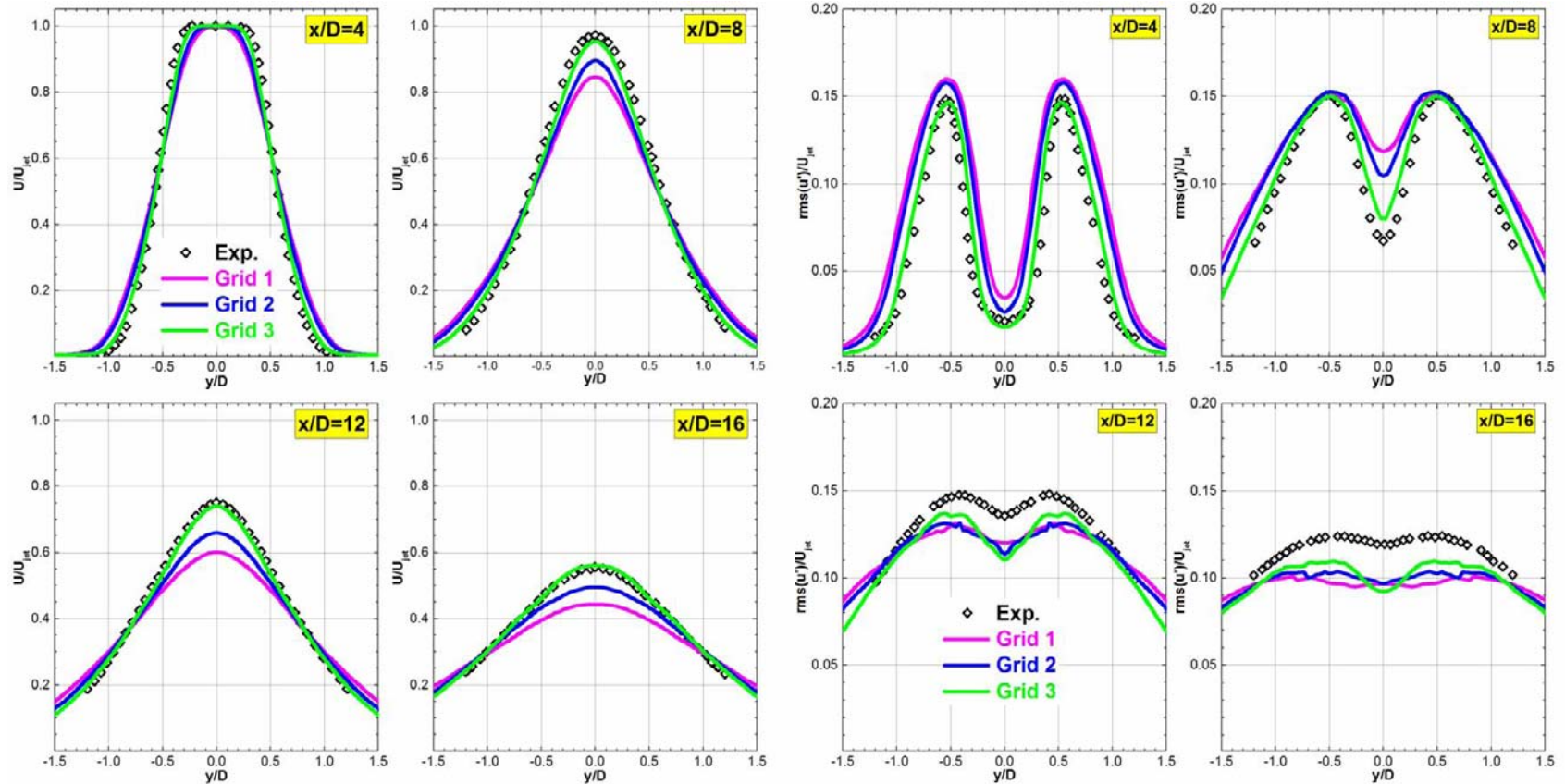
Изотропная тетраэдральная сетка 6.1М узлов, 36.8М тетраэдров



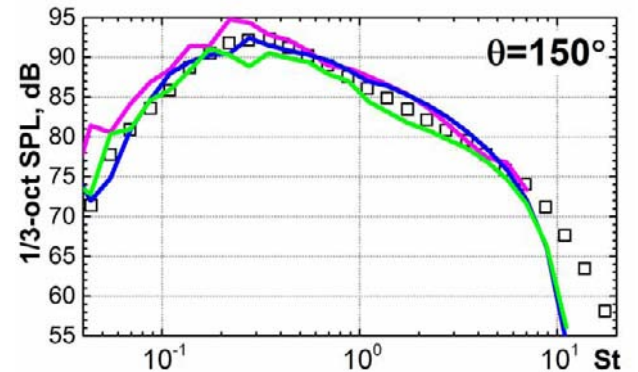
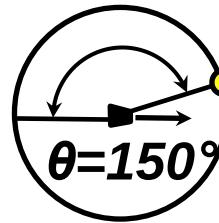
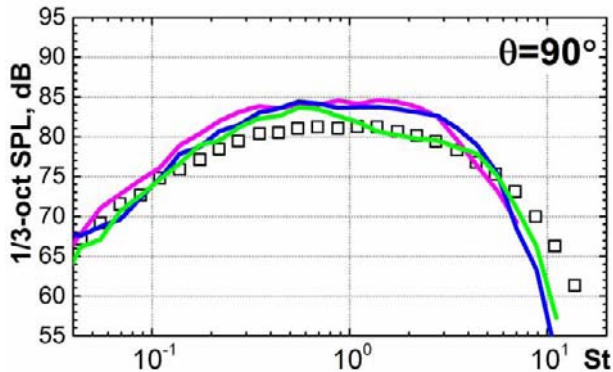
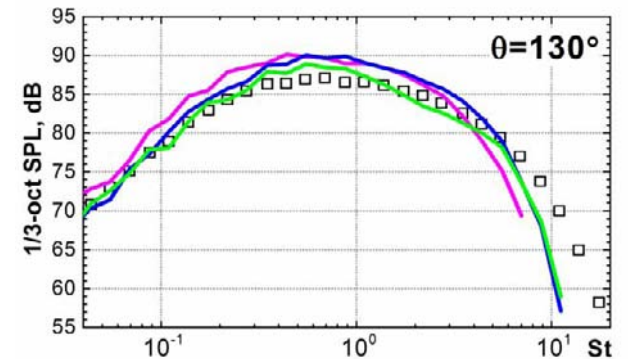
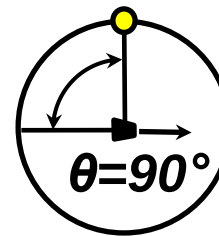
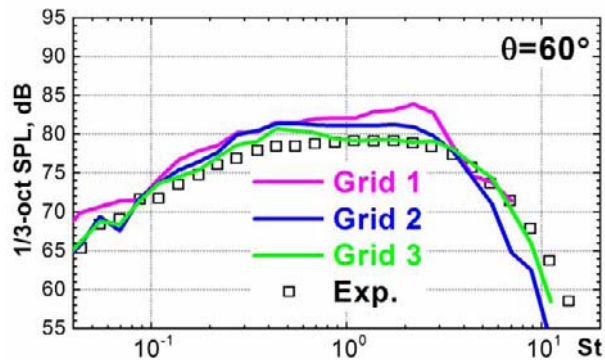
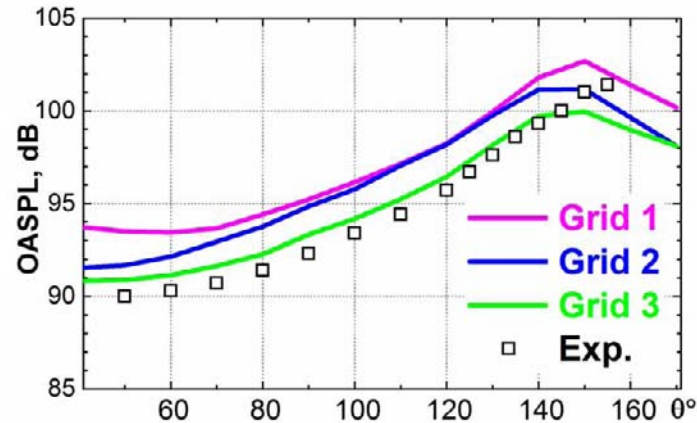
Дозвуковая струя: продольные профили



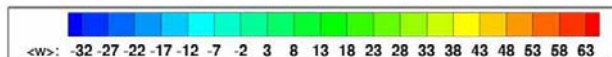
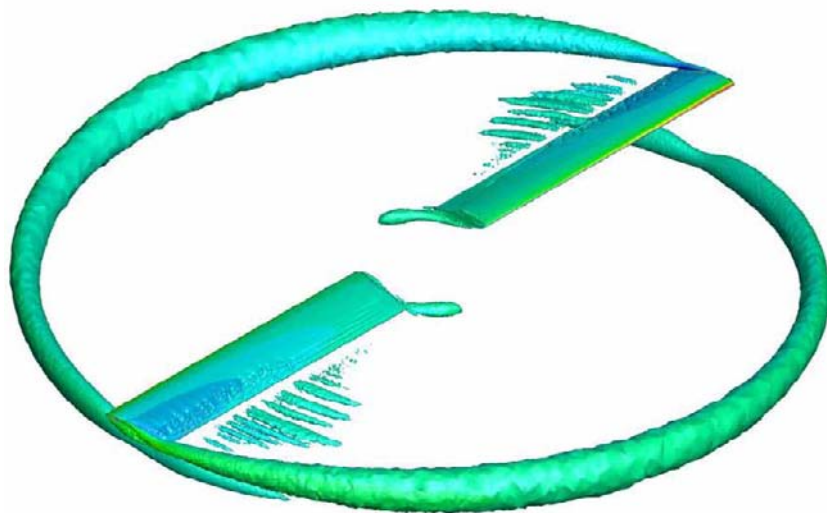
Дозвуковая струя: поперечные профили



Дозвуковая струя: шум в дальнем поле



Модельный несущий винт: Caradonna-Tang



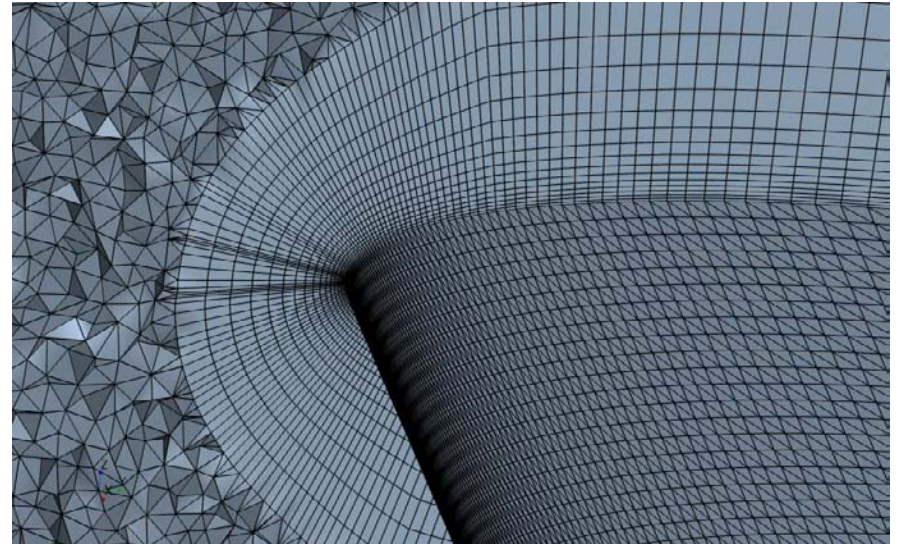
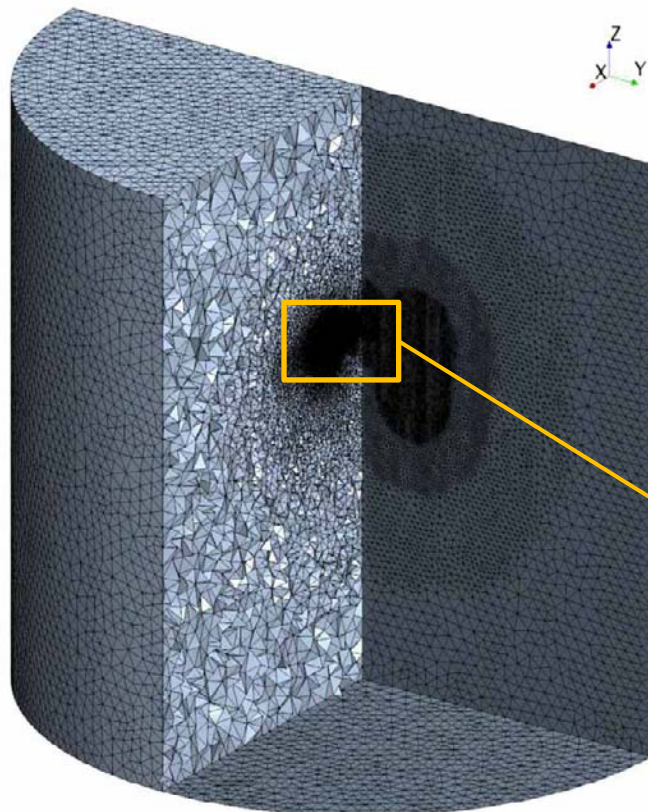
Число лопастей N	2
Радиус винта R	1.143 м
Хорда лопасти b	0.1905 м
Профиль лопасти	NACA 0012
Угол установки лопасти	8°
Частота вращения винта	650 об/мин
Линейная скорость конца лопасти $V_{\text{лоп}}$	77.8 м/с

$$\rho_0 = 1.2041 \text{ кг/м}^3, \mu_0 = 1.827 \times 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$$

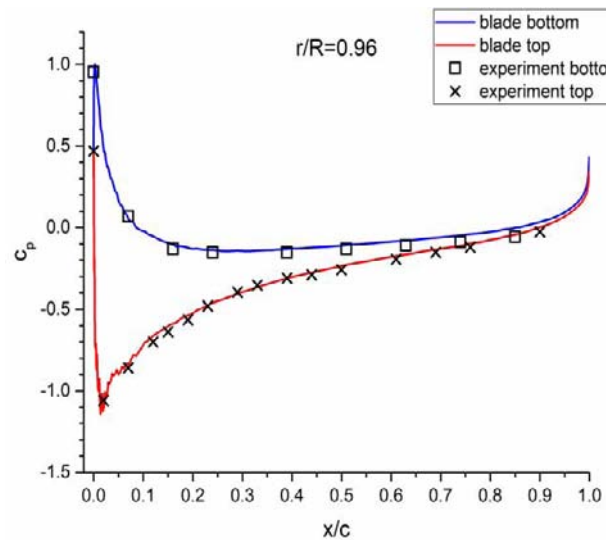
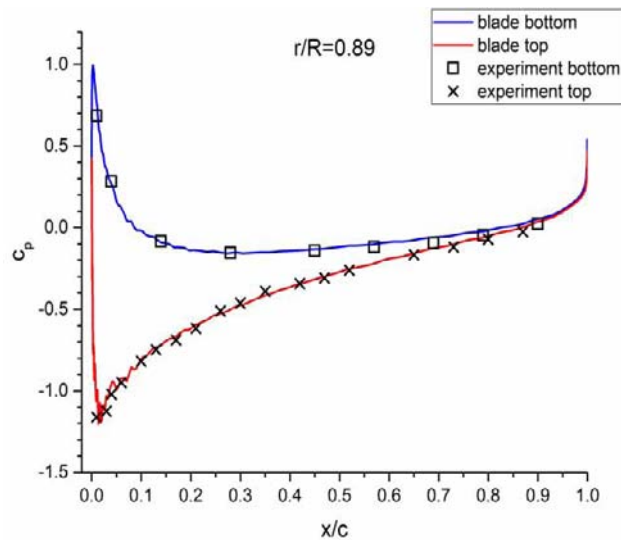
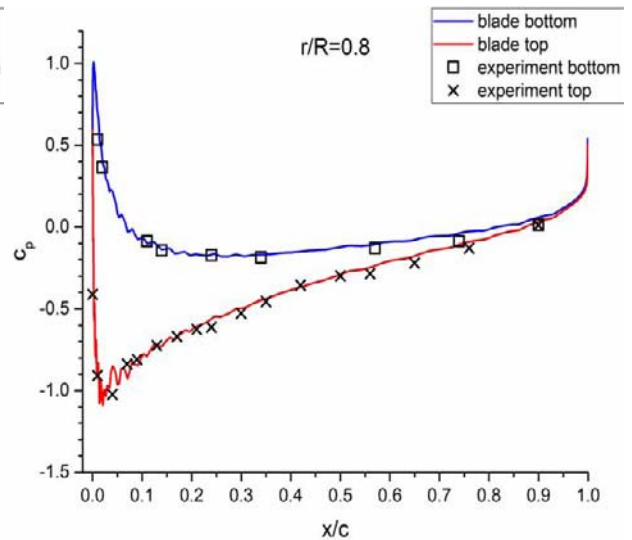
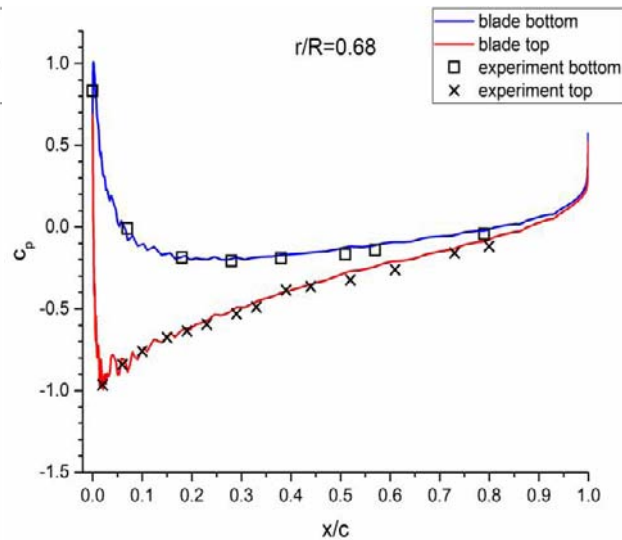
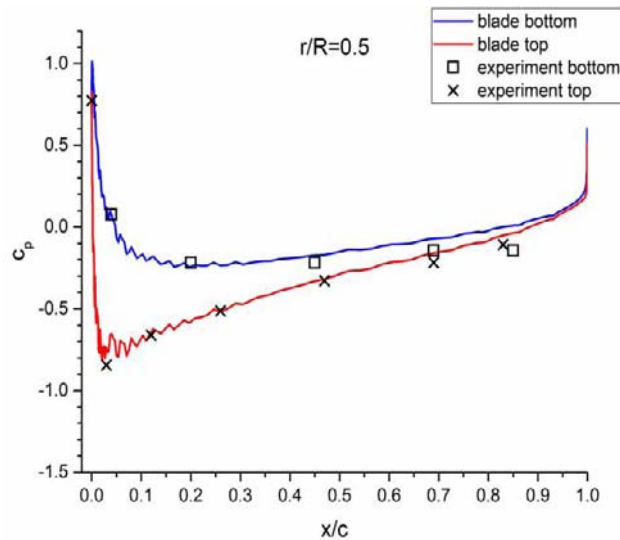
$$\text{Re} = \frac{\rho_0 V_{\text{лоп}} b}{\mu_0} = 6.28 \times 10^5$$

