

СУПЕРКОМПЬЮТЕР КАК ИНСТРУМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА В АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

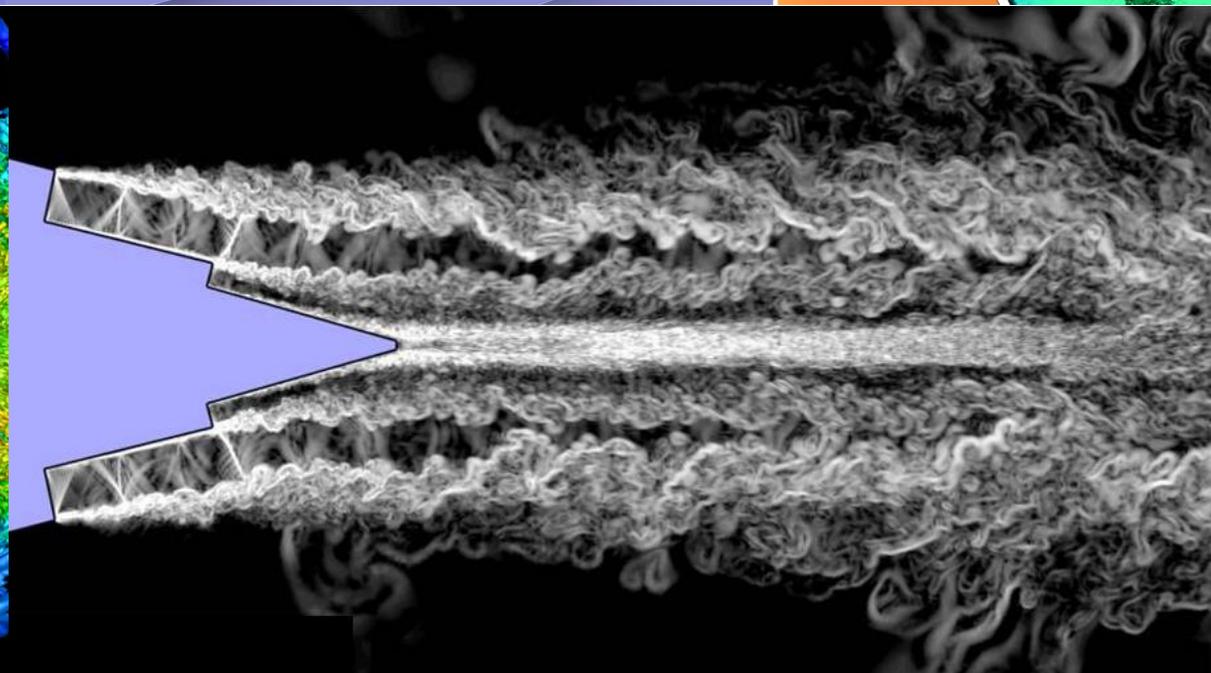
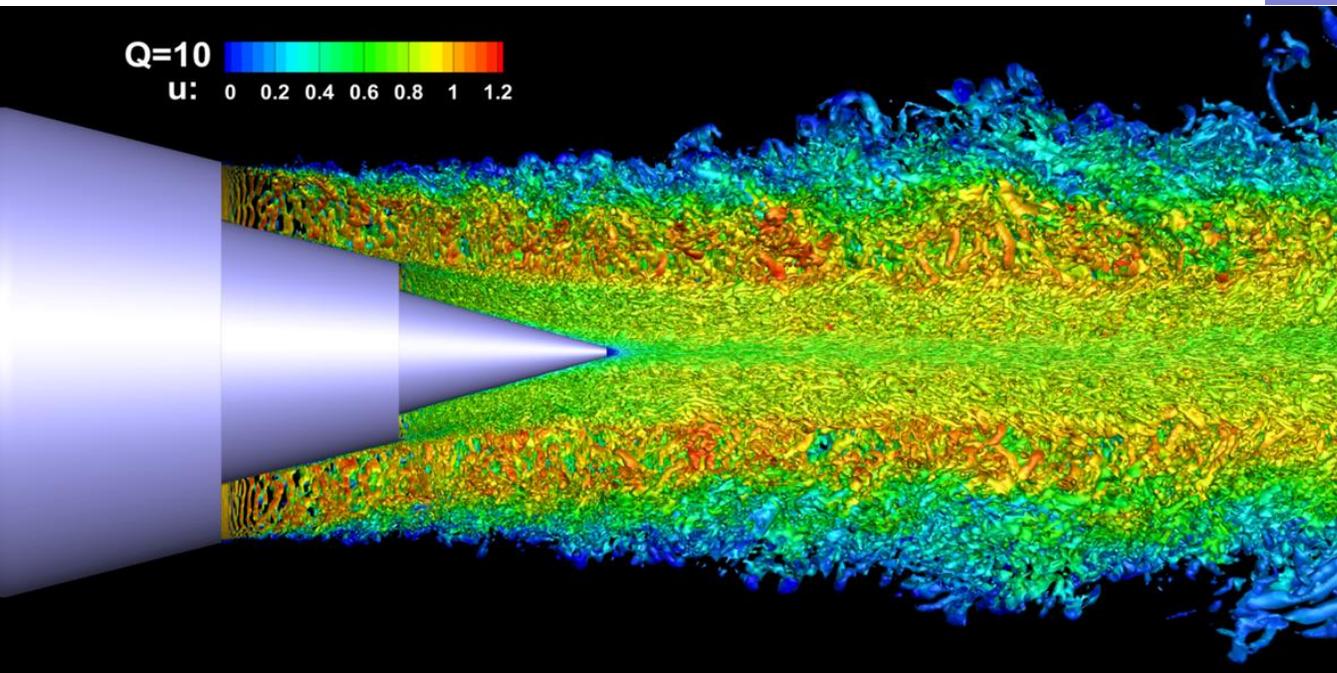
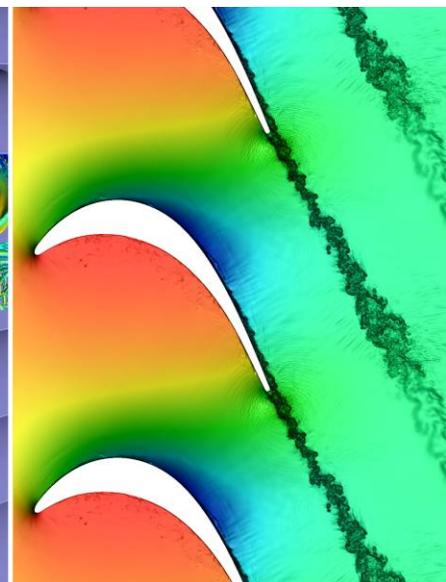
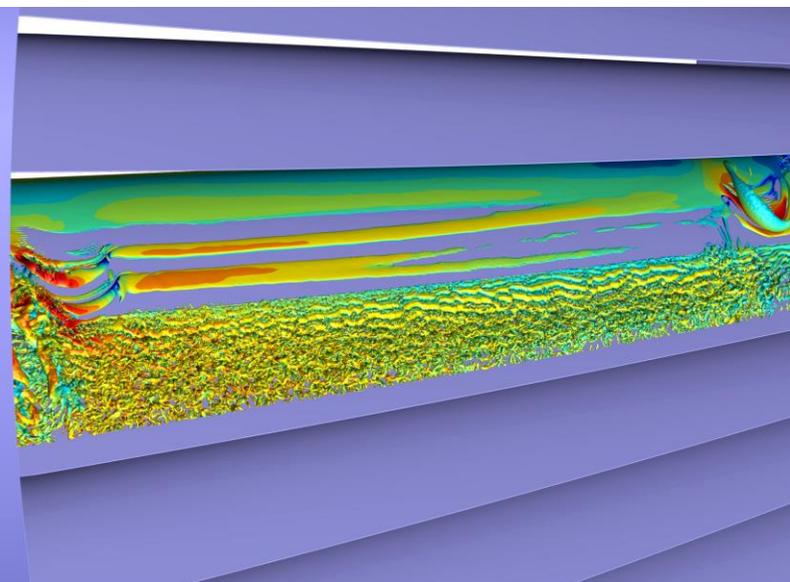
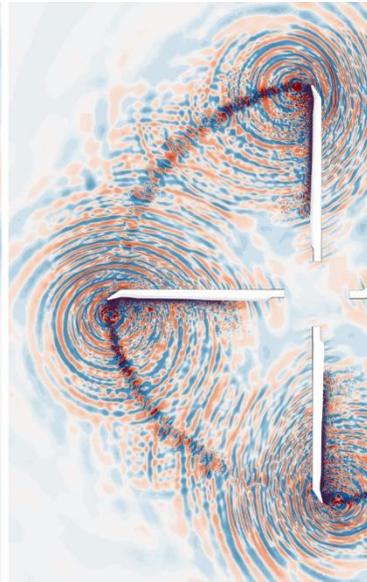
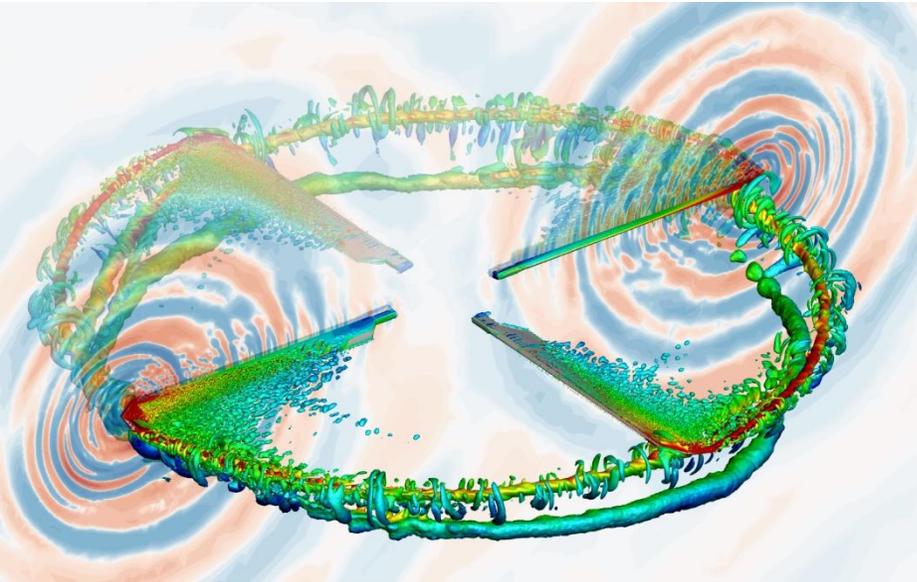
В. Г. Бобков, А. В. Горобец, А. П. Дубень, Т. К. Козубская, П. В. Родионов.



**Сектор Вычислительной Аэродинамики и Аэроакустики
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН**

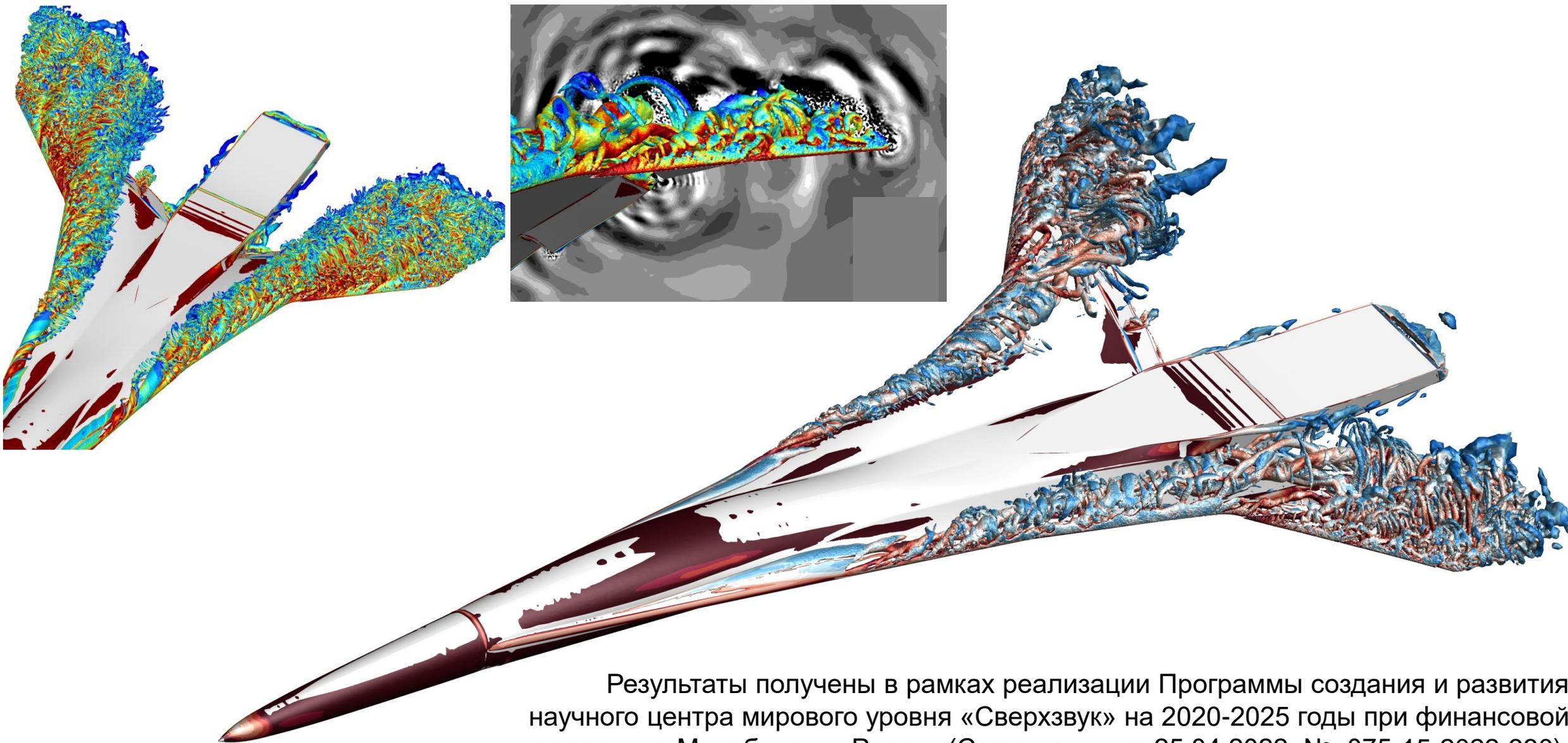
<http://caa.imamod.ru>

Вихреразрешающее моделирование

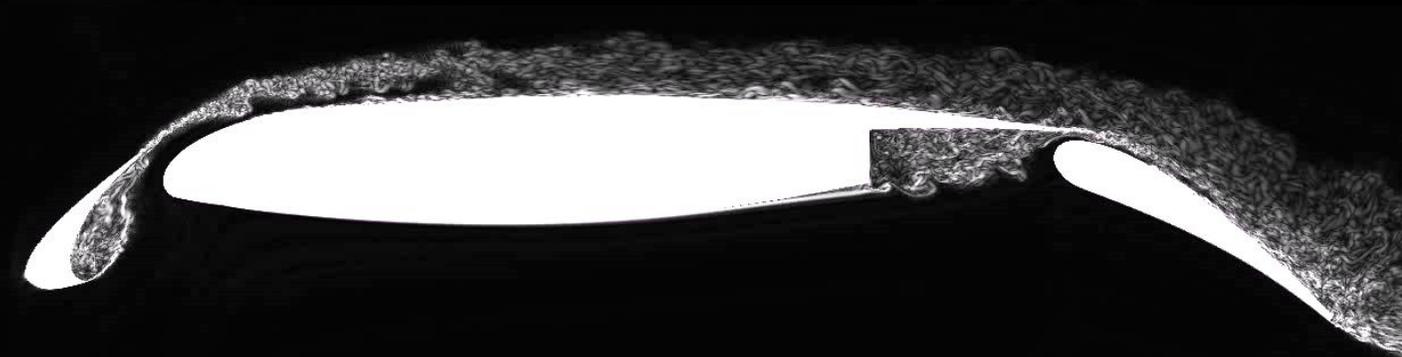
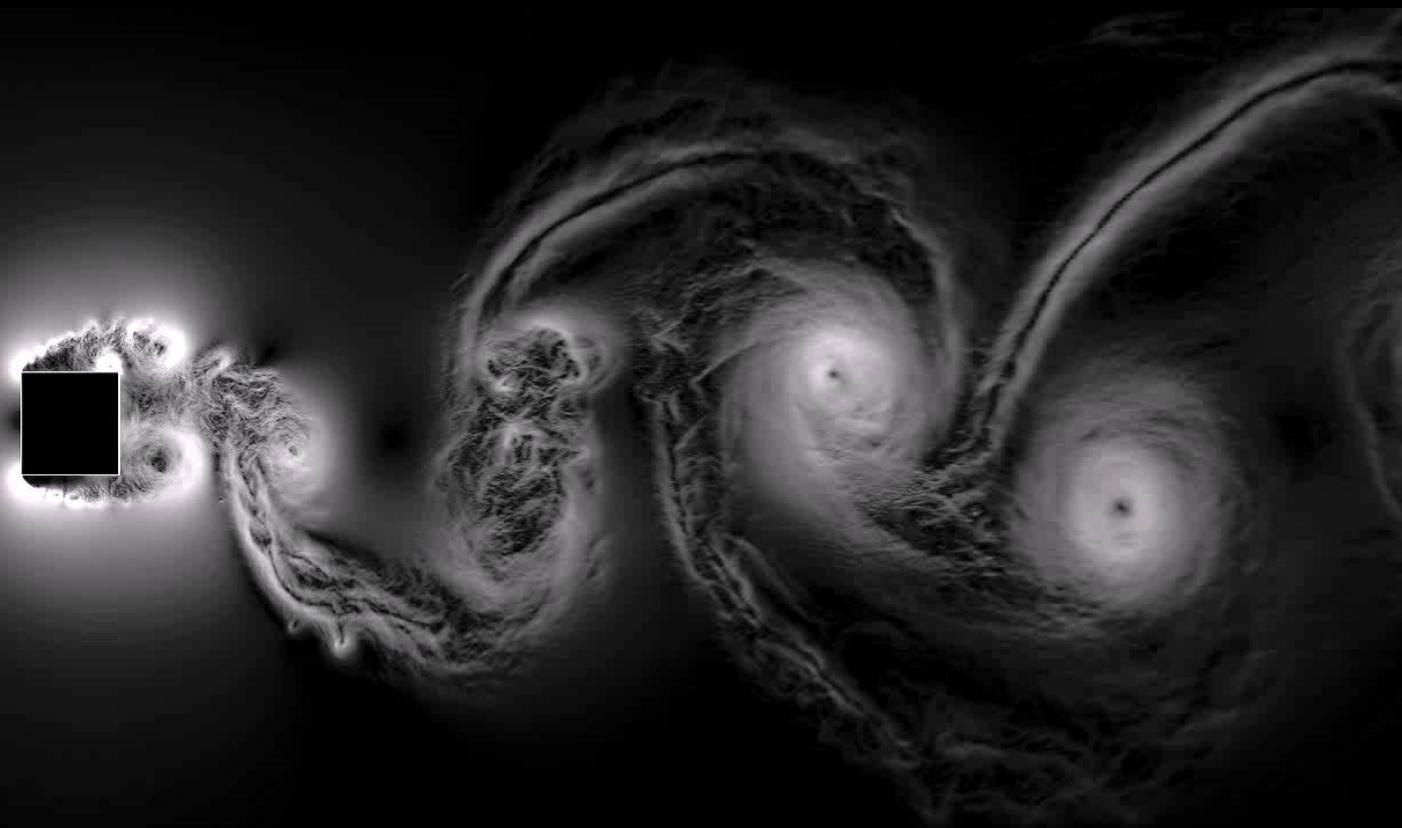
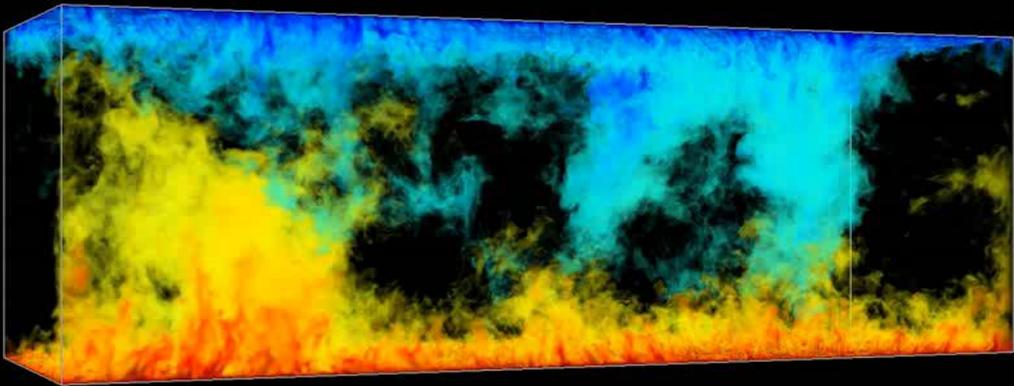
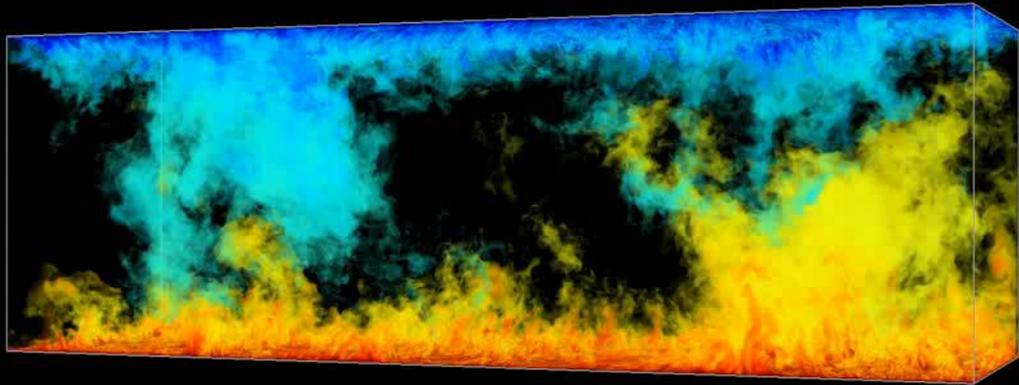