Расчетная сетка

Сетка: 7 039 966 узлов, 37 526 305 элементов
гибридная (треугольные призмы + тетраэдры)



Распределение давления на поверхности



Постановка задачи



Экспериментальный стенд (ОАО «Камов»)

Число лопастей N	4
Радиус винта R	1.952 м
Хорда лопасти b	0.18 м
Профили лопасти	5 несимметричных профилей + законцовка
Крутка	лопасть ($\bar{r} = 0.3 \dots 0.94$) – линейная законцовка ($\bar{r} = 0.94 \dots 1.0$) – линейная
Угол установки лопасти	8°
Частота вращения винта	584.5 об/мин
Линейная скорость конца лопасти $V_{\text{лоп}}$	119.5 м/с

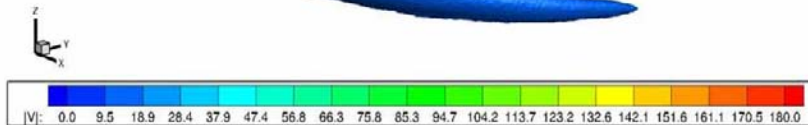
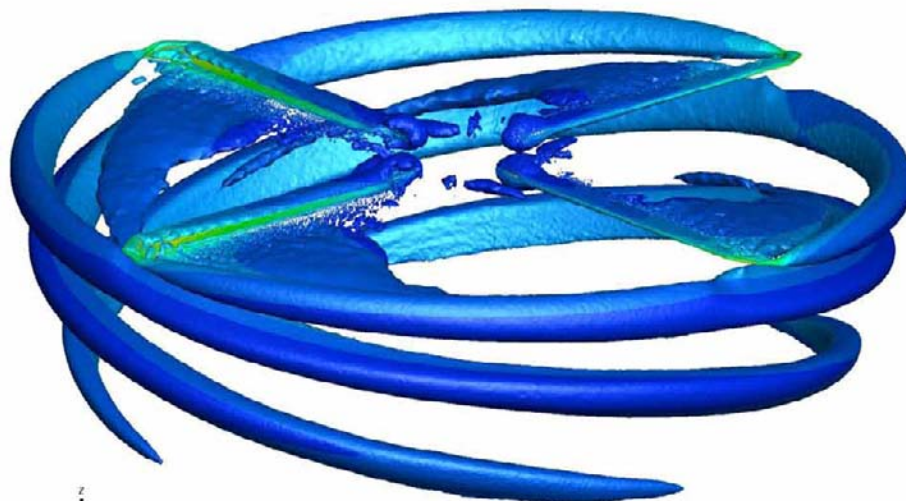
$$\rho_0 = 1.193 \text{ кг/м}^3, \mu_0 = 1.822027 \times 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_0 V_{\text{лоп}} b}{\mu_0} \approx 1.4 \times 10^6$$

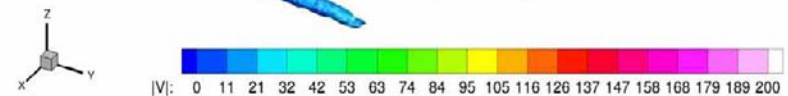
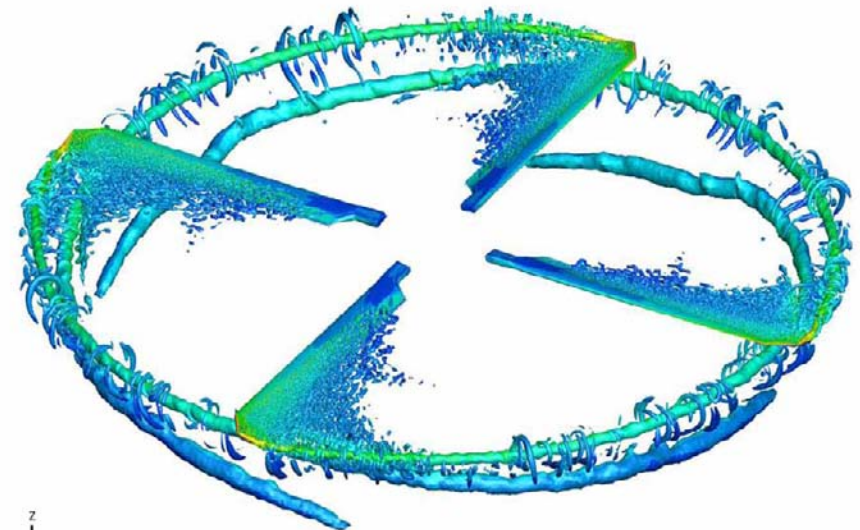
Сетка (сектор с одной лопастью):
гибридная (треугольные призмы + тетраэдры)
19 114 831 узлов, 98 998 161 элементов



Концевой вихрь (изоповерхность Q-критерия)

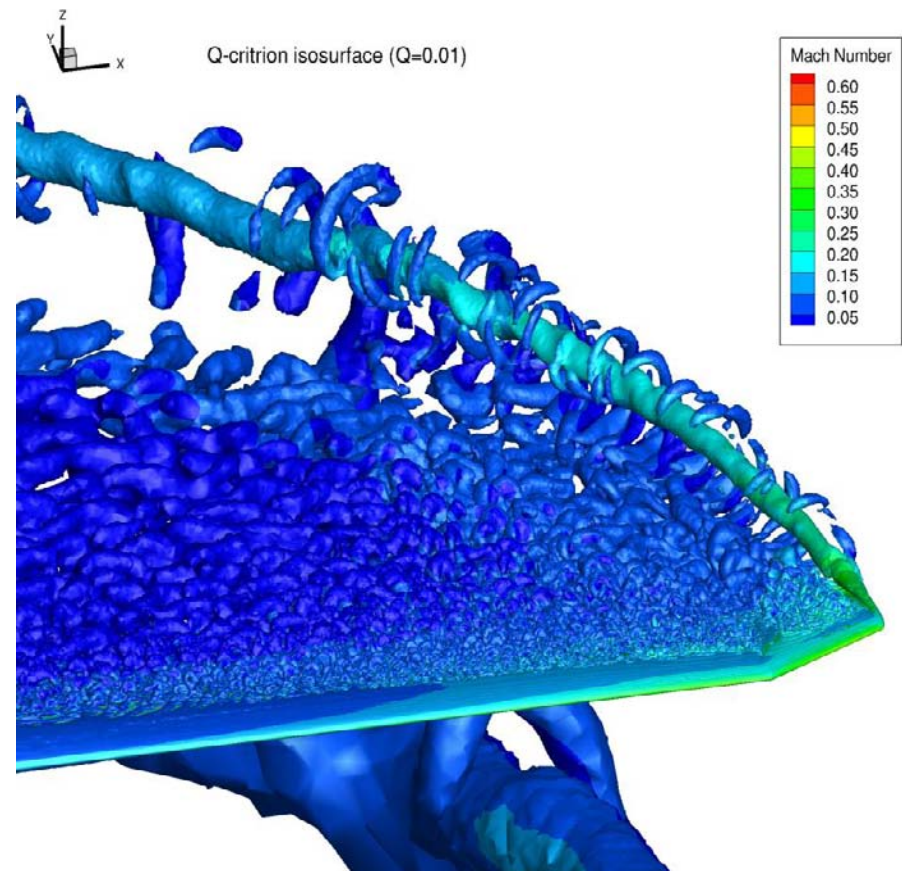
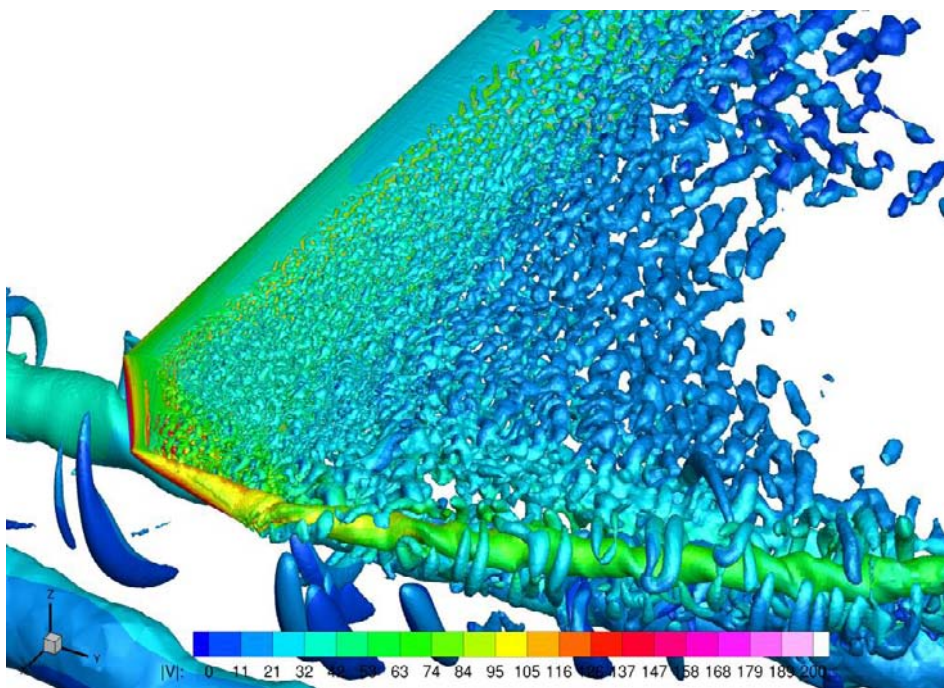