Вихреразрешающее моделирование

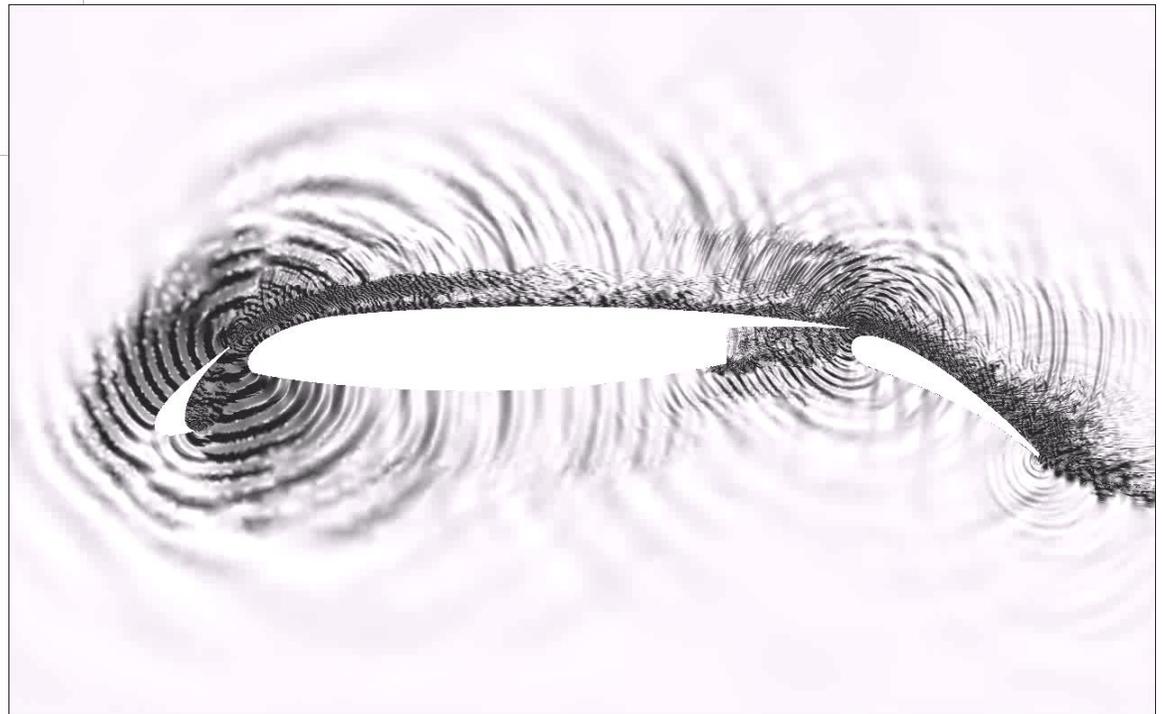
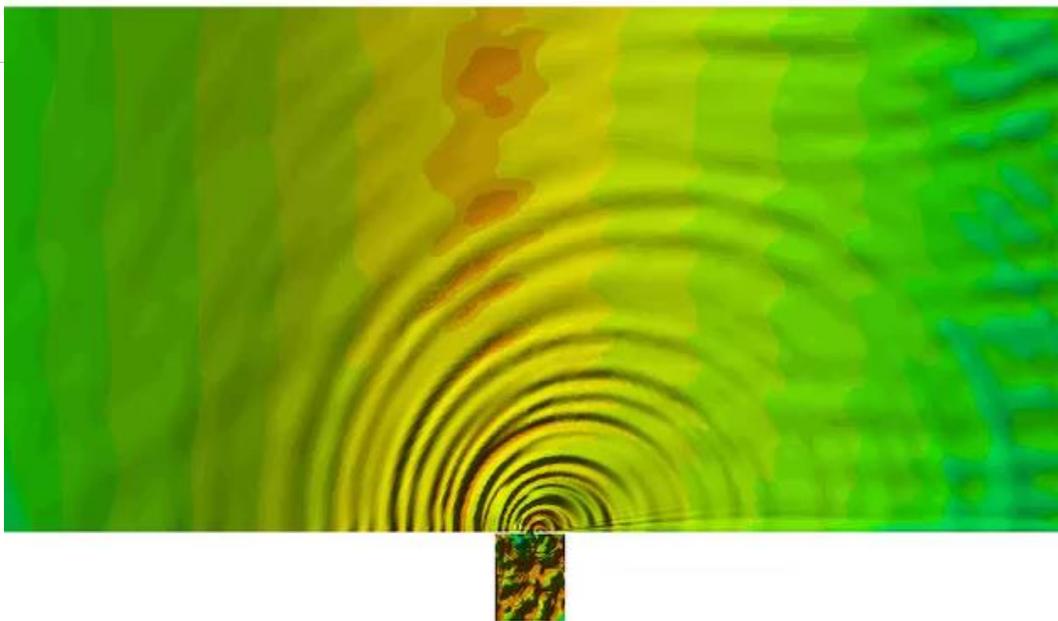
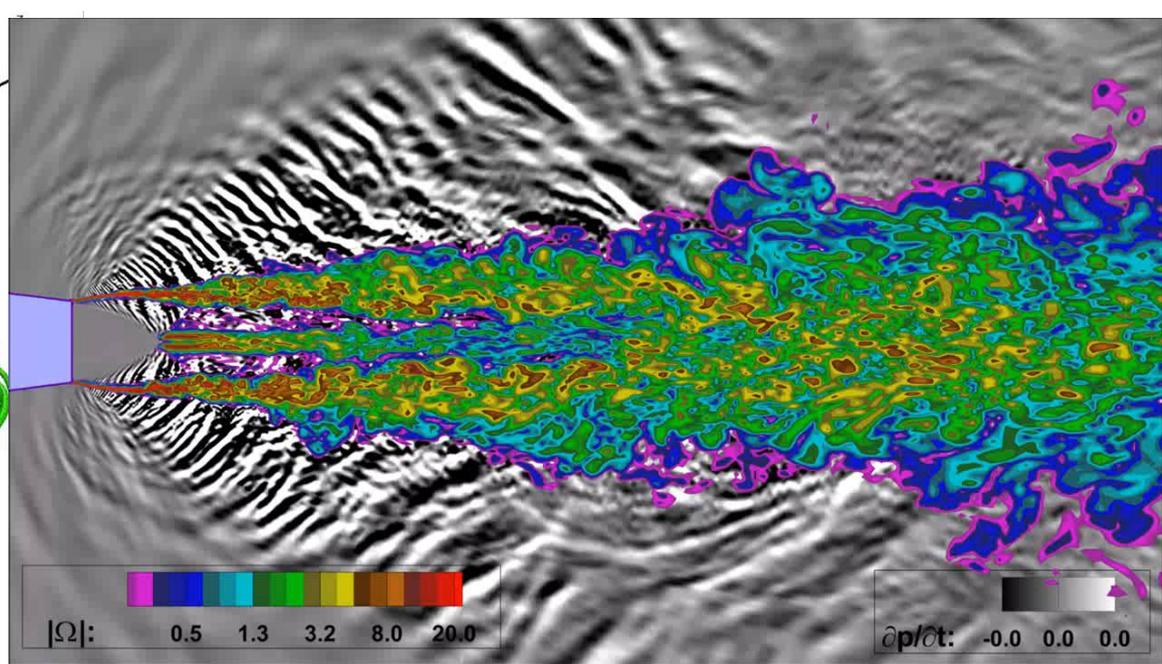
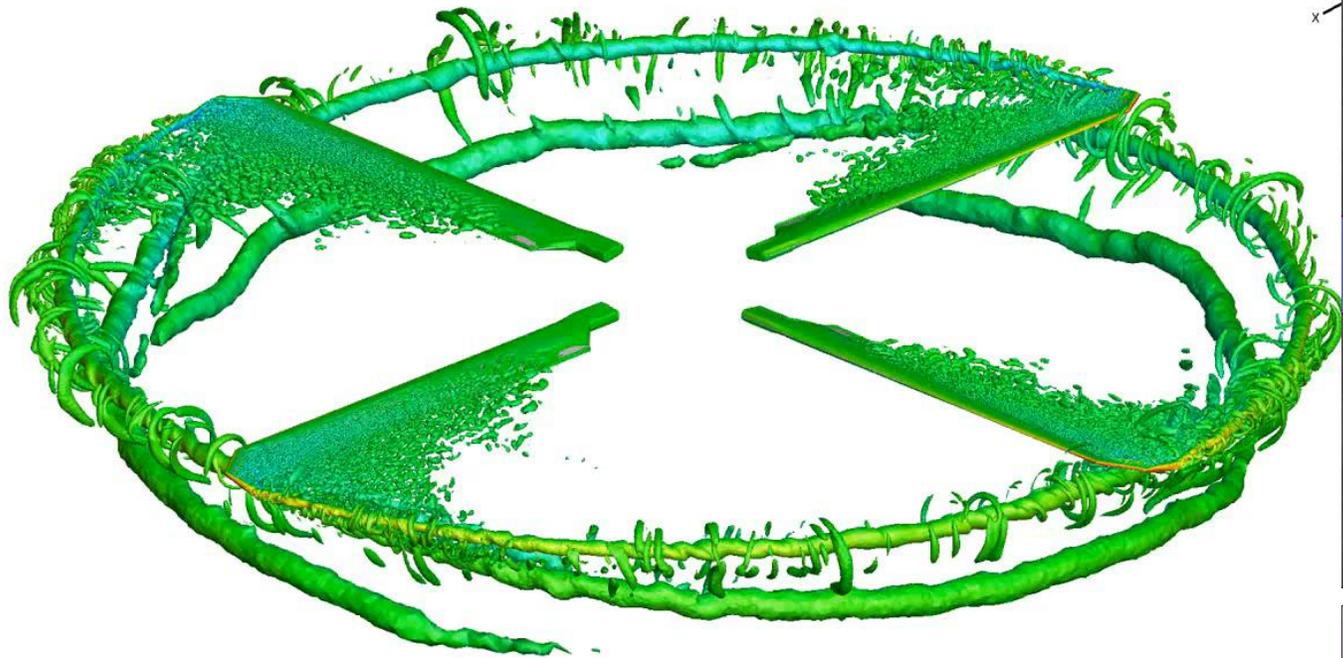
Расчеты аэродинамики и аэроакустики СПС (НЦМУ «Сверхзвук»)