NOISEtte RANS

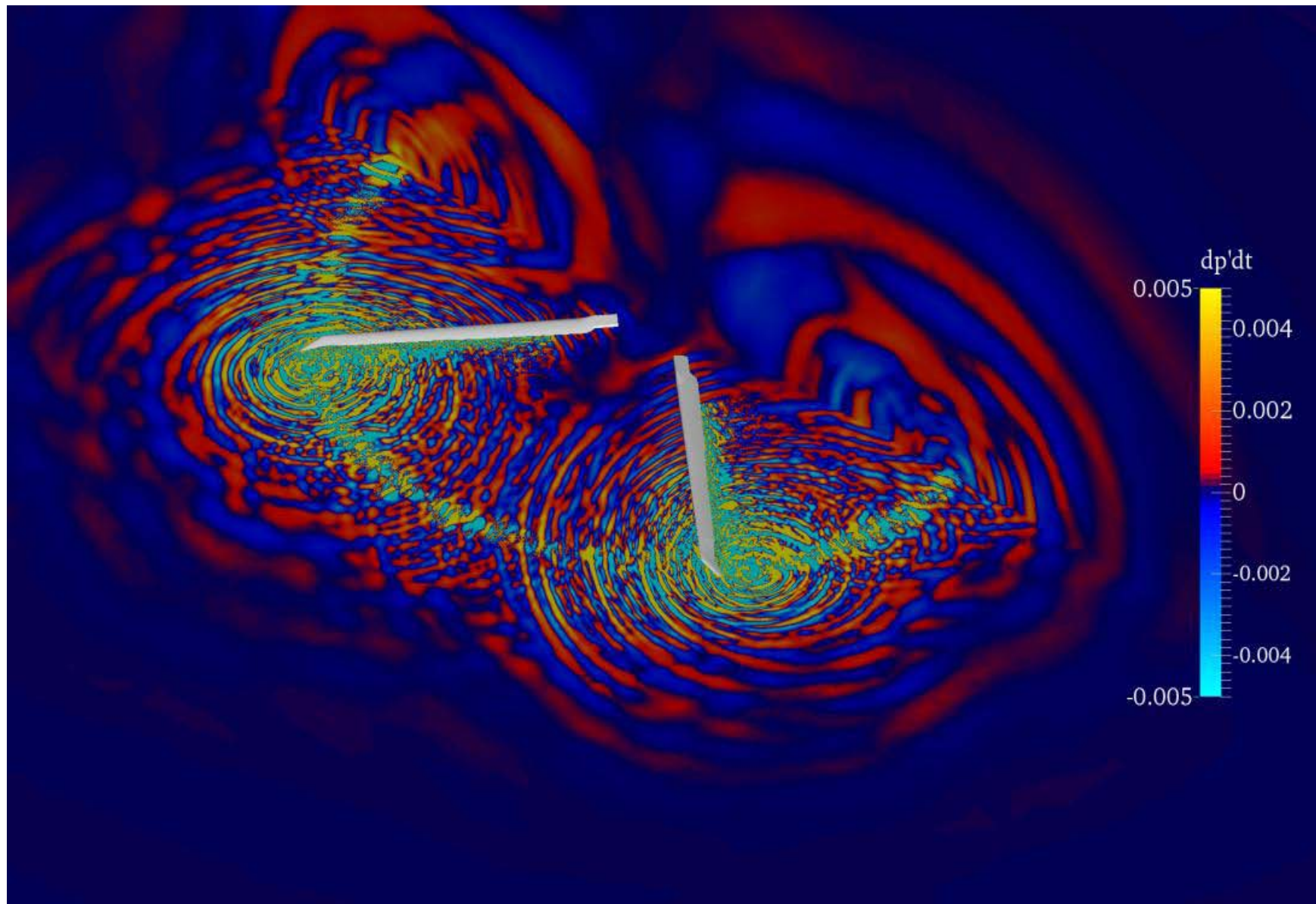


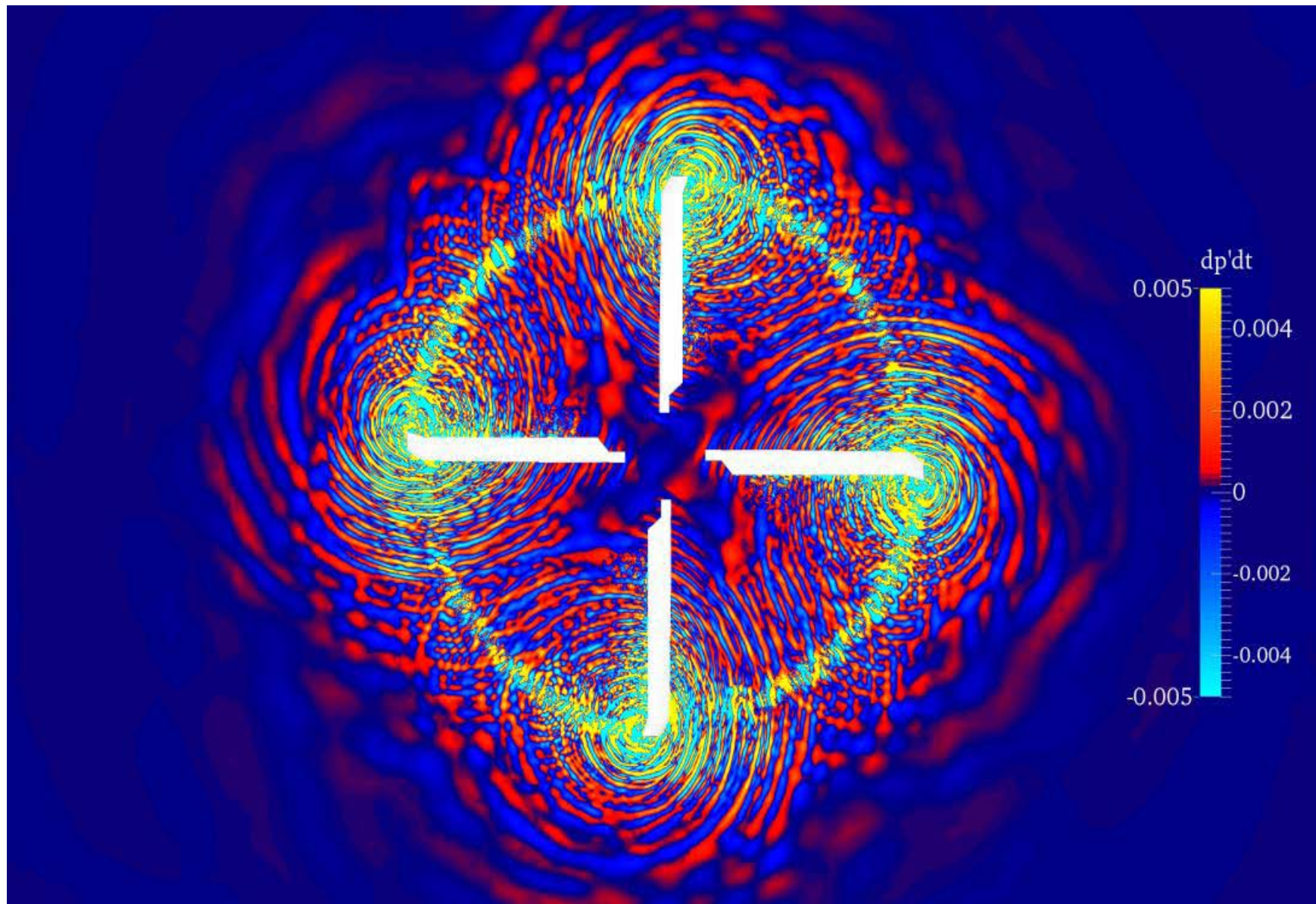
NOISEtte DES SA

Концевой вихрь (изоповерхность Q-критерия)



Мгновенное поле производной по времени пульсаций давления





Интегральные аэродинамические характеристики

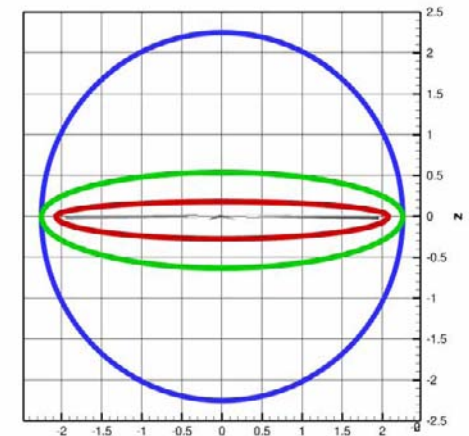
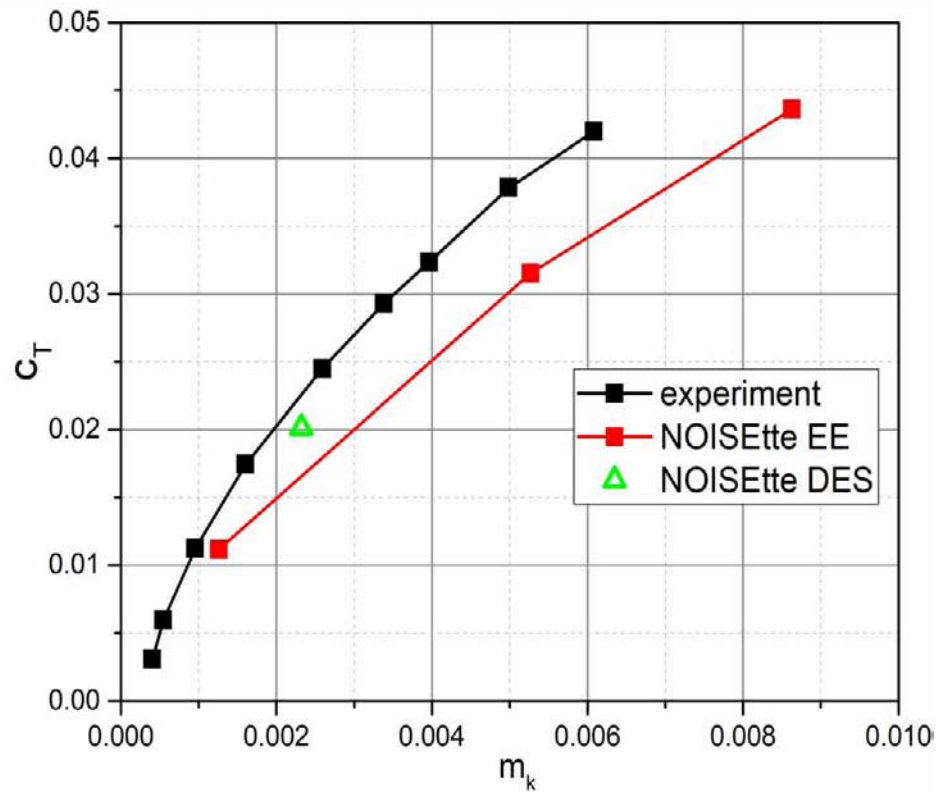
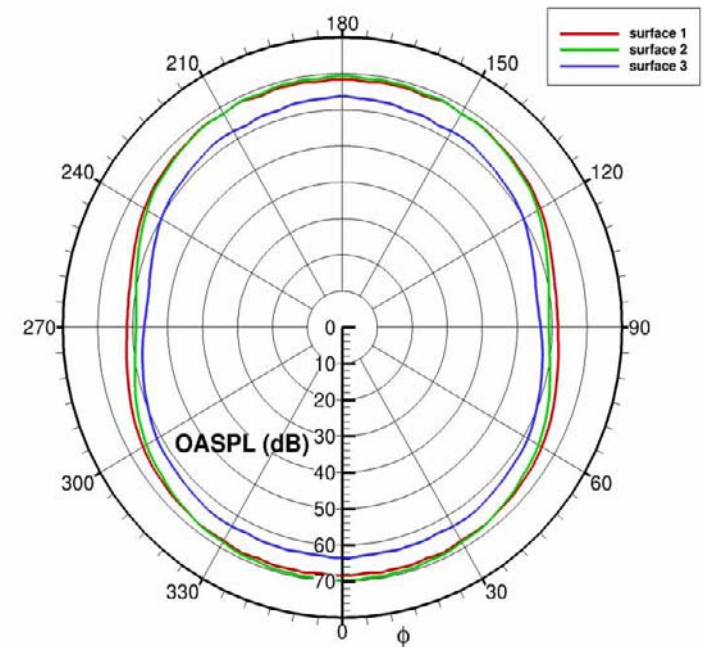
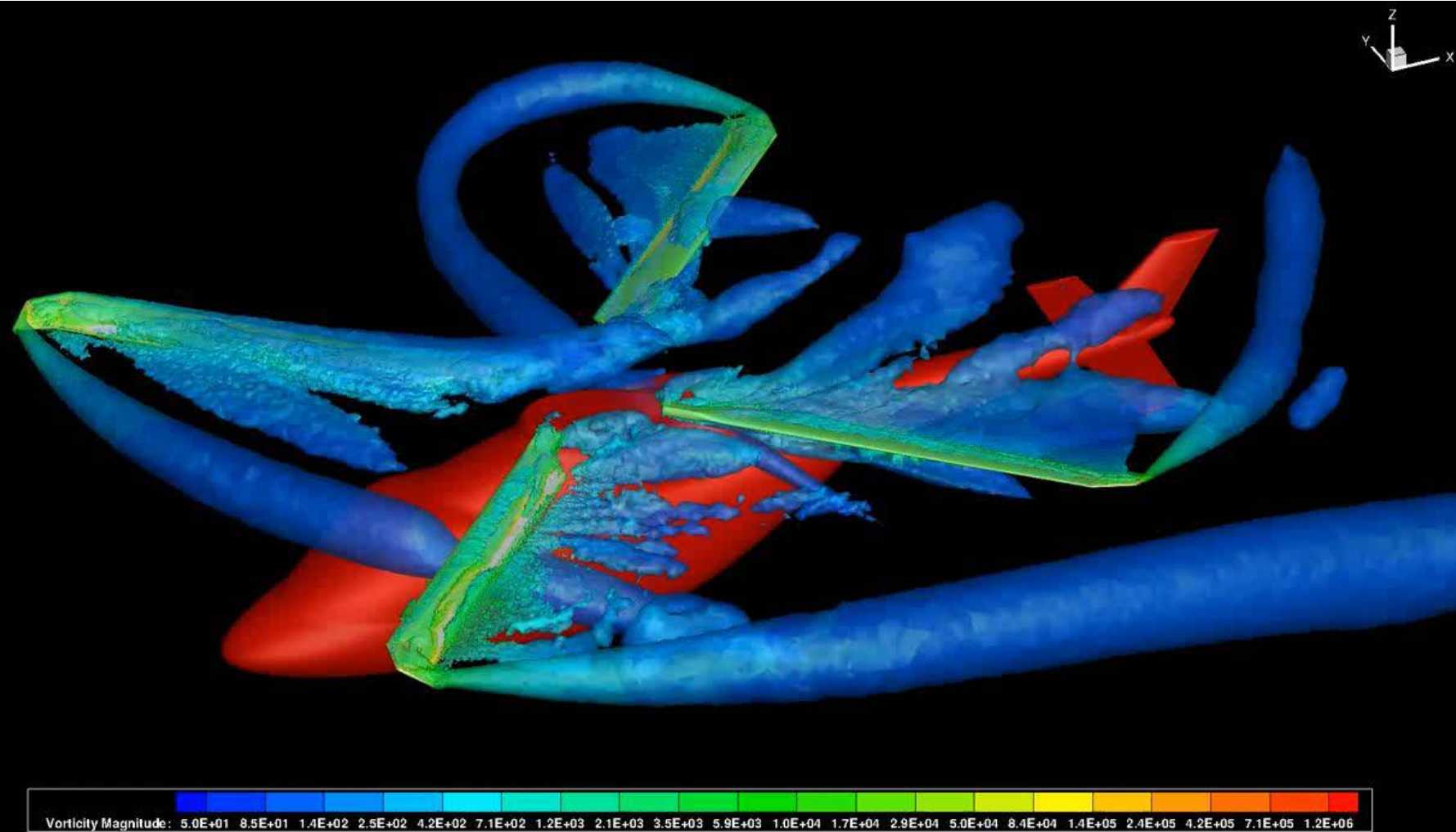
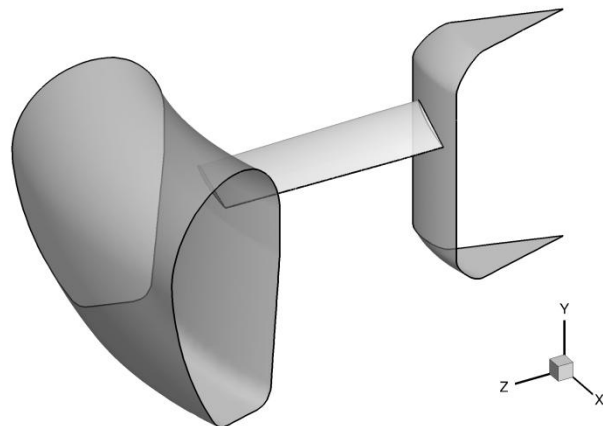
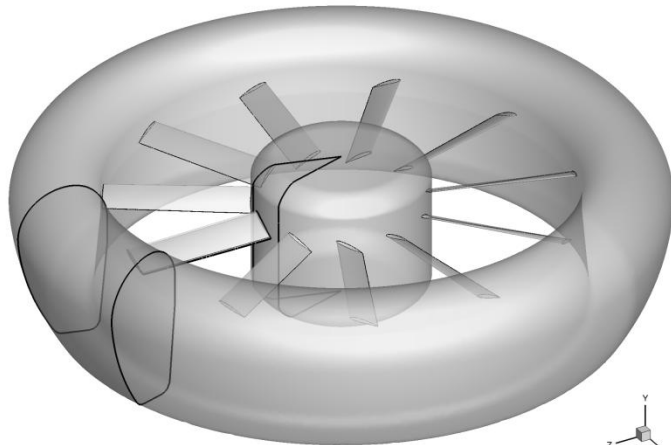


Диаграмма направленности
общего уровня звукового давления



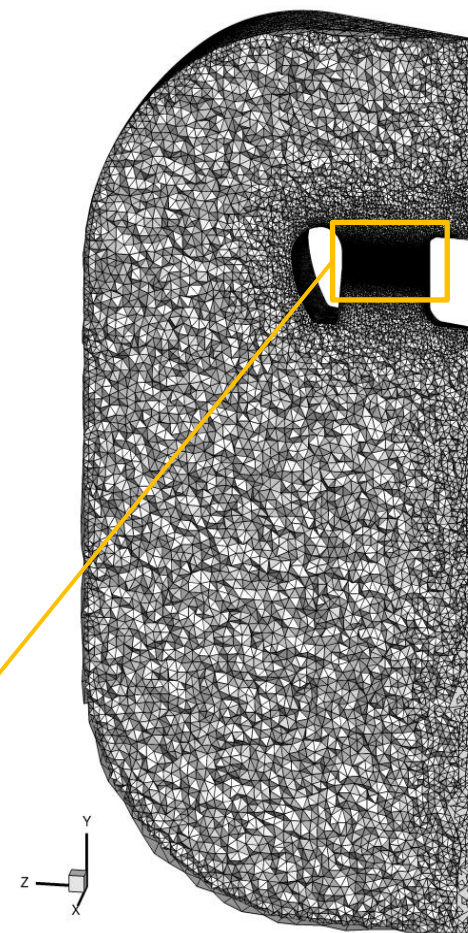
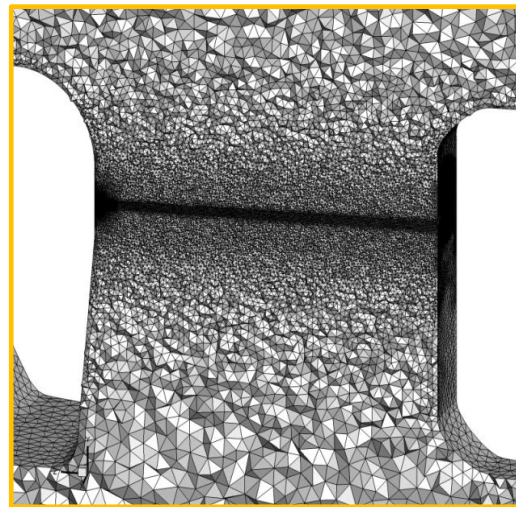
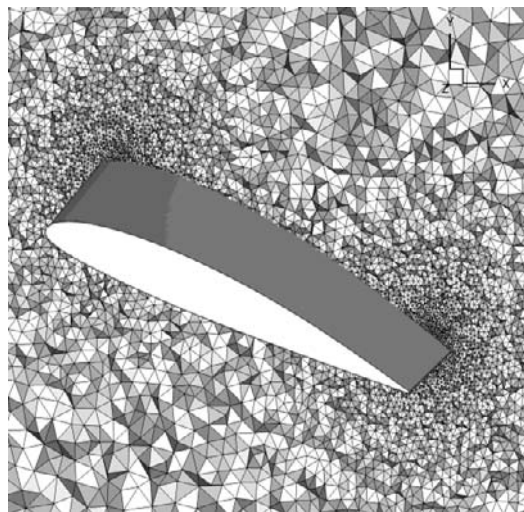