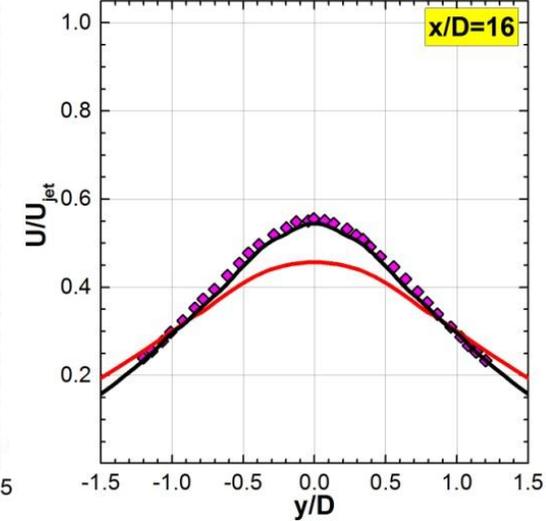
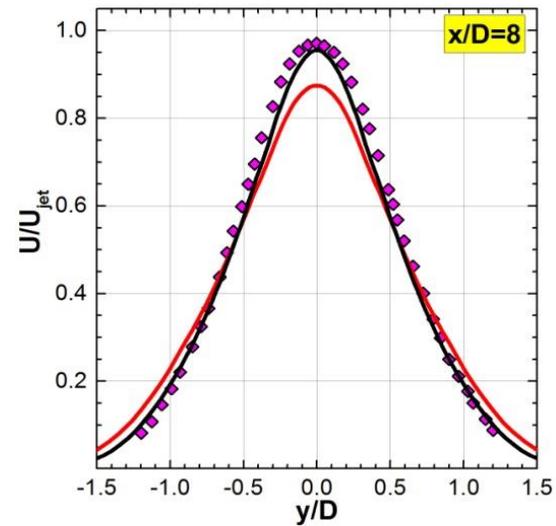
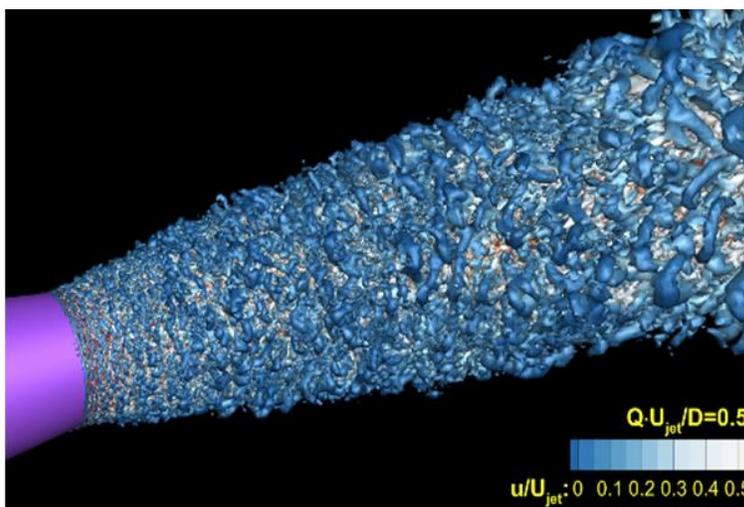
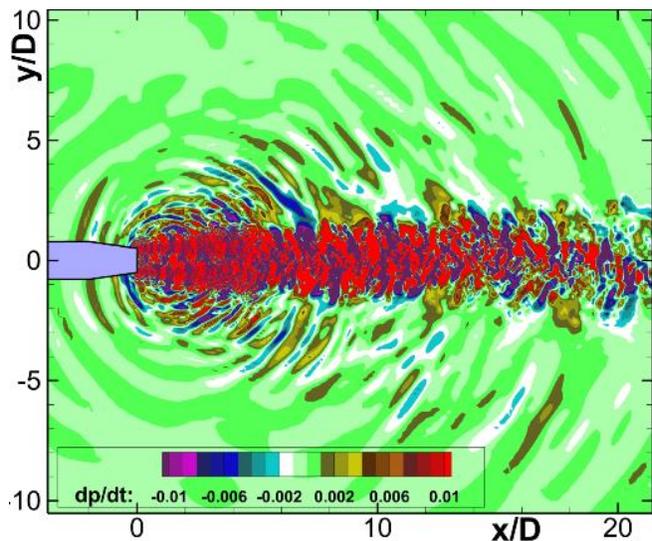
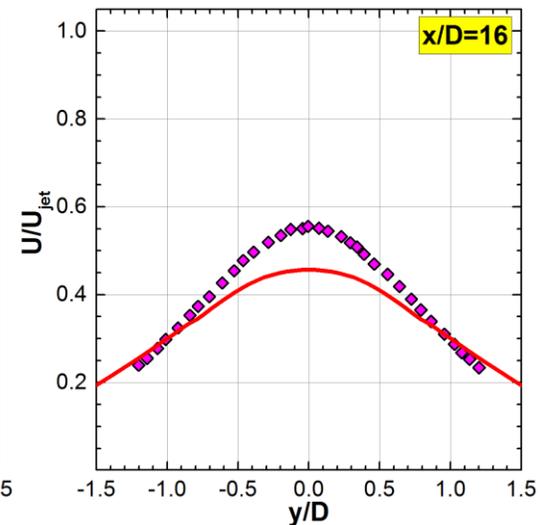
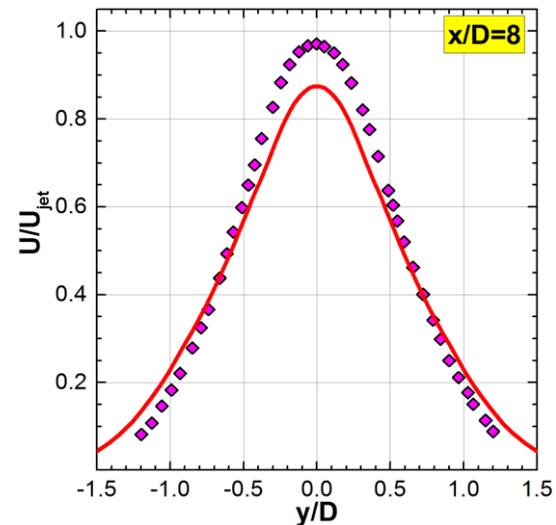
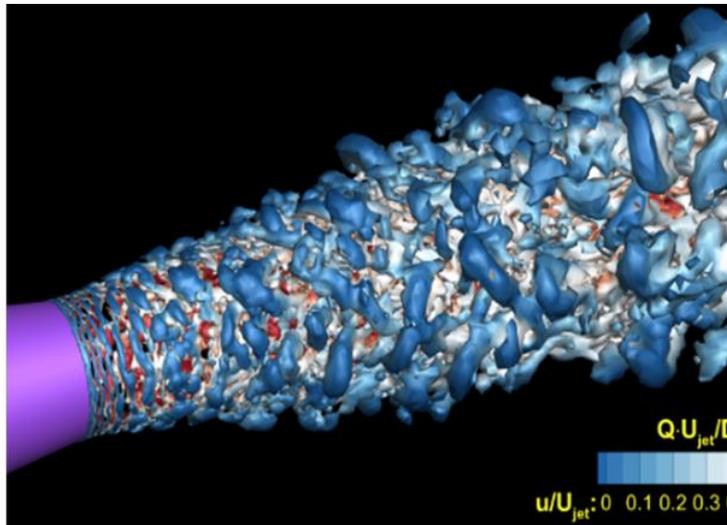
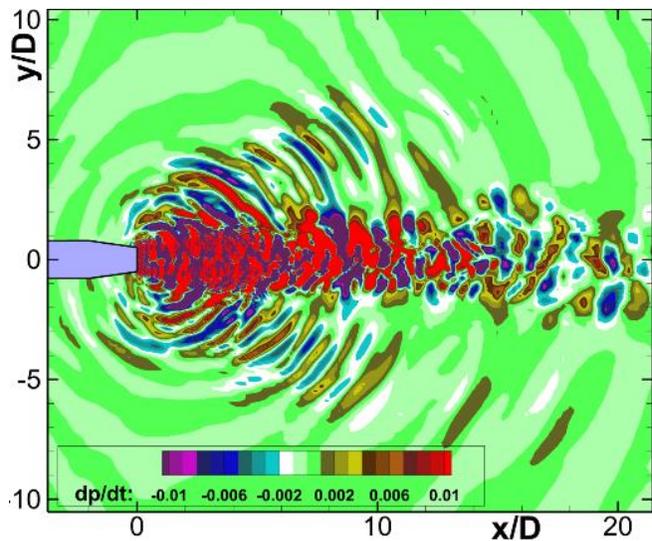
Результаты получены в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение от 25.04.2022 №_075-15-2022-330).



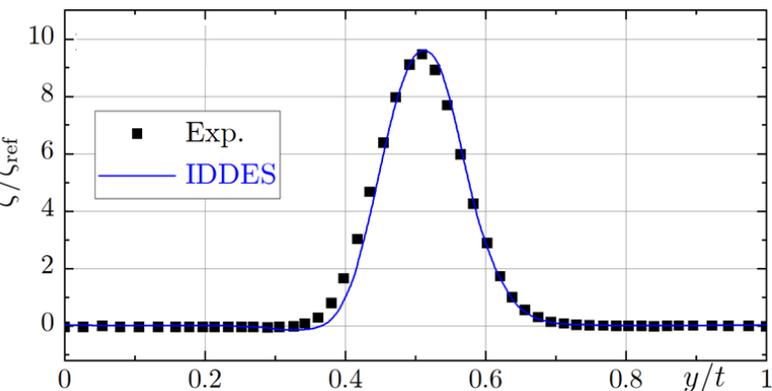
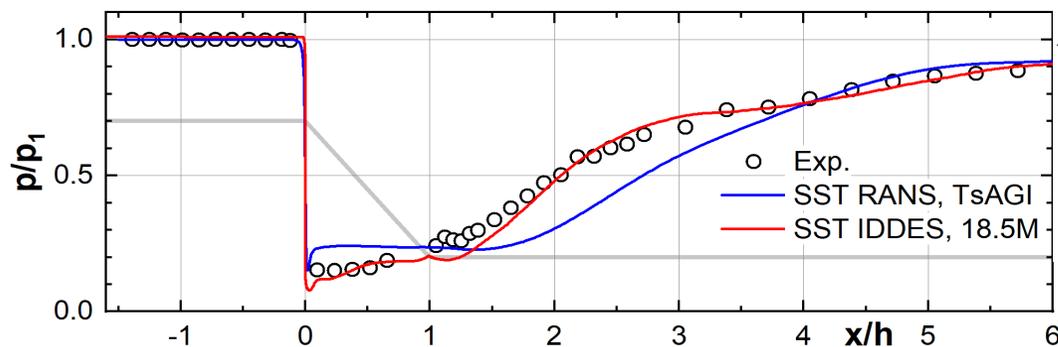
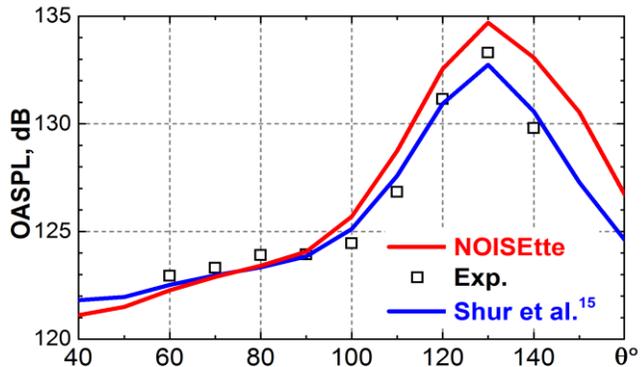
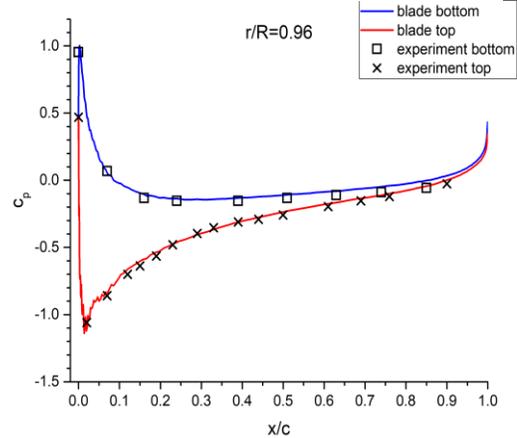
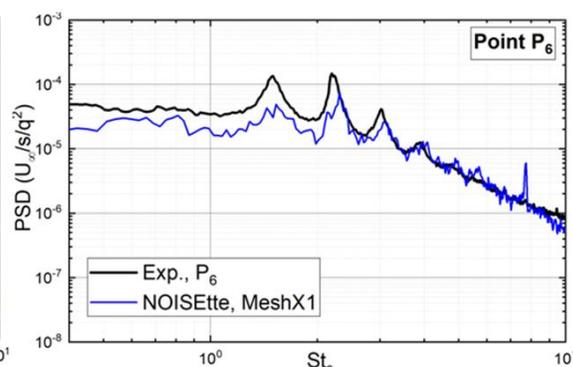
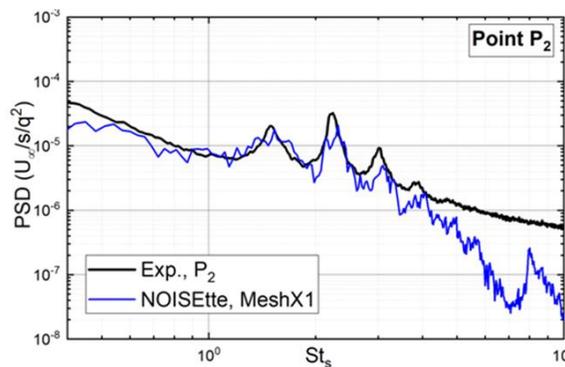
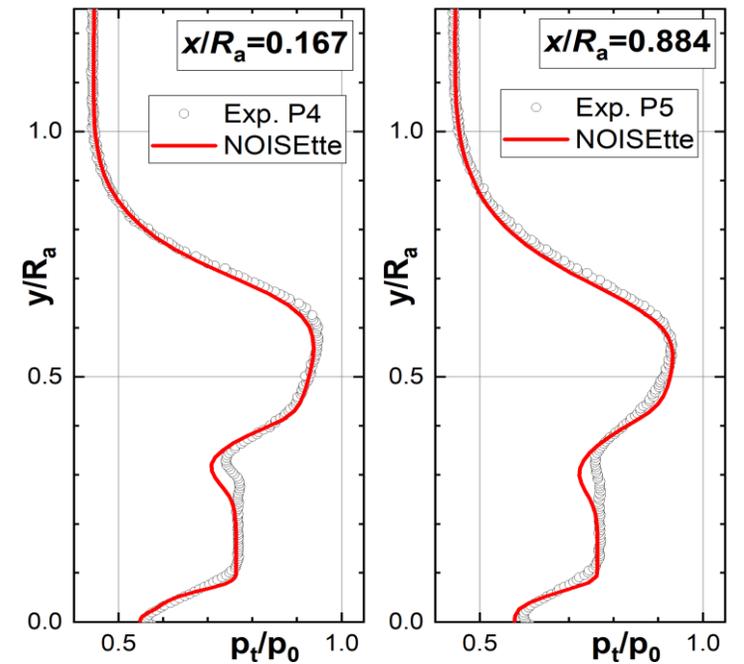
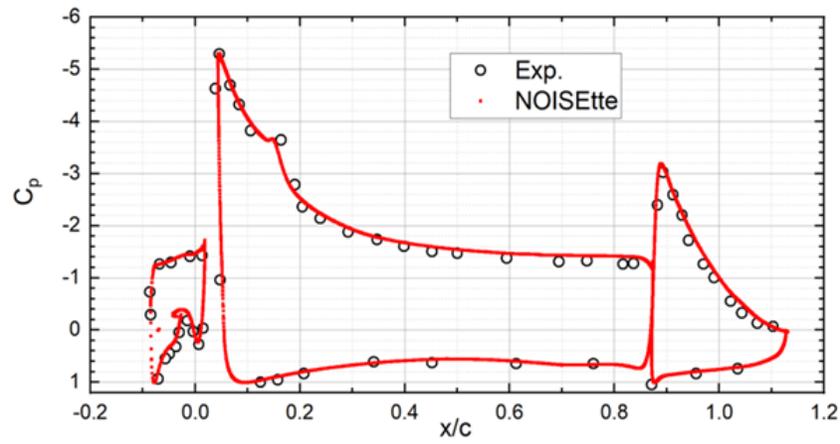
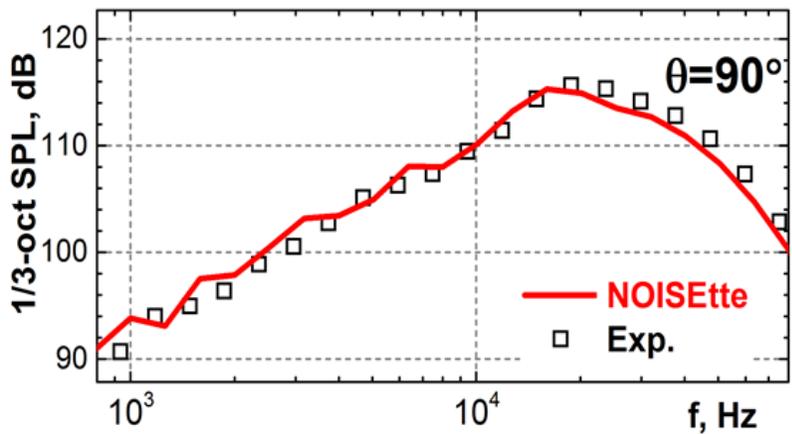
$|\nabla\rho|$: 0.4 0.6 0.8 1.1 1.5 2.1 2.9 4.1 5.7 8.0