Расчет 11-лопастного рулевого винта

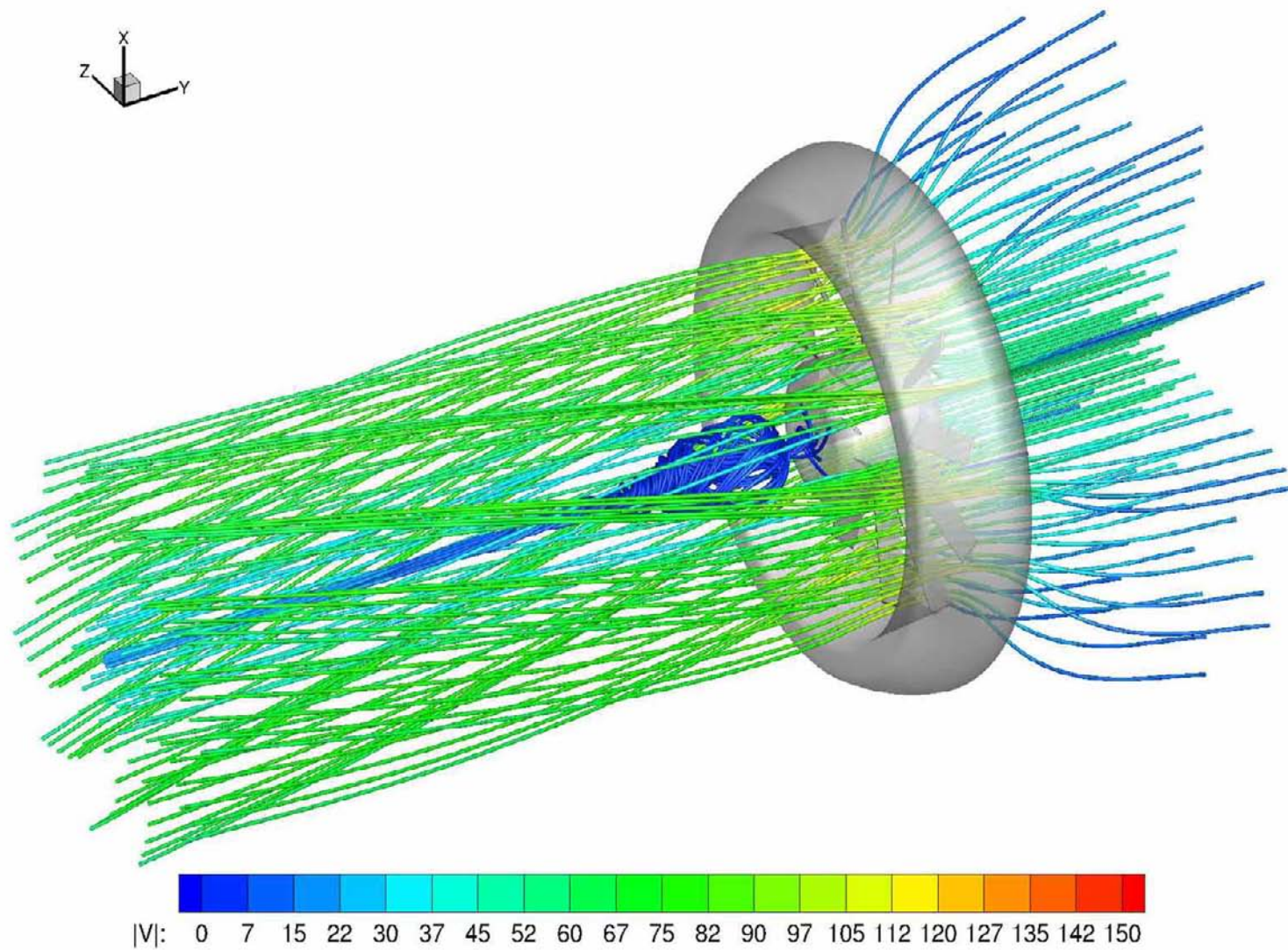


Число лопастей N	11
Радиус винта R	0.7 м
Радиус «центрального тела»	0.2655м
Хорда лопасти b	0.1 м
Профиль лопасти	ЦАГИ СВ-11
Крутка	Линейная -8° , $\bar{r} = 0.5 \dots 1.0$
Внутренний радиус «кольца»	0.705
Внешний радиус «кольца»	1.0
Частота вращения винта	2437.6 об/мин
Линейная скорость конца лопасти $V_{\text{лоп}}$	180 м/с

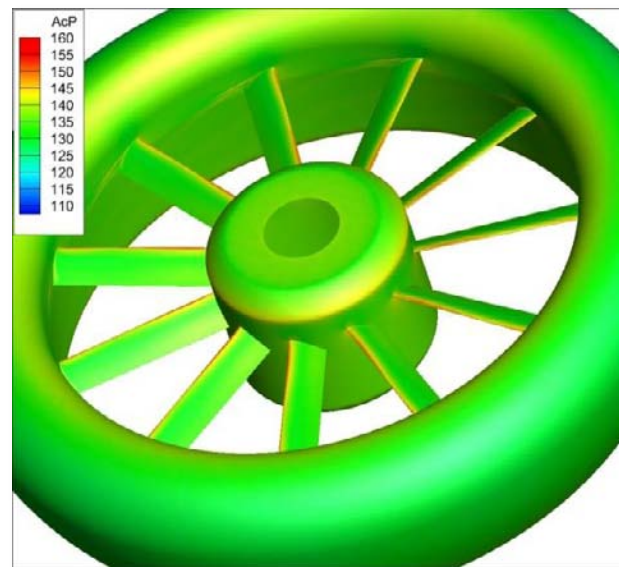
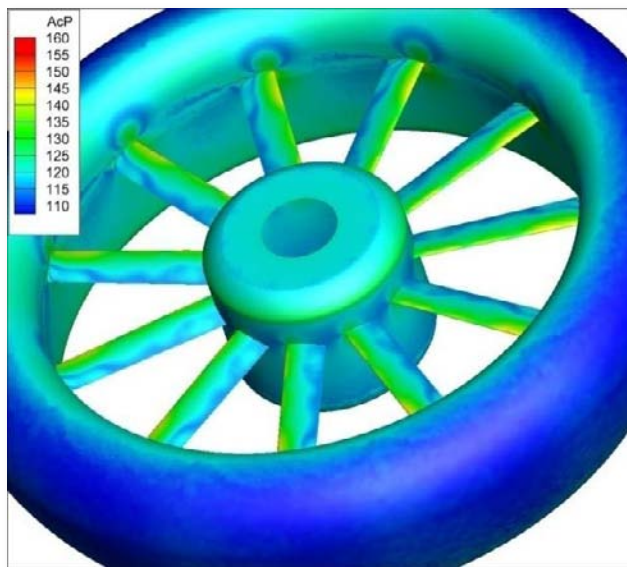
Угол установки лопасти	Число узлов	Число тетраэдров
10°	2.3M	13M
20°	2.5M	14M
30°	2.6M	15M
40°	2.6M	15M



Общий вид течения



Акустические нагрузки



Акустические нагрузки при углах установки
10° (слева) и 30° (справа)

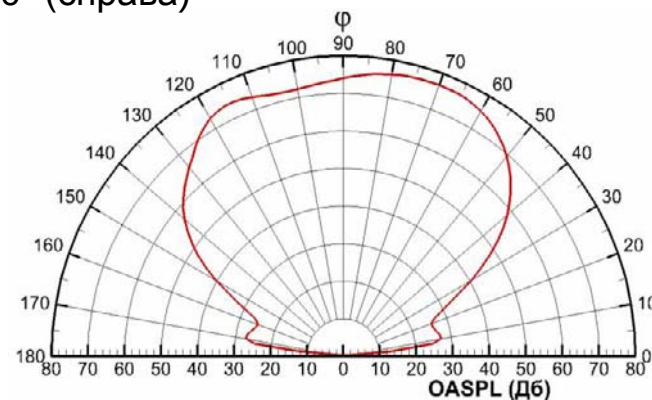
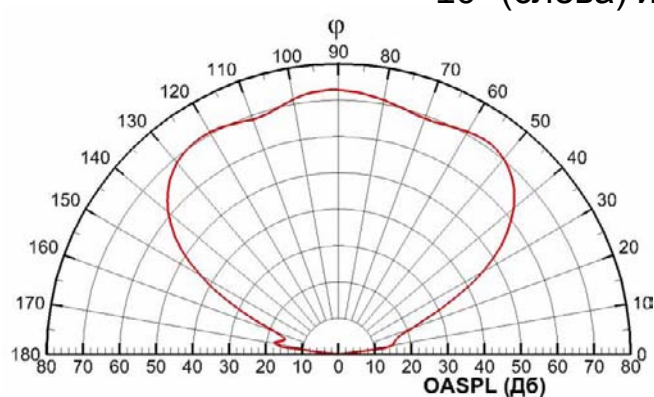
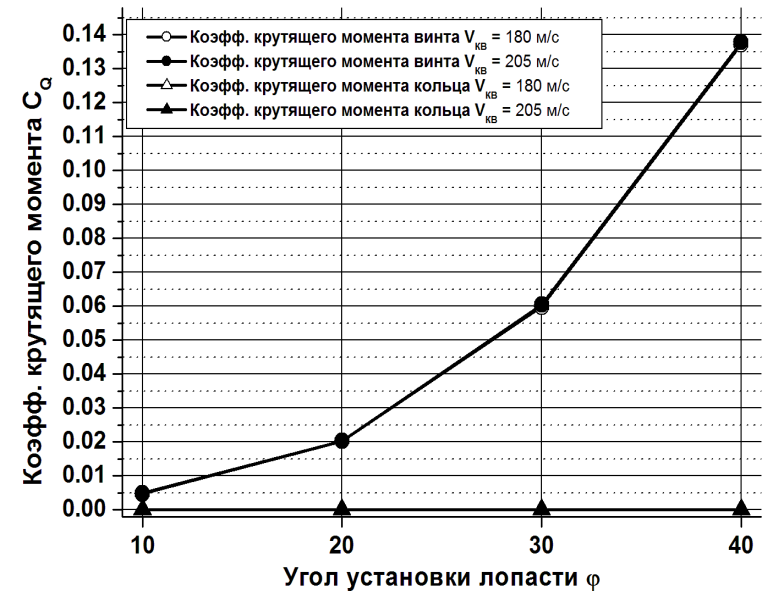
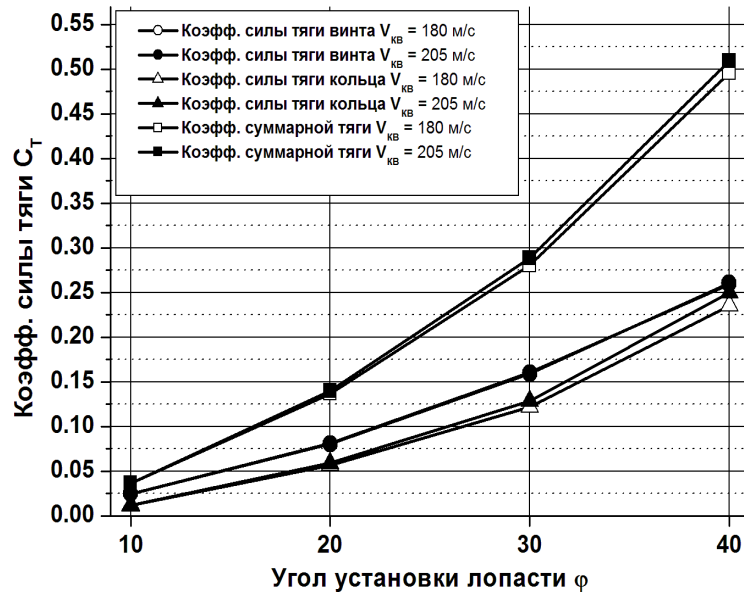
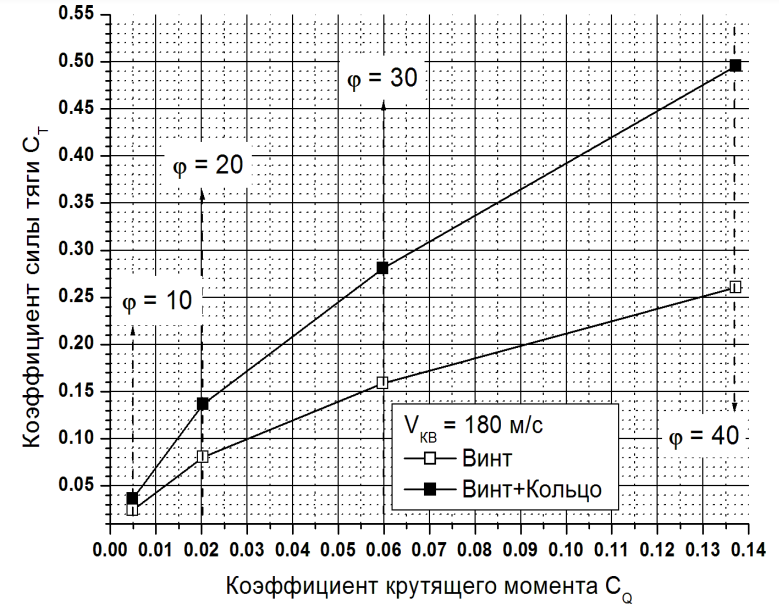
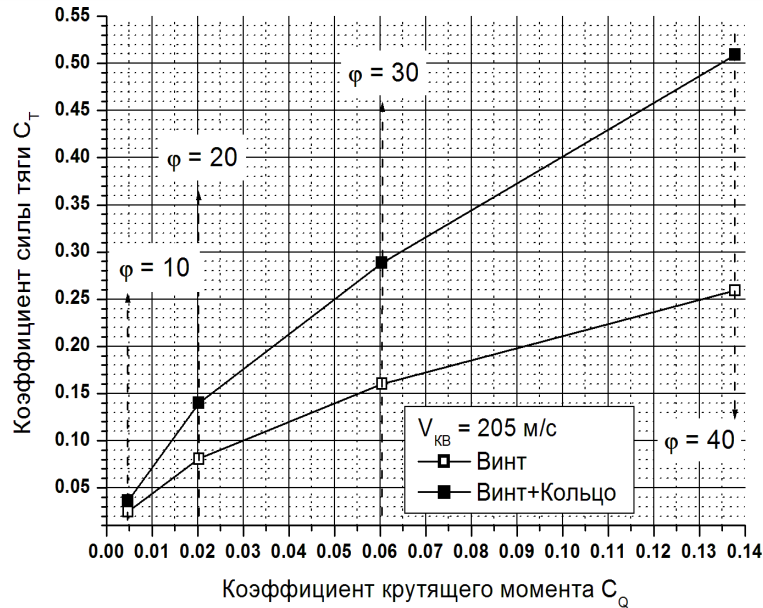
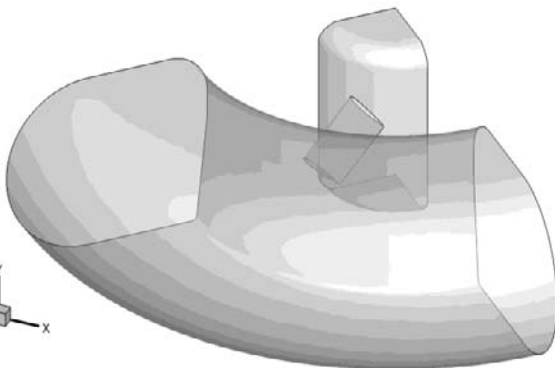
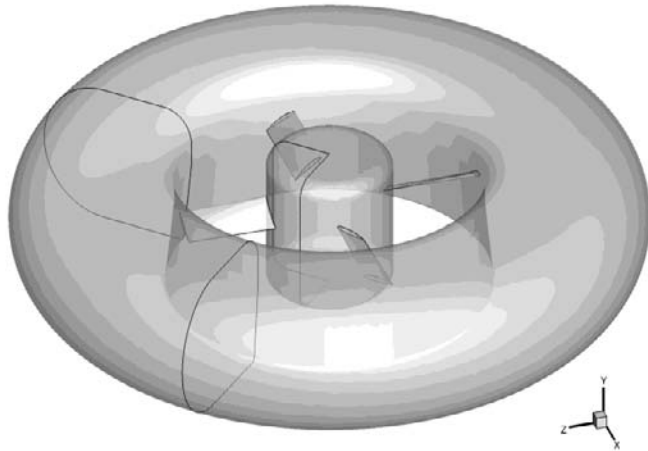


Диаграмма направленности акустического излучения
для углов 10° (слева) и 30° (справа)