Вихреразрешающее моделирование



Нужны точные результаты, а не цветные картинки



Математические модели и численные методы

Уравнения Навье – Стокса для вязкого сжимаемого газа

Время: неявные схемы BDF1, BDF2

Конвекция: схемы семейства EBR(+TVD,WENO)

- Сверхспособности на TC-сетках
- Упрощенный якобиан в неявной схеме
- Экономичность по памяти, вычислениям, обменам

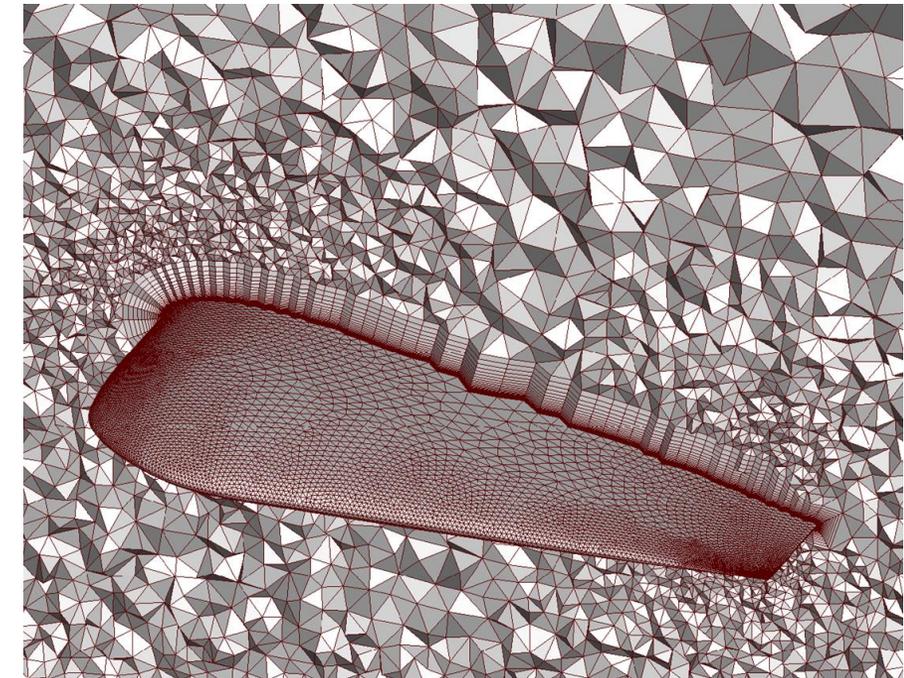
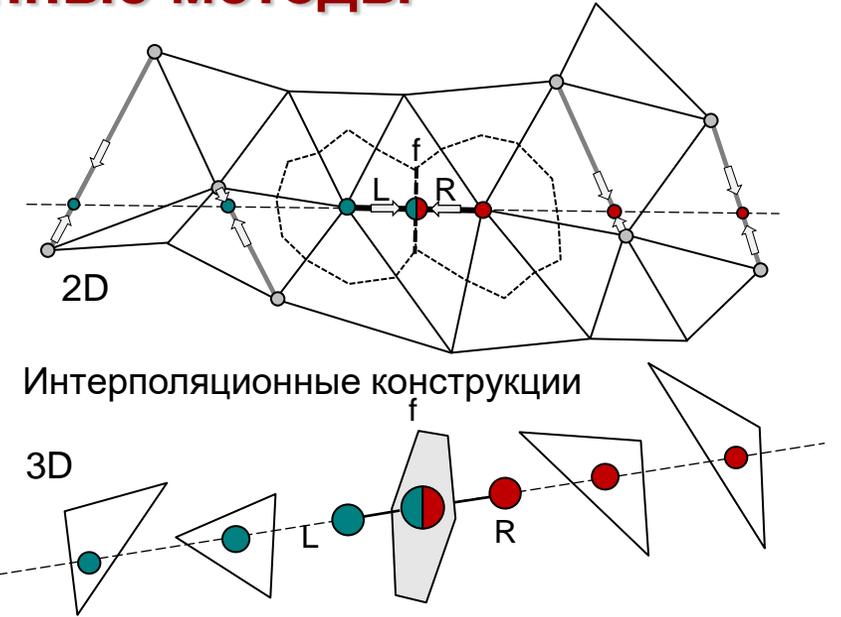
Bakhvalov P., Abalakin I., Kozubskaya T. IJNMF 81(6), 331–356, 2016.
<https://doi.org/10.1002/flid.4187>

Bakhvalov P., Kozubskaya T. CAF 157, 312–324, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.09.004>

Вязкость: метод локальных разбиений AES

- линейный, совпадает с P1 Галёркиным на тетрах
- на декартовых сетках для лапласиана 7-точечная схема, а у Галёркина 27-точечный шаблон
- важно для GPU - в якобиане можно только смежность по ребрам

Bakhvalov P., Surnachev M. JCP 450, 110819, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110819>