Интегральные характеристики



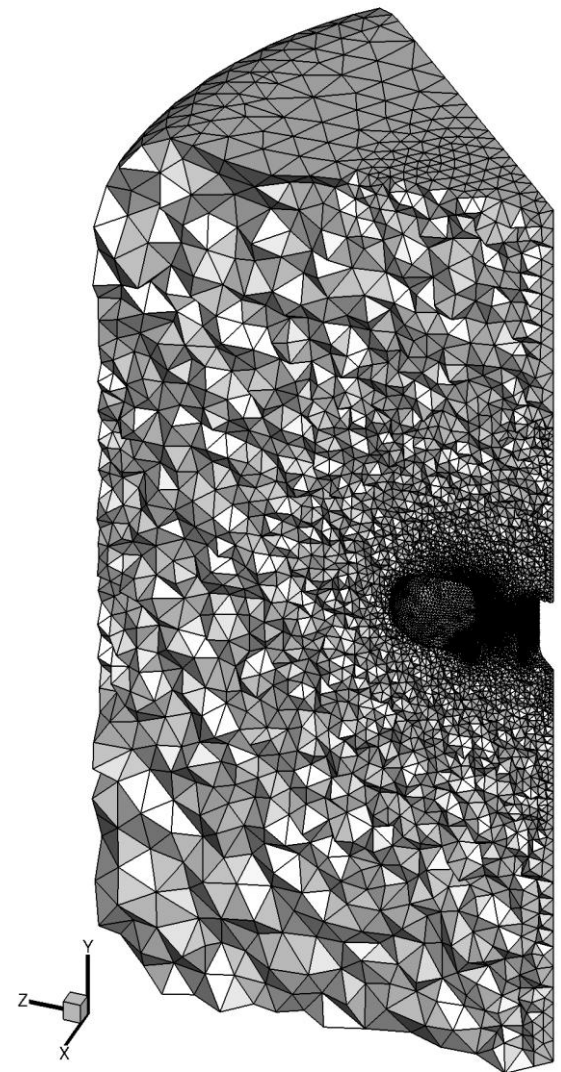
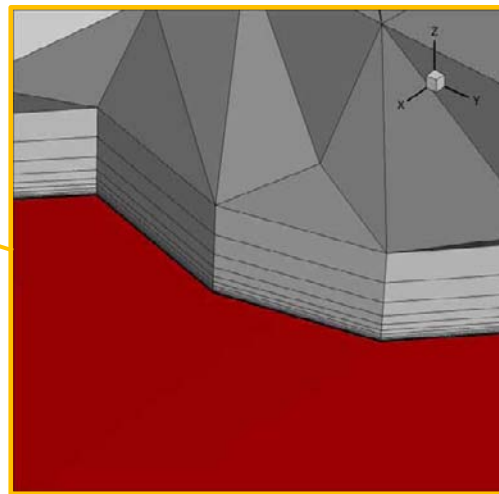
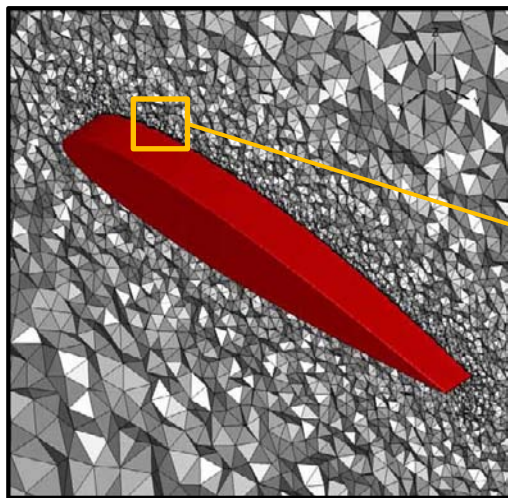
Расчет 4-лопастного рулевого винта

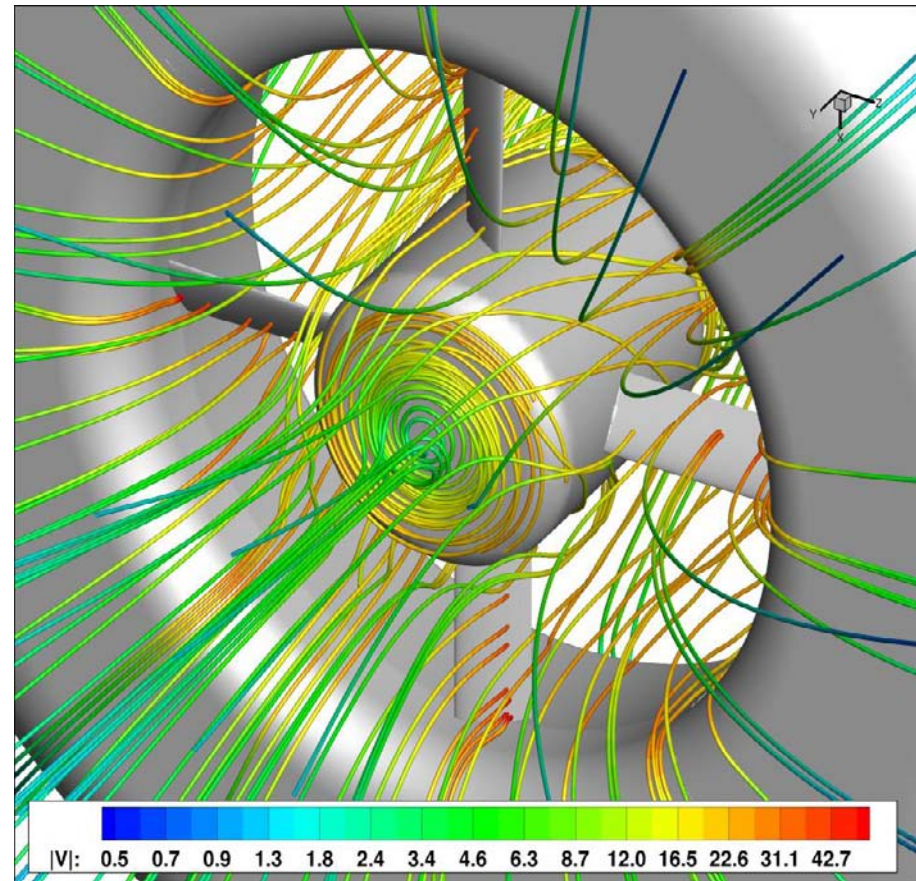
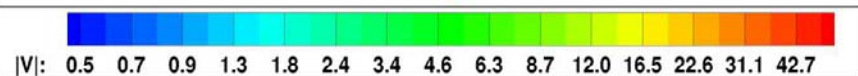
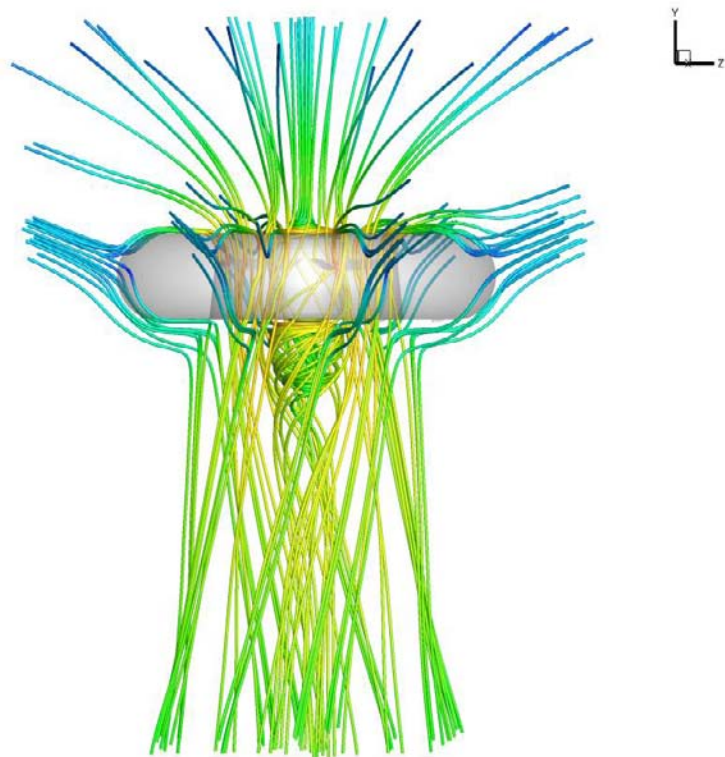


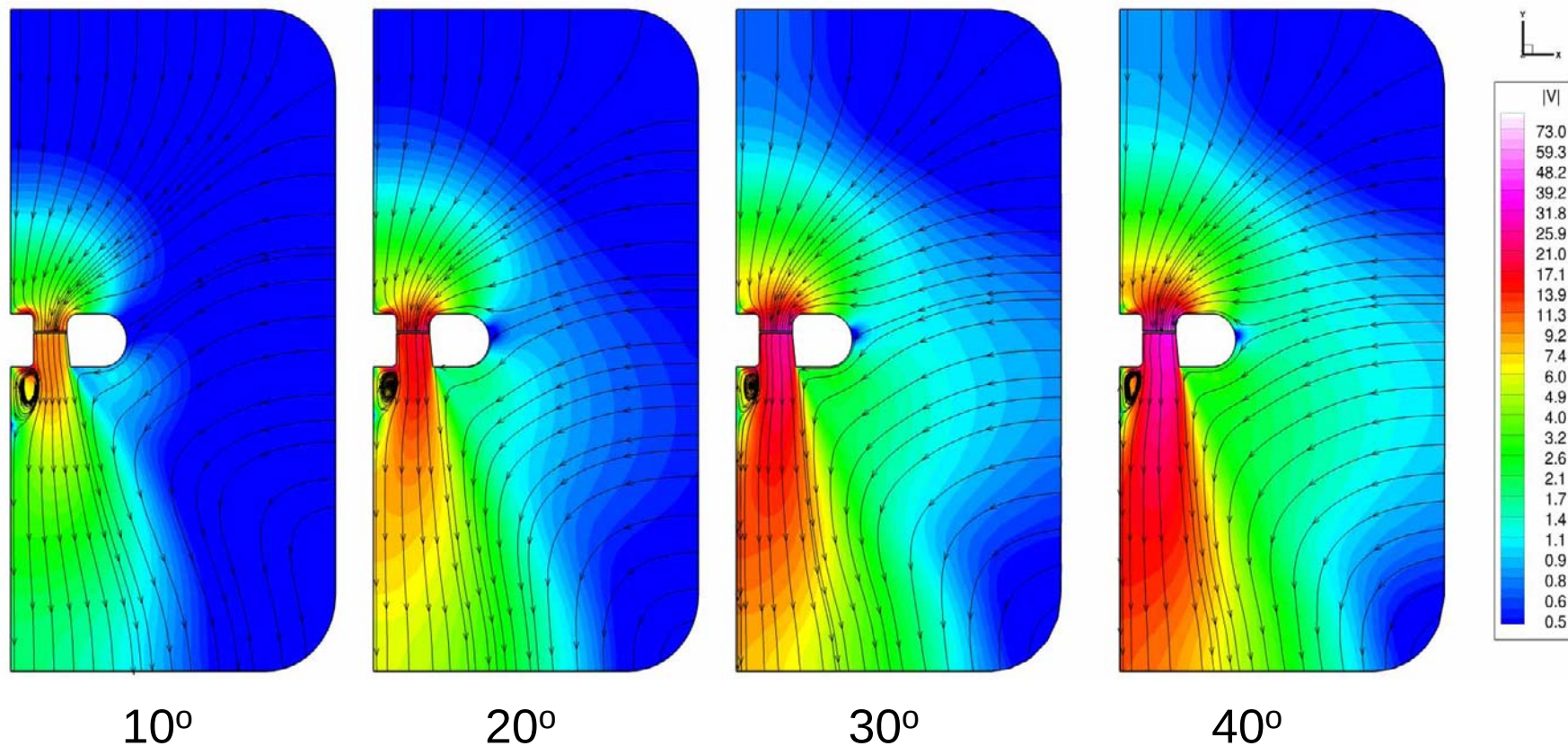
Число лопастей N	4
Радиус винта R	0.6 м
Радиус «центрального тела»	0.2655 м
Хорда лопасти b	0.13 м
Профиль лопасти	ЦАГИ СВ-11
Крутка	Линейная -8° , $\bar{r} = 0.5 \dots 1.0$
Внутренний радиус «кольца»	0.605
Внешний радиус «кольца»	1.25
Частота вращения винта	1166.4 об/мин
Линейная скорость конца лопасти $V_{\text{лоп}}$	73.3 м/с

Расчетная сетка

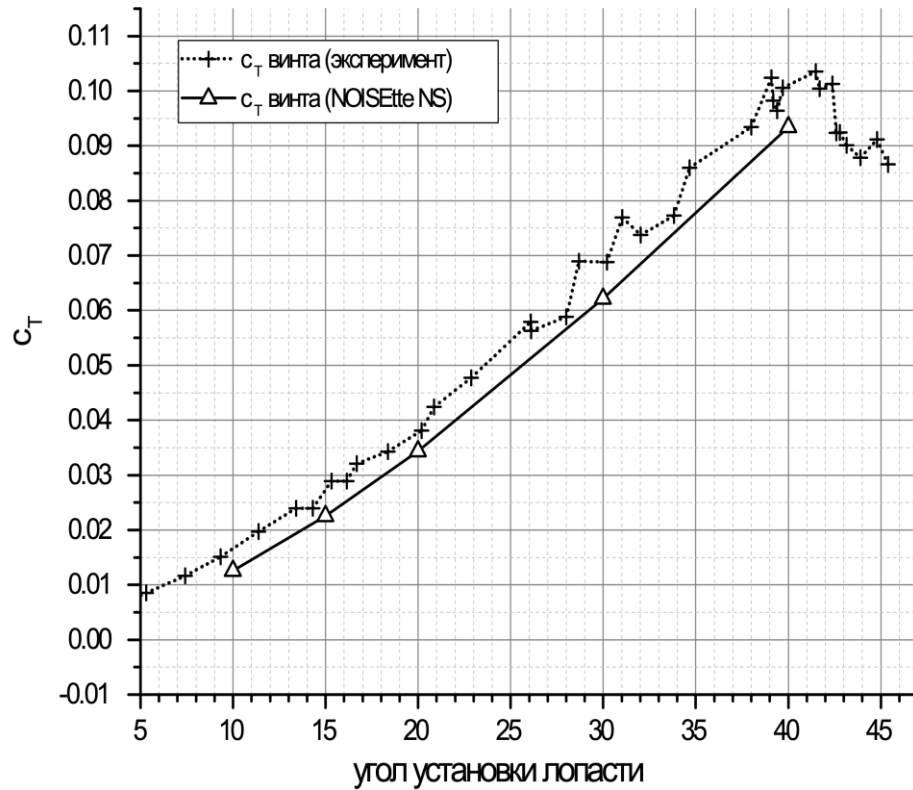
Угол установки лопасти	Число узлов	Число элементов
10°	2 326 941	13 589 791
15°	2 371 707	13 859 009
15° (Hybrid)	2 374 581	7 352 927
20°	2 511 582	14 669 900
30°	2 555 652	14 936 402
30° (Hybrid fine)	6 478 232	21 016 355
40°	2 592 469	15 154 418



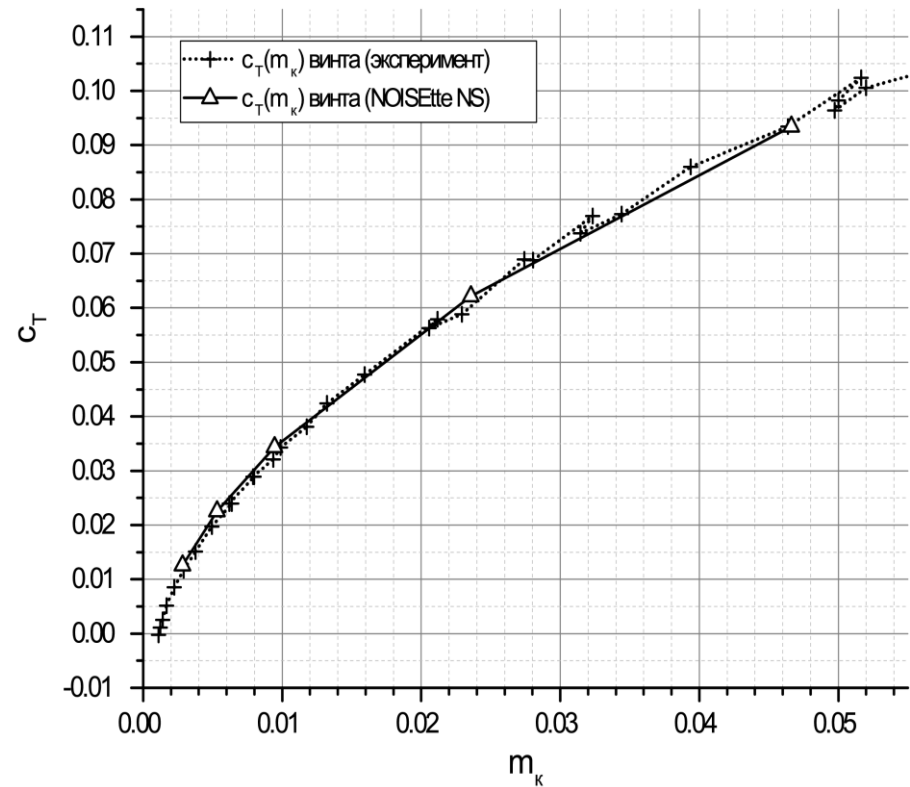




Поле модуля абсолютной скорости и линии тока
в меридиональном сечении при разных углах установки лопасти