Схемы повышенной точности

Базовая схема 1 порядка

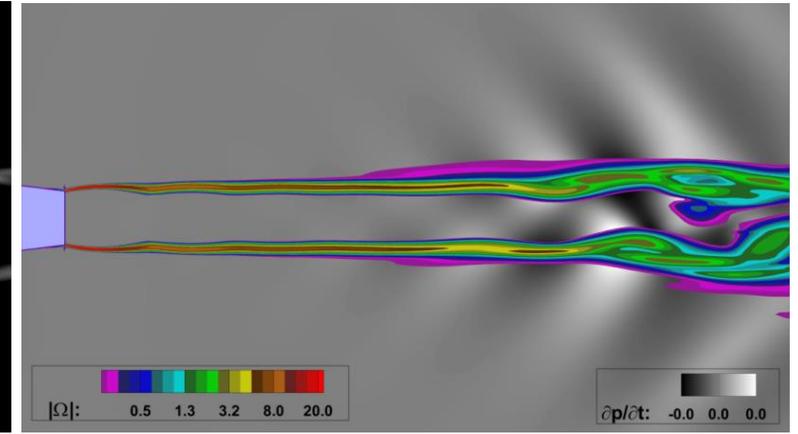
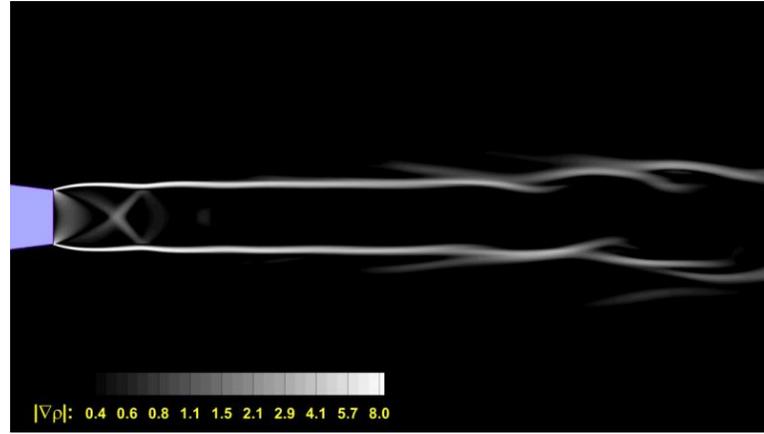
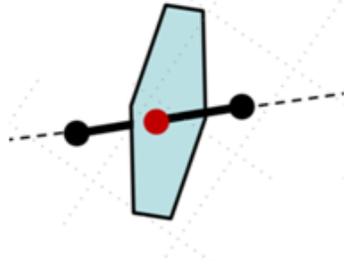


Схема EBR3-WENO

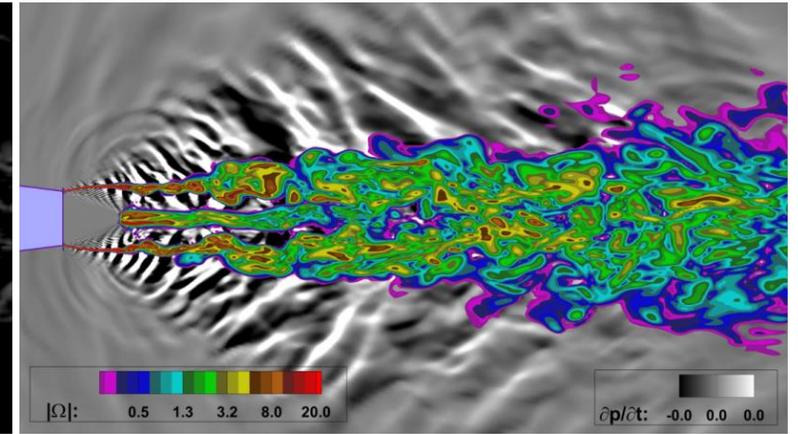
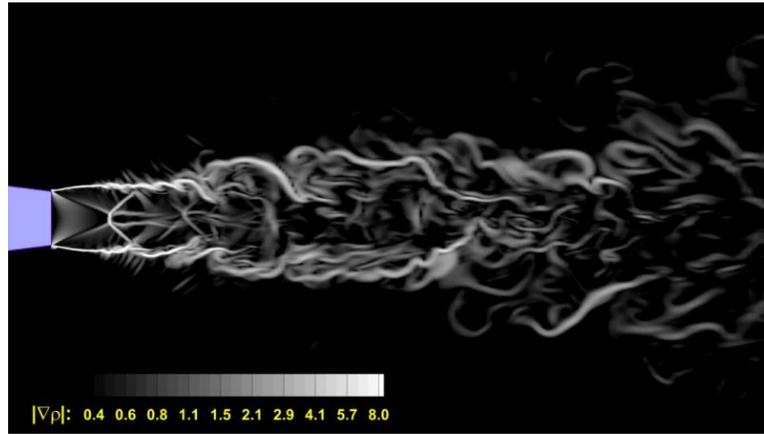
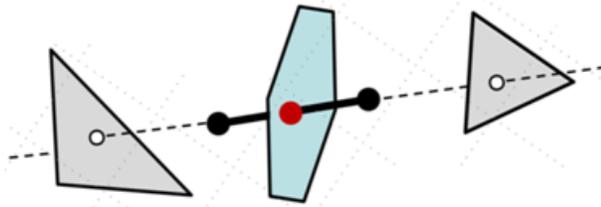
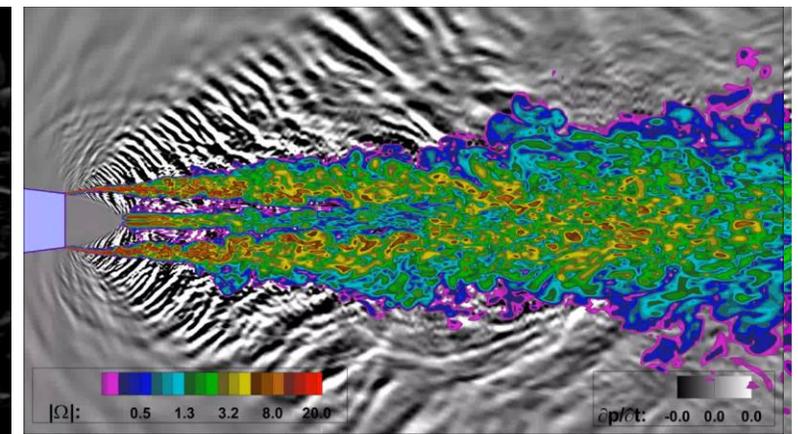
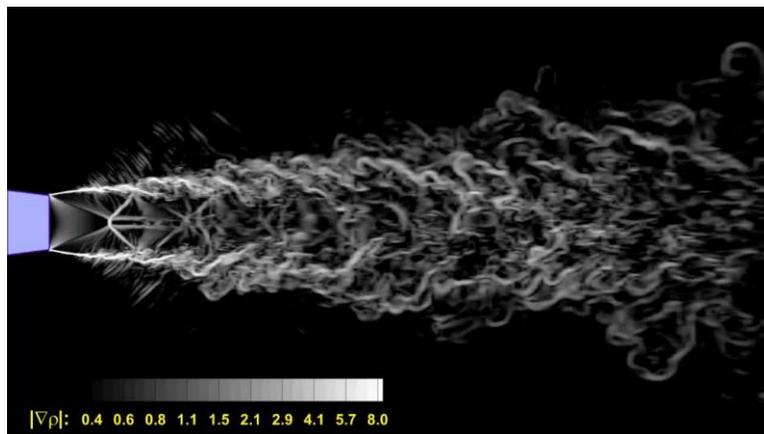
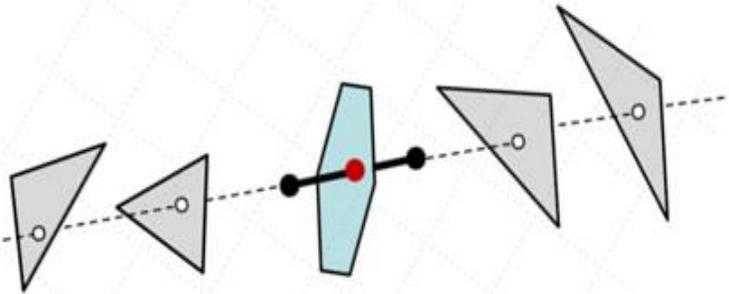