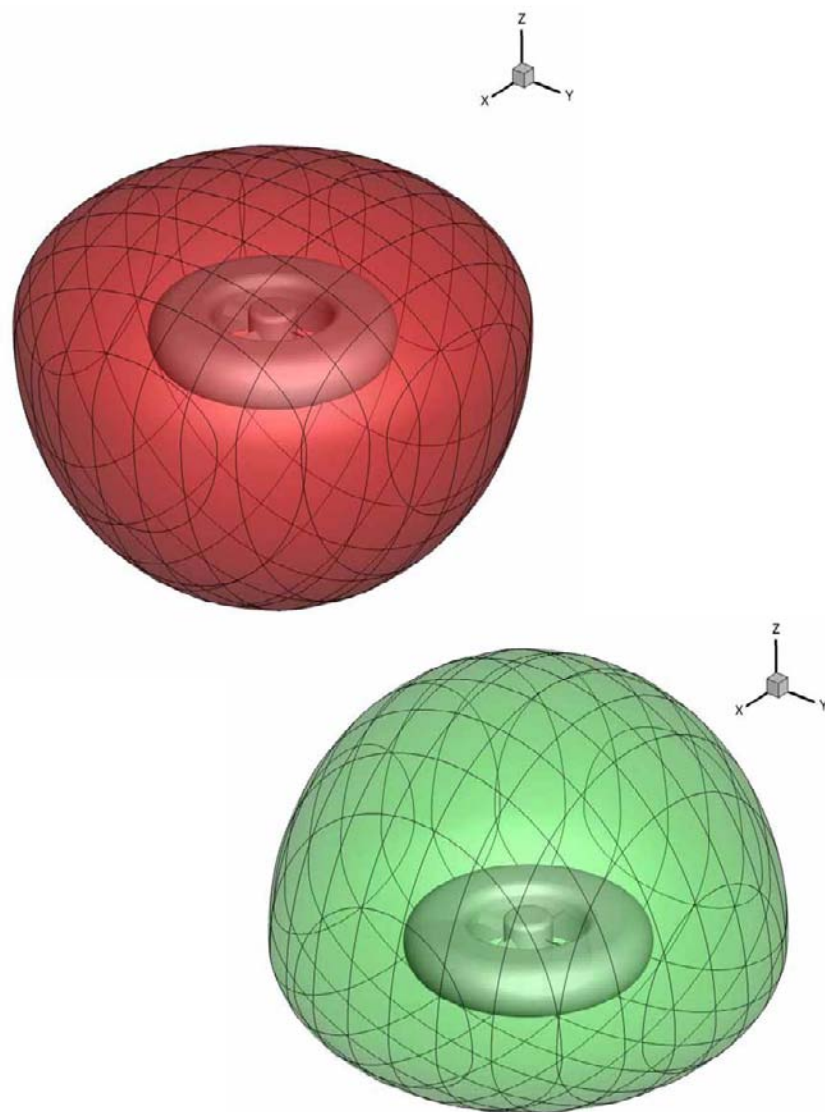


Коэффициент тяги винта при различных углах установки лопасти



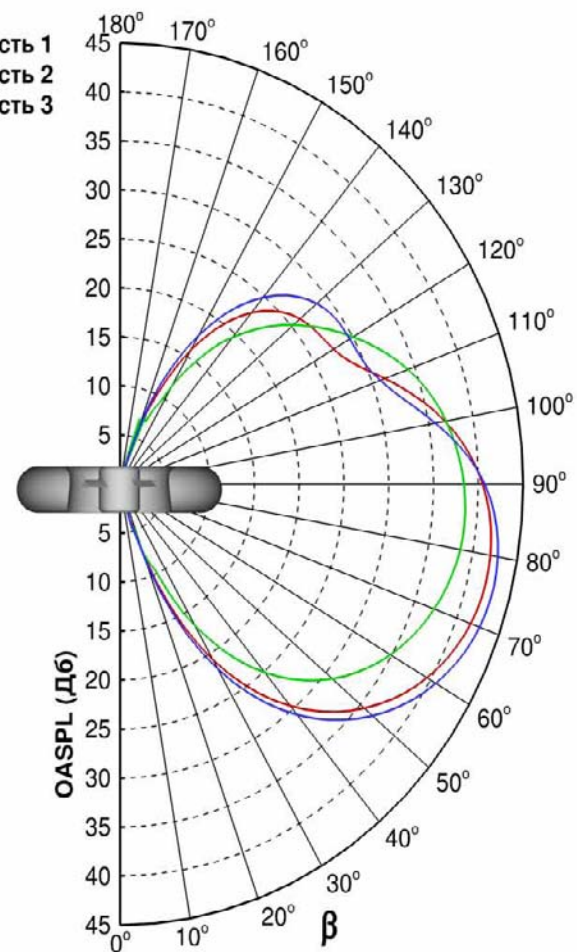
Поляра $C_T(m_k)$ винта

Акустические характеристики

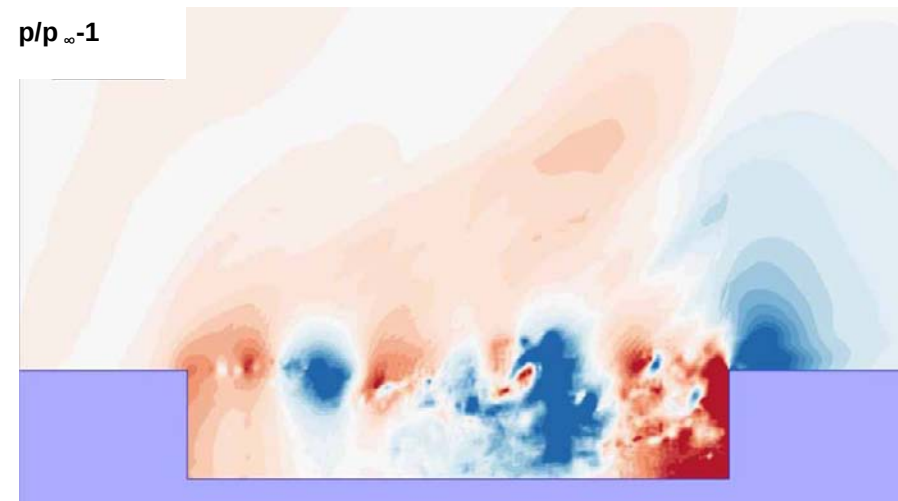
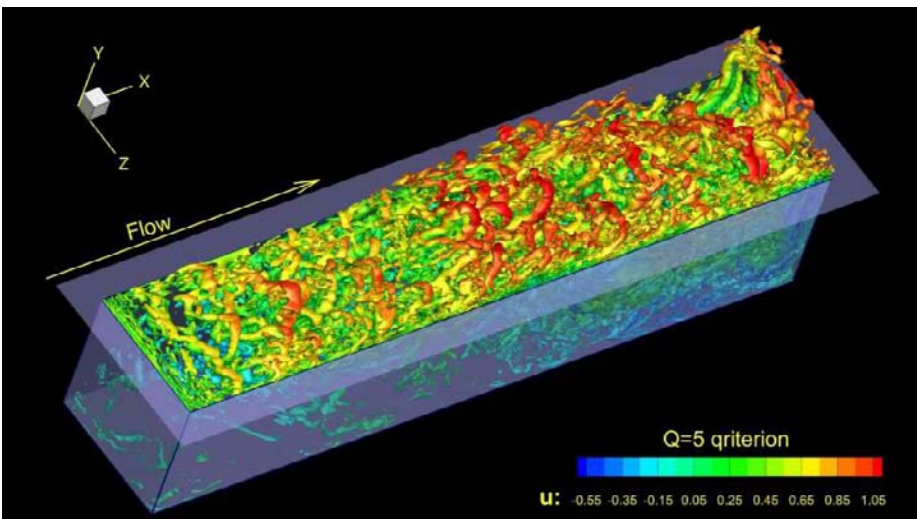
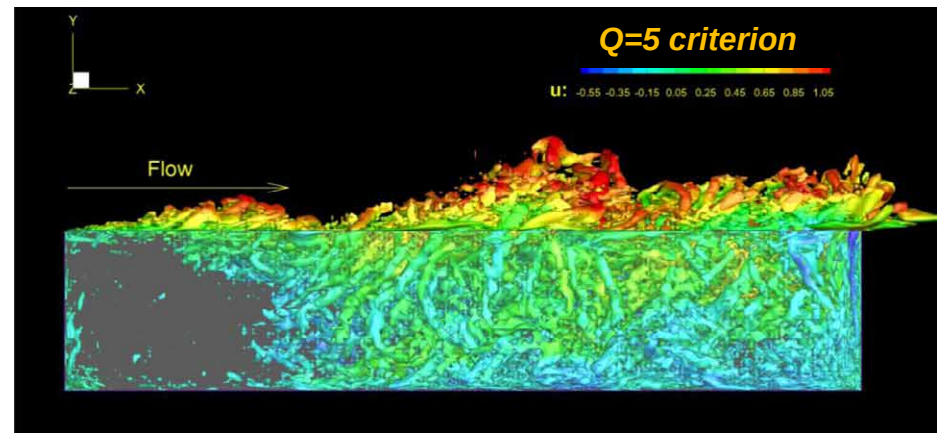
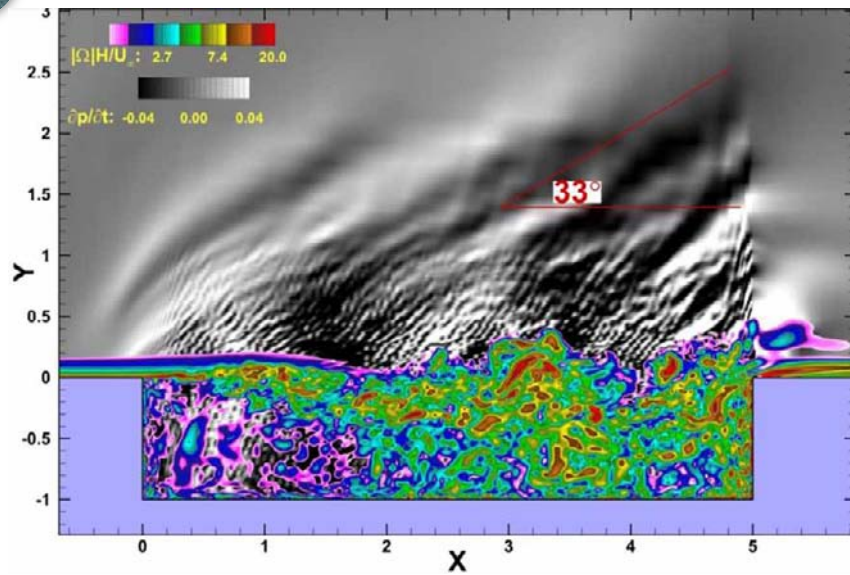


— поверхность 1
— поверхность 2
— поверхность 3

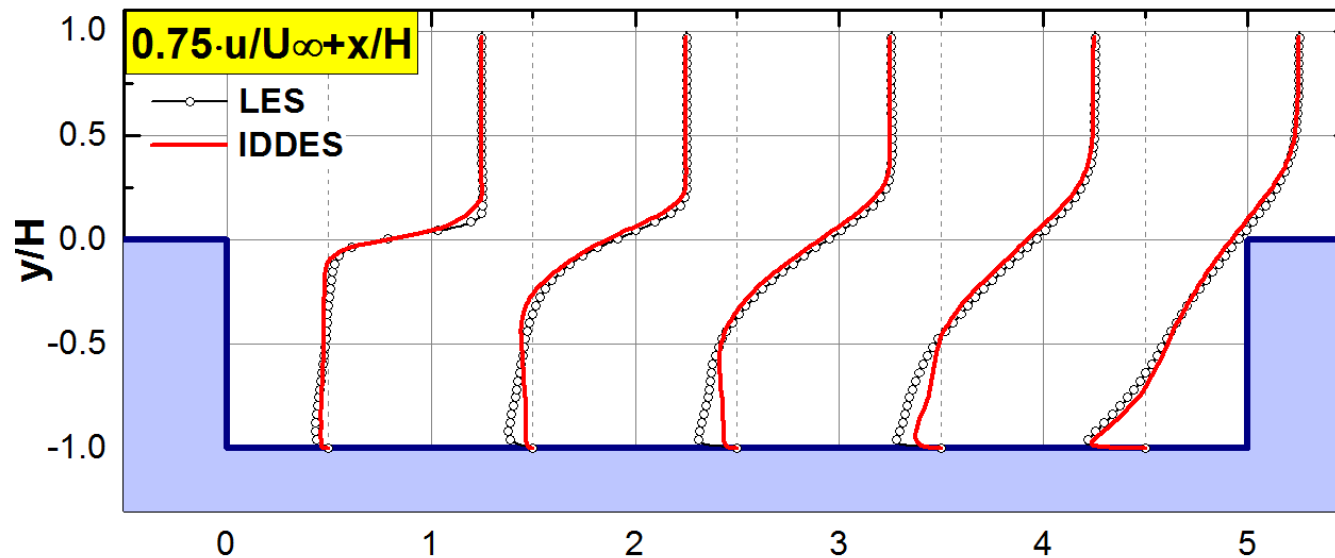
направление струи
формируемой винтом



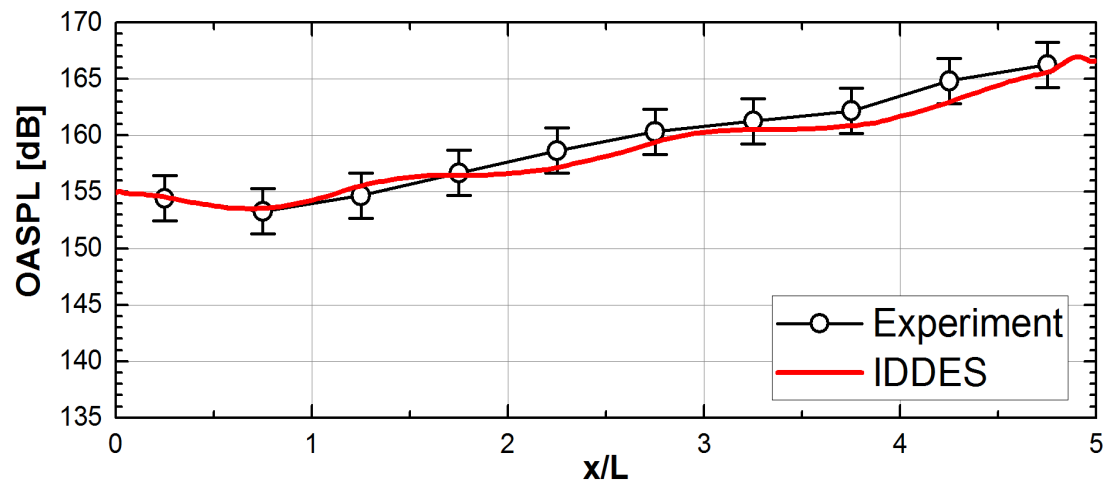
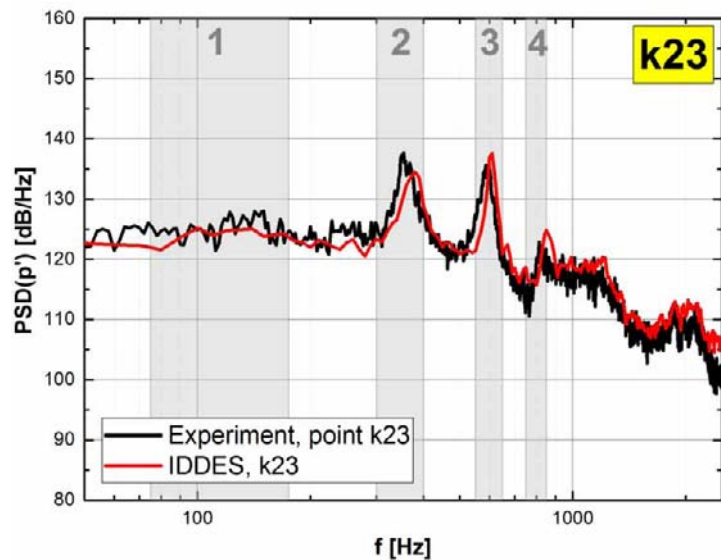
Течение в каверне М219



Сравнение с эталонными данными



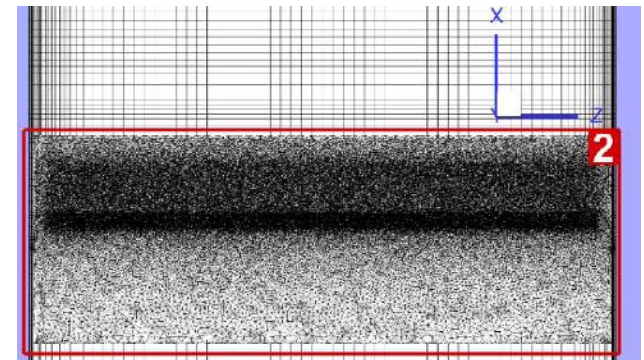
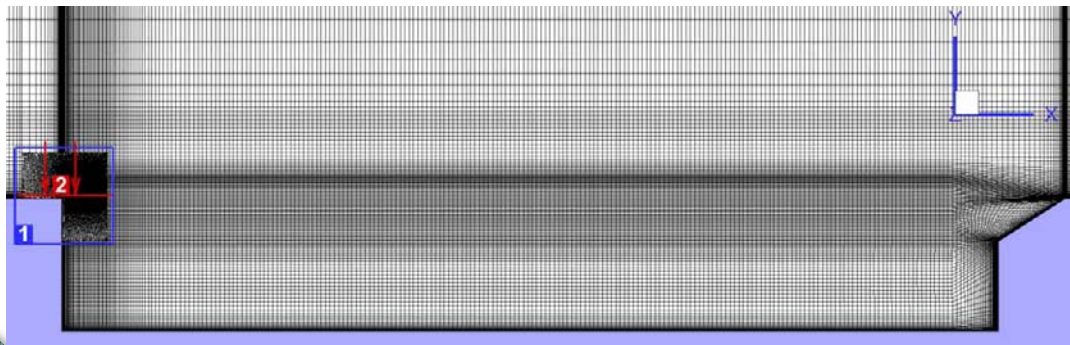
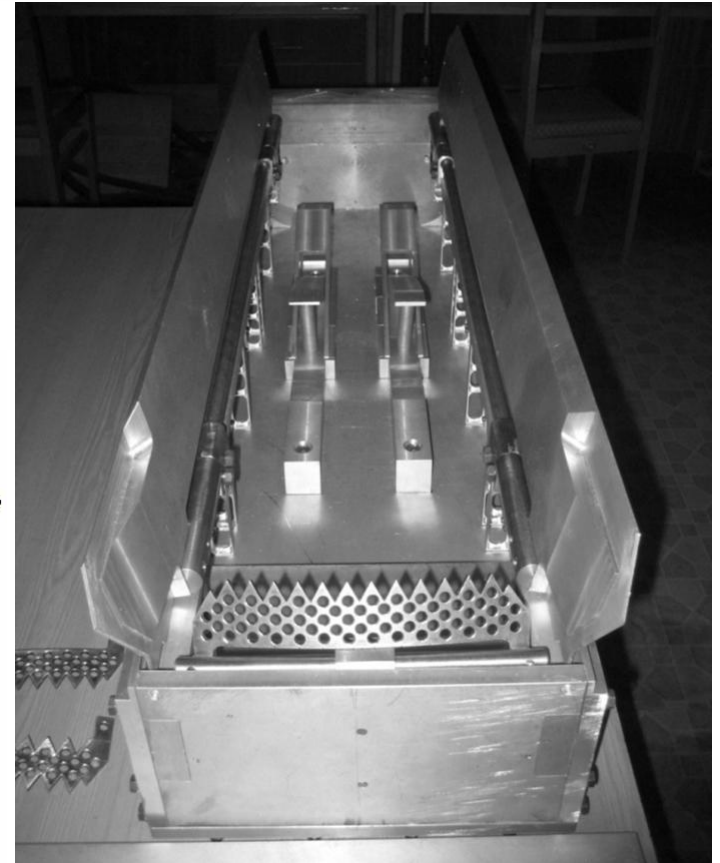
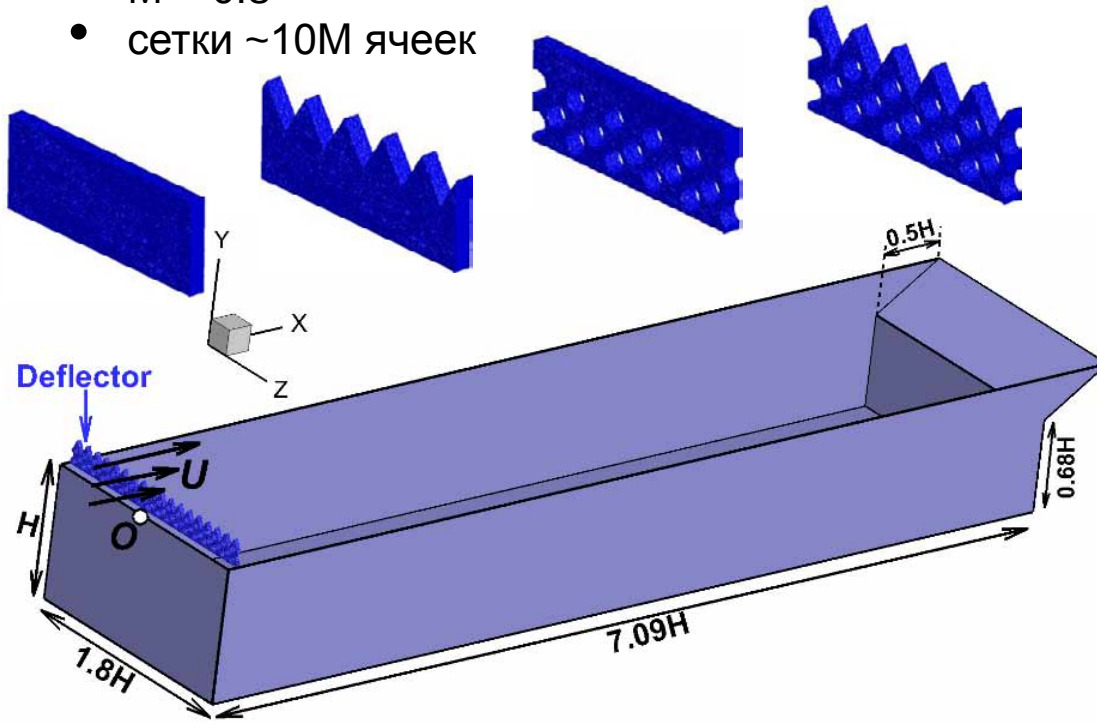
Профили продольной скорости



Каверна с дефлектором

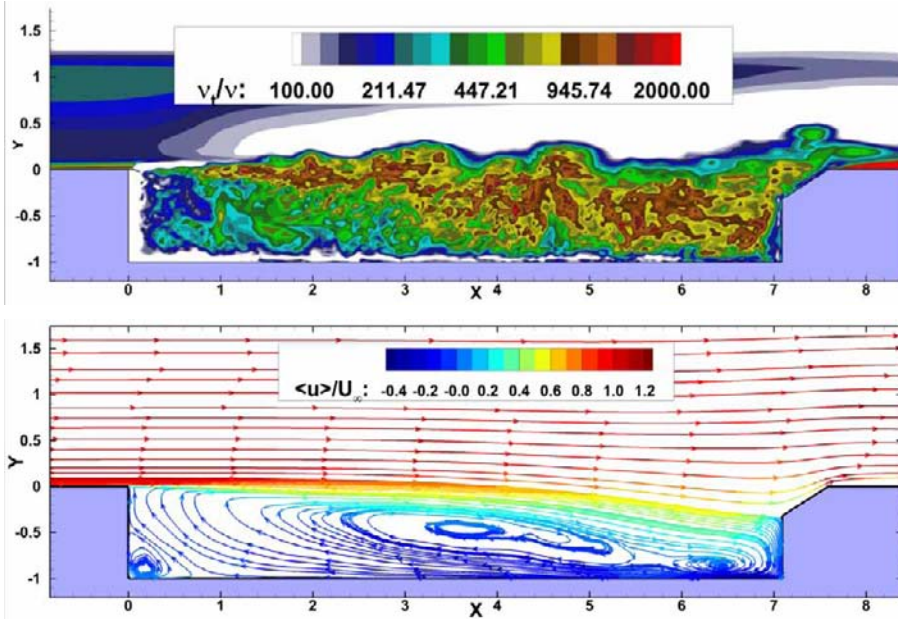
Параметры расчета

- $Re_H = 7 \cdot 10^6$
- $M = 0.8$
- сетки $\sim 10M$ ячеек

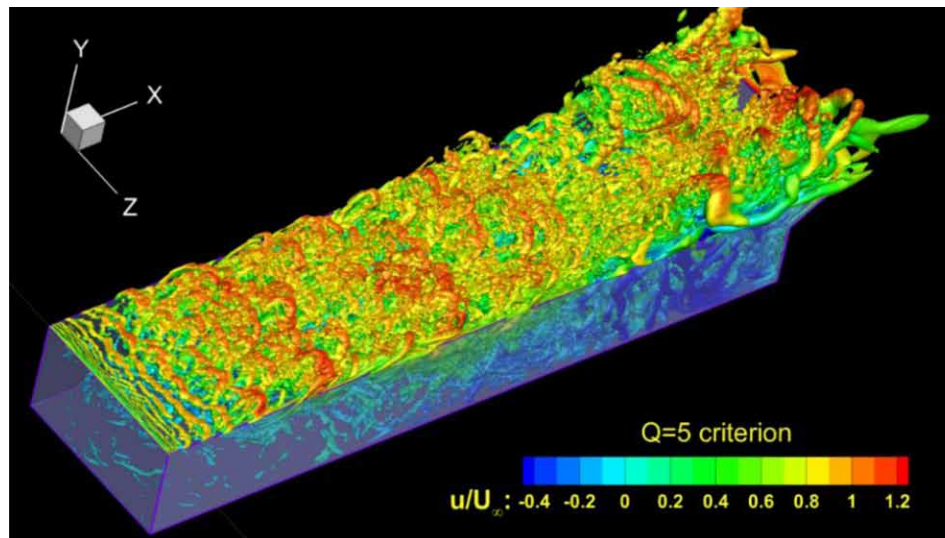
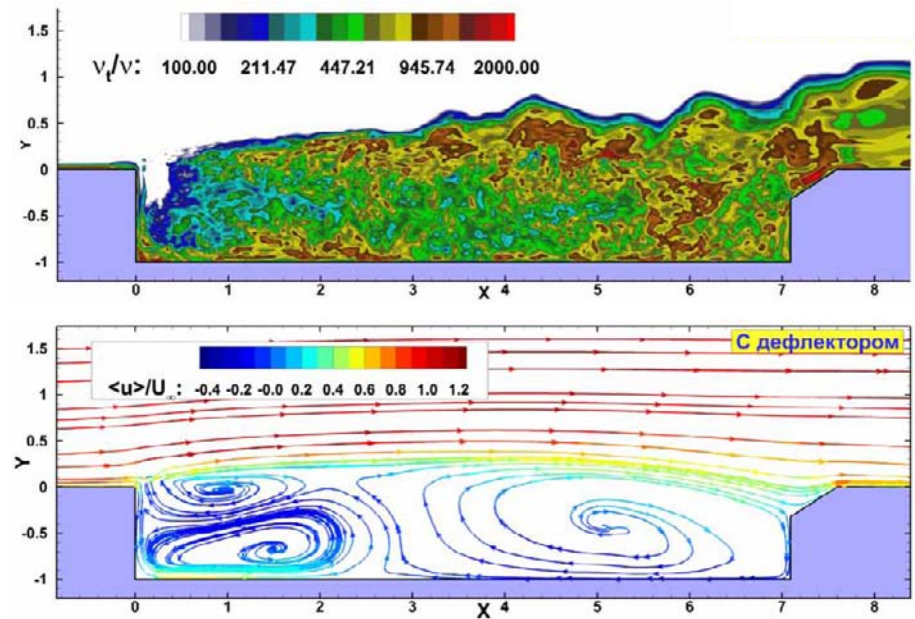


Каверна с дефлектором

Без дефлектора

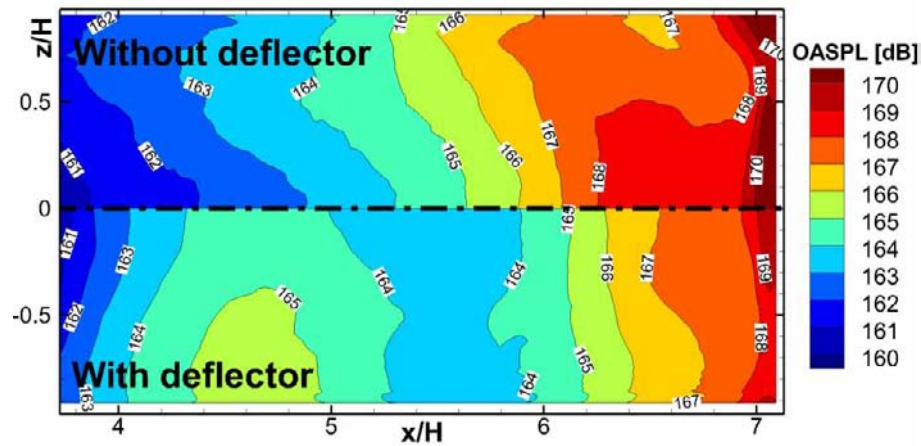


С дефлектором

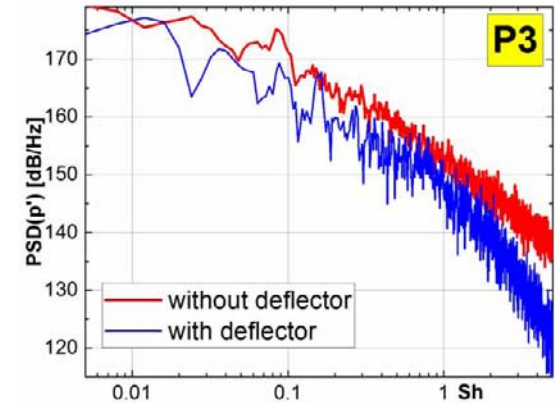
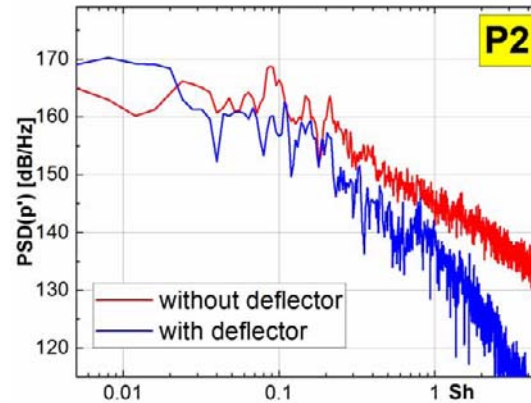
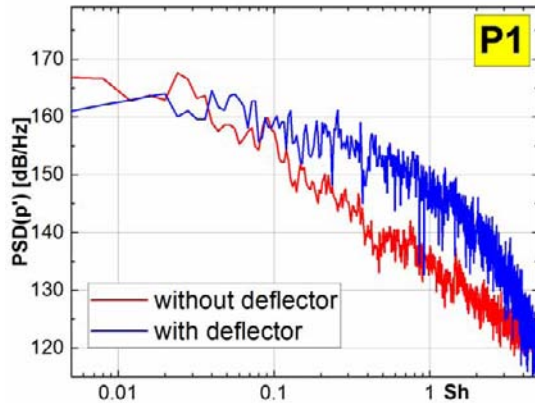
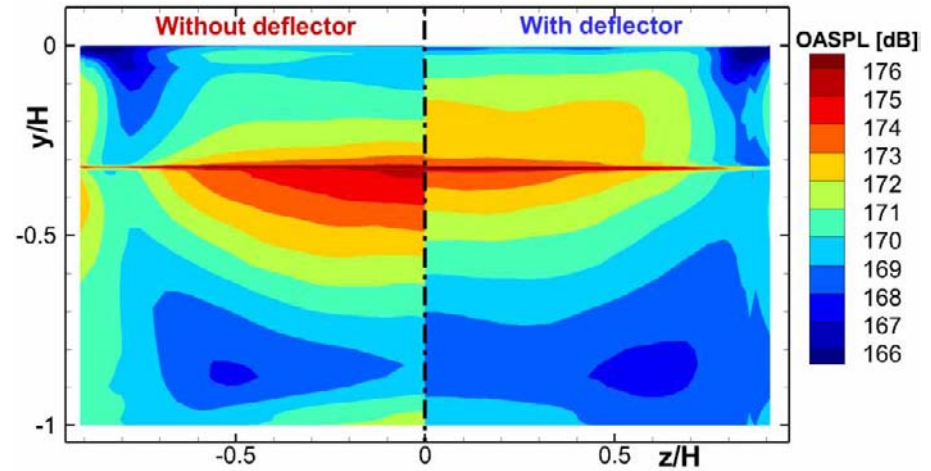


Каверна с дефлектором

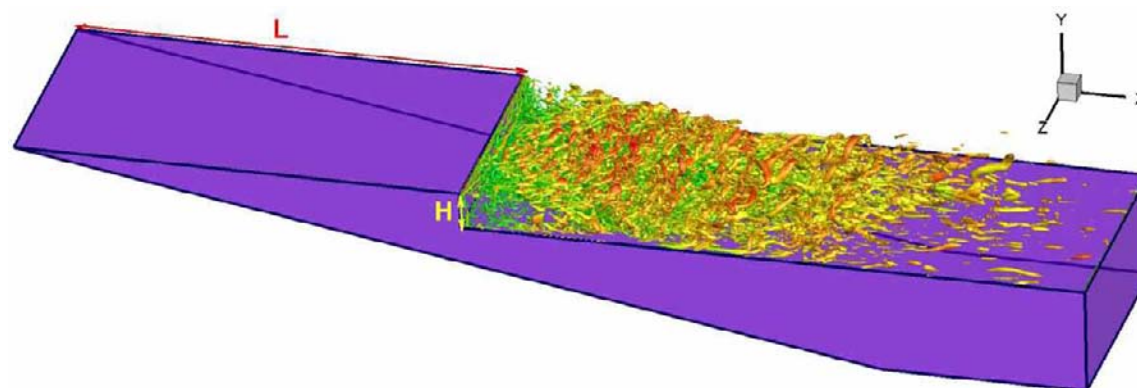
Без дефлектора



С дефлектором



Клиновидное тело с обратным уступом

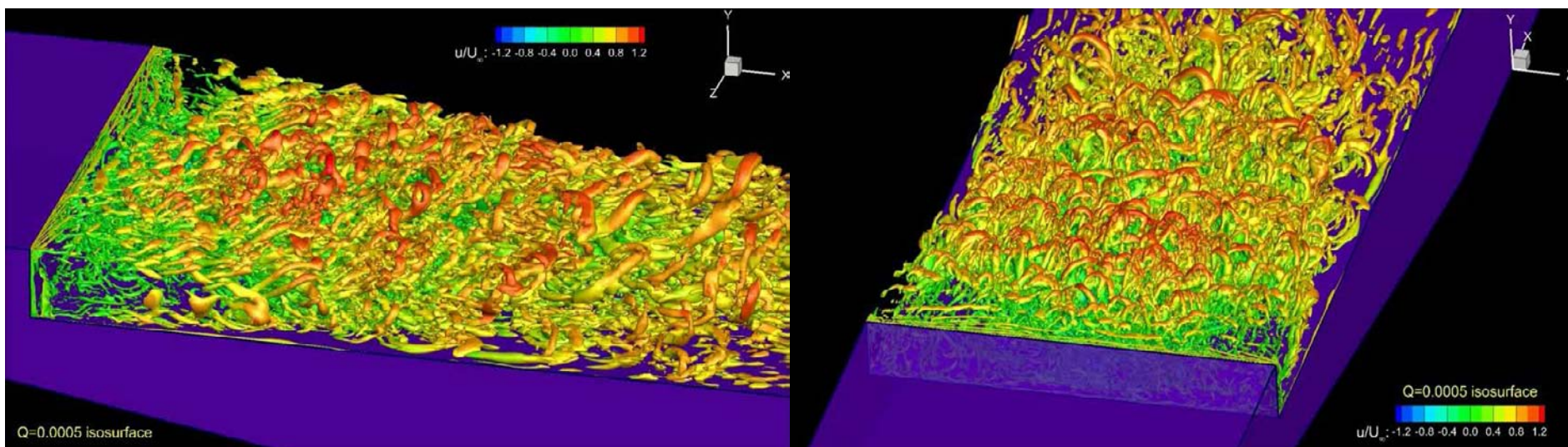


Параметры течения:

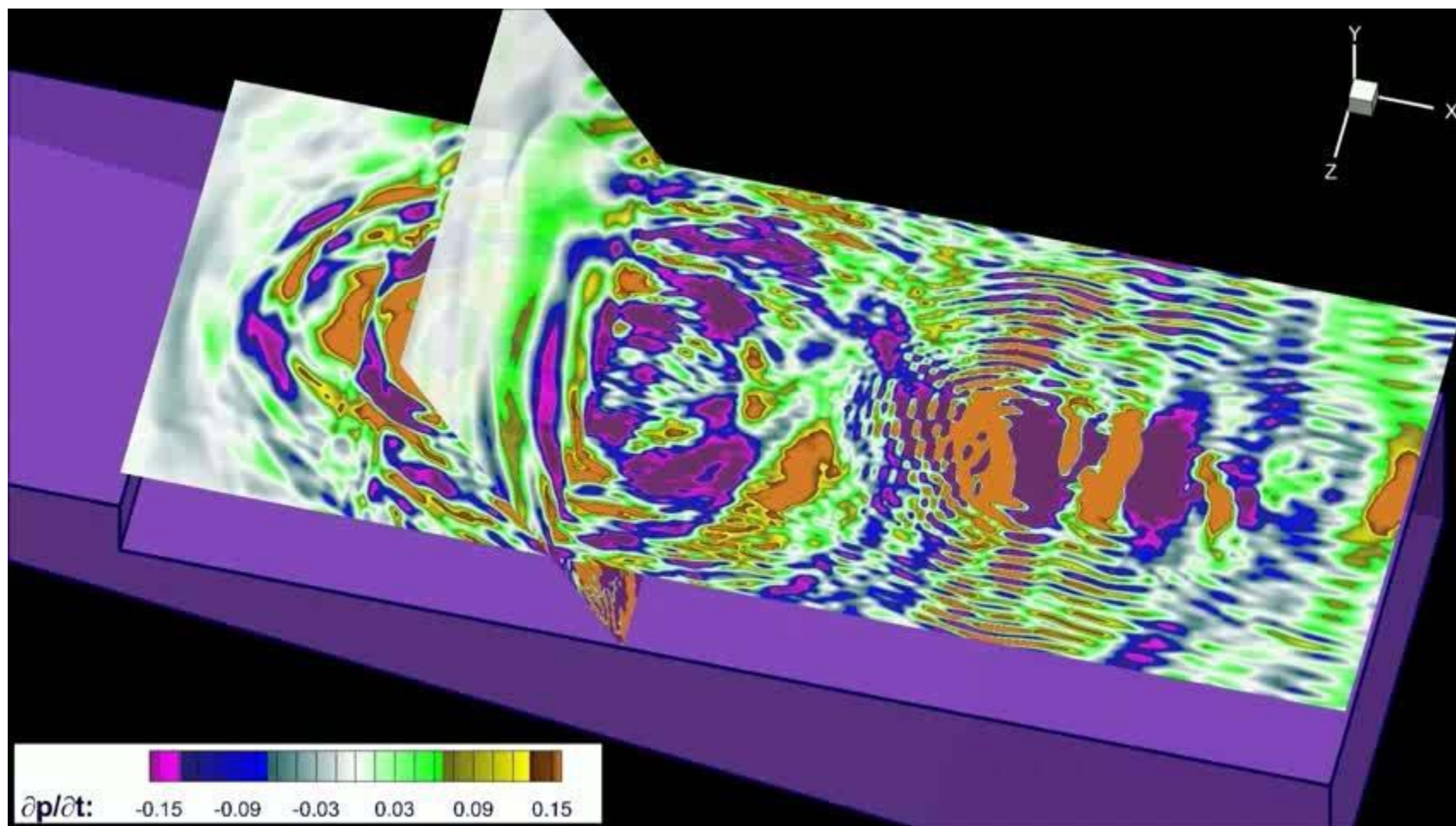
$$Re_L = 7.2 \cdot 10^6$$

$$M_\infty = 0.913$$

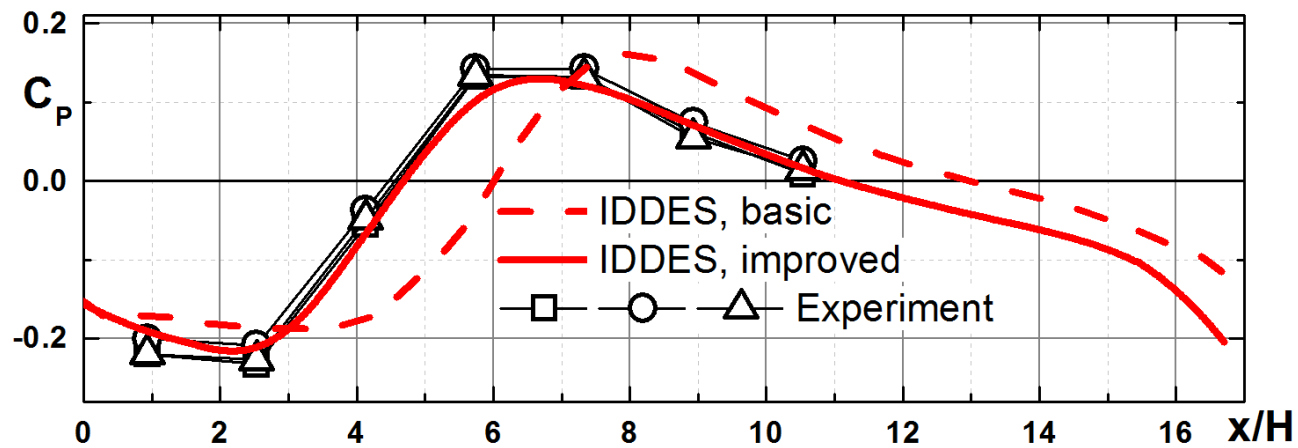
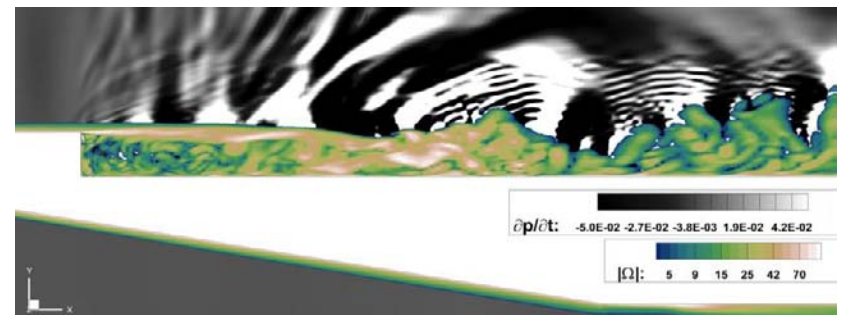
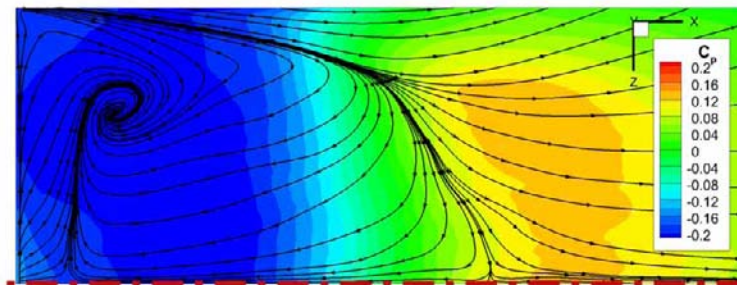
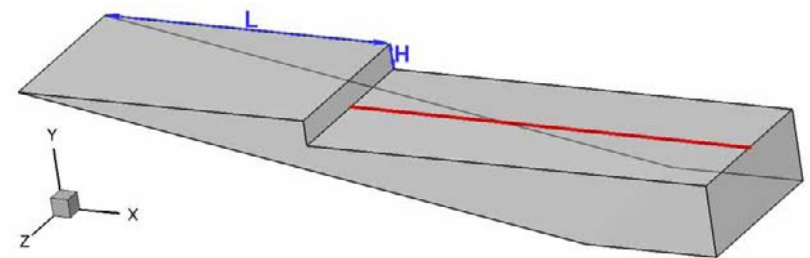
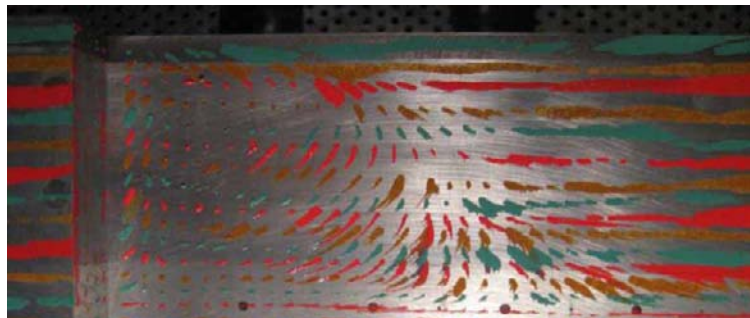
$$L = 0.358 \text{ [м]}$$

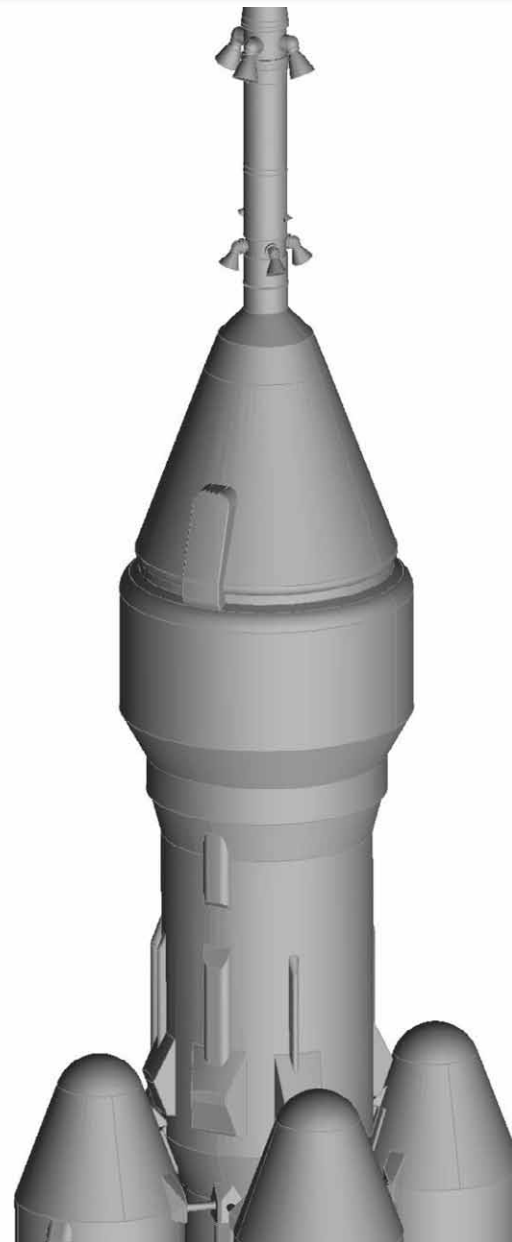
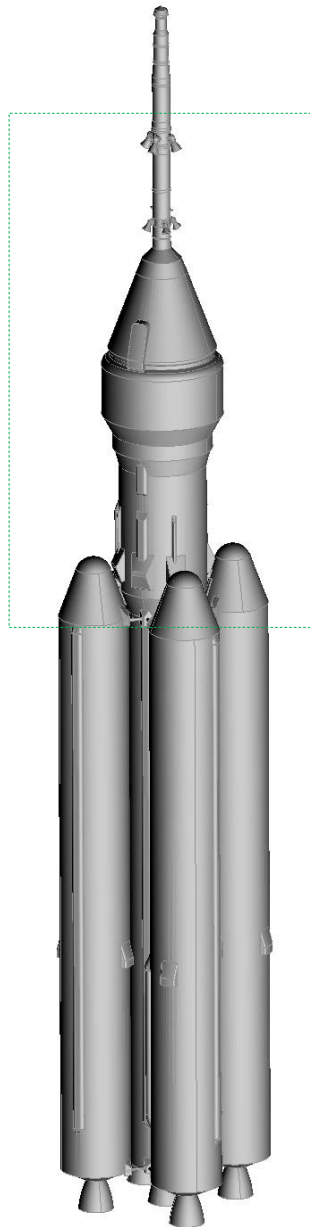


Клиновидное тело с обратным уступом



Сравнение с экспериментом ЦНИИМаш





Моделирование тел с изломами образующей