Схема EBR5-WENO



Моделирование турбулентности

- Прямое численное моделирование DNS

СТОИМОСТЬ 

- Моделирование крупных вихрей LES

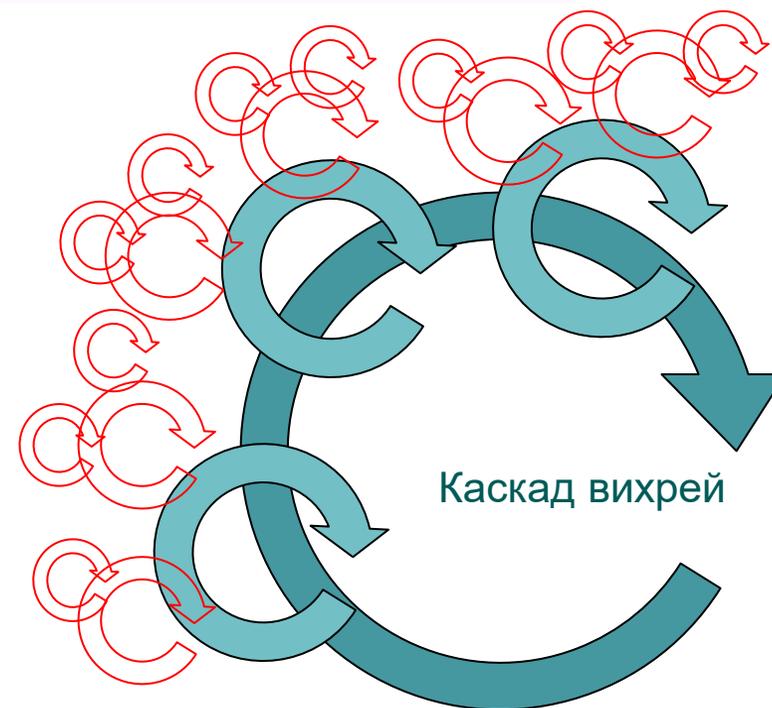
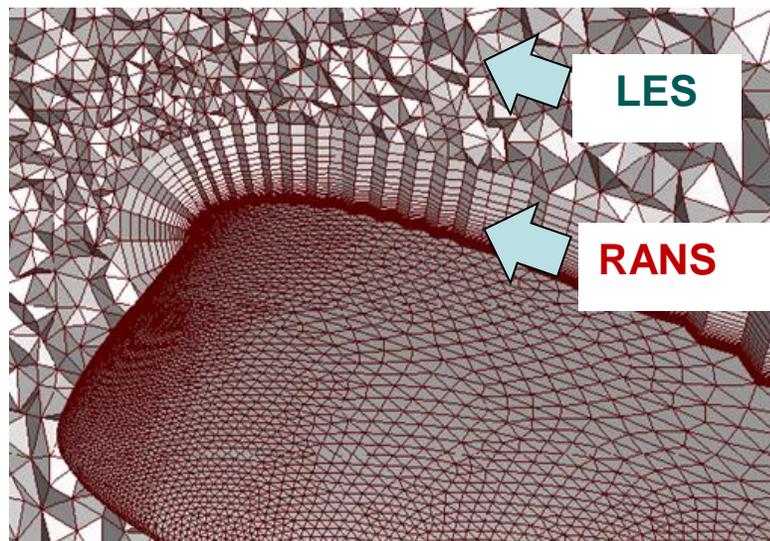
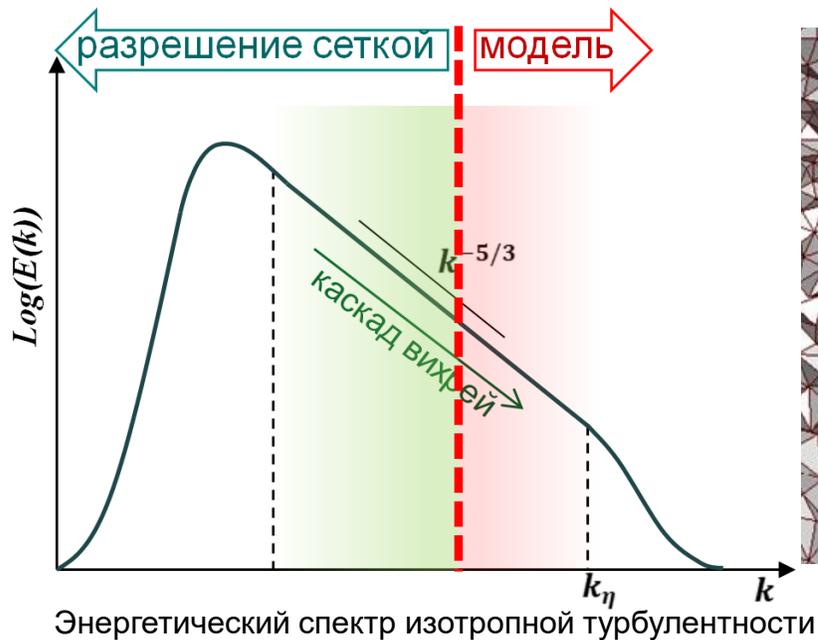
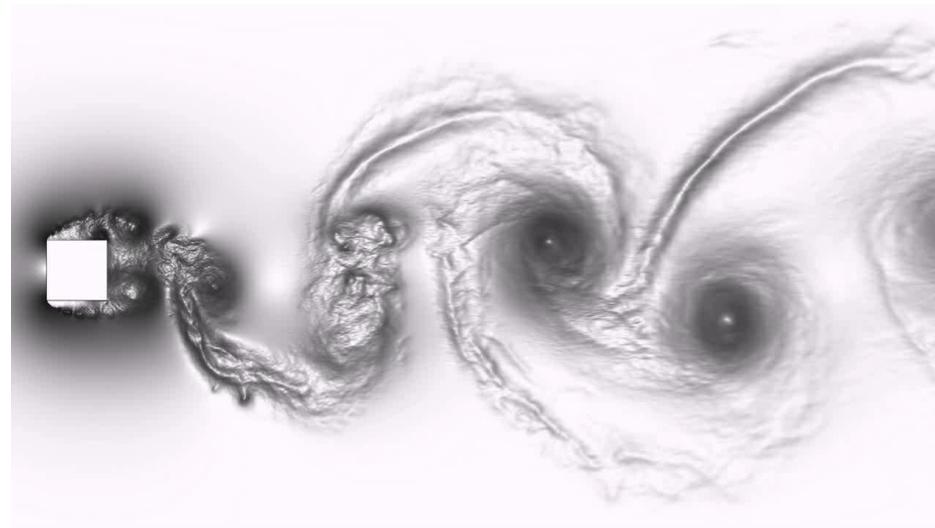
СТОИМОСТЬ 

- RANS – осредненные уравнения Н-С

СТОИМОСТЬ 

- RANS-LES гибридные подходы (DES)

СТОИМОСТЬ 



Моделирование турбулентности

Турбулентность: гибридные RANS-LES методы семейства DES с GAM свойствами

- **DES, DDES, IDDES**

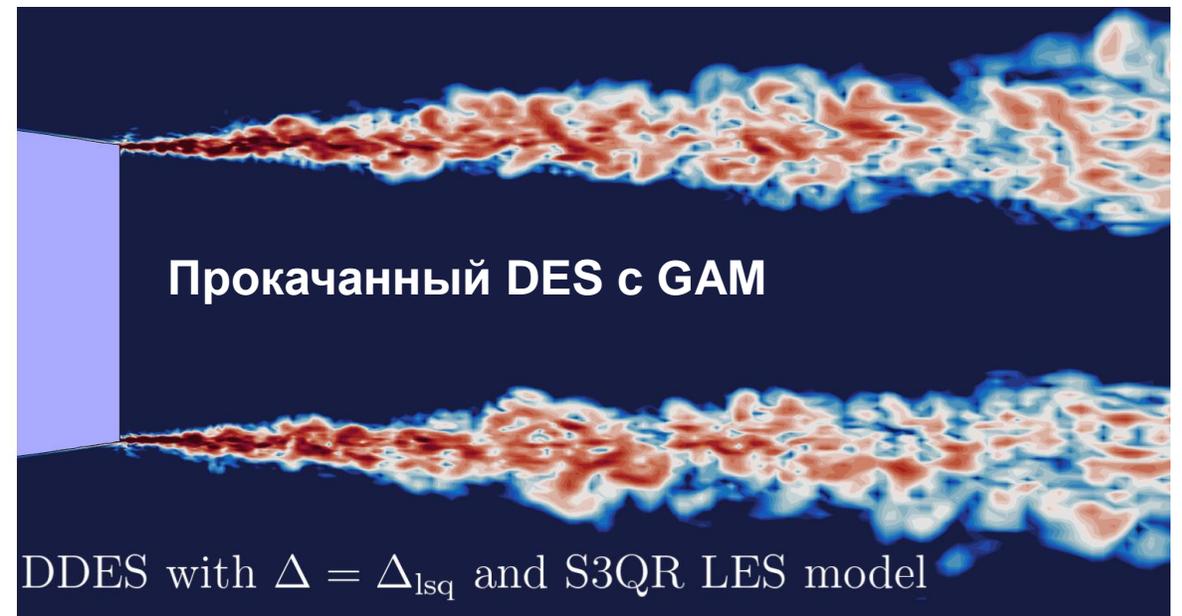
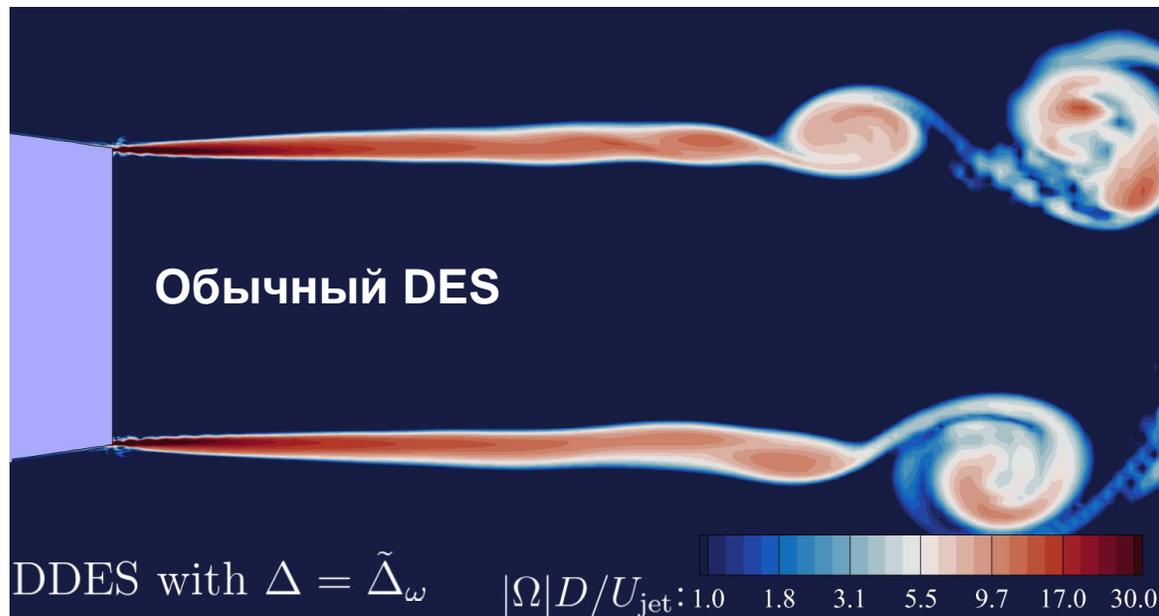
M. Shur, P. Spalart, M. Strelets, A. Travin. FTAC. 95 (2015) 709 – 737. <https://doi.org/10.1007/s10494-015-9618-0>

- **LES модели семейства S3**

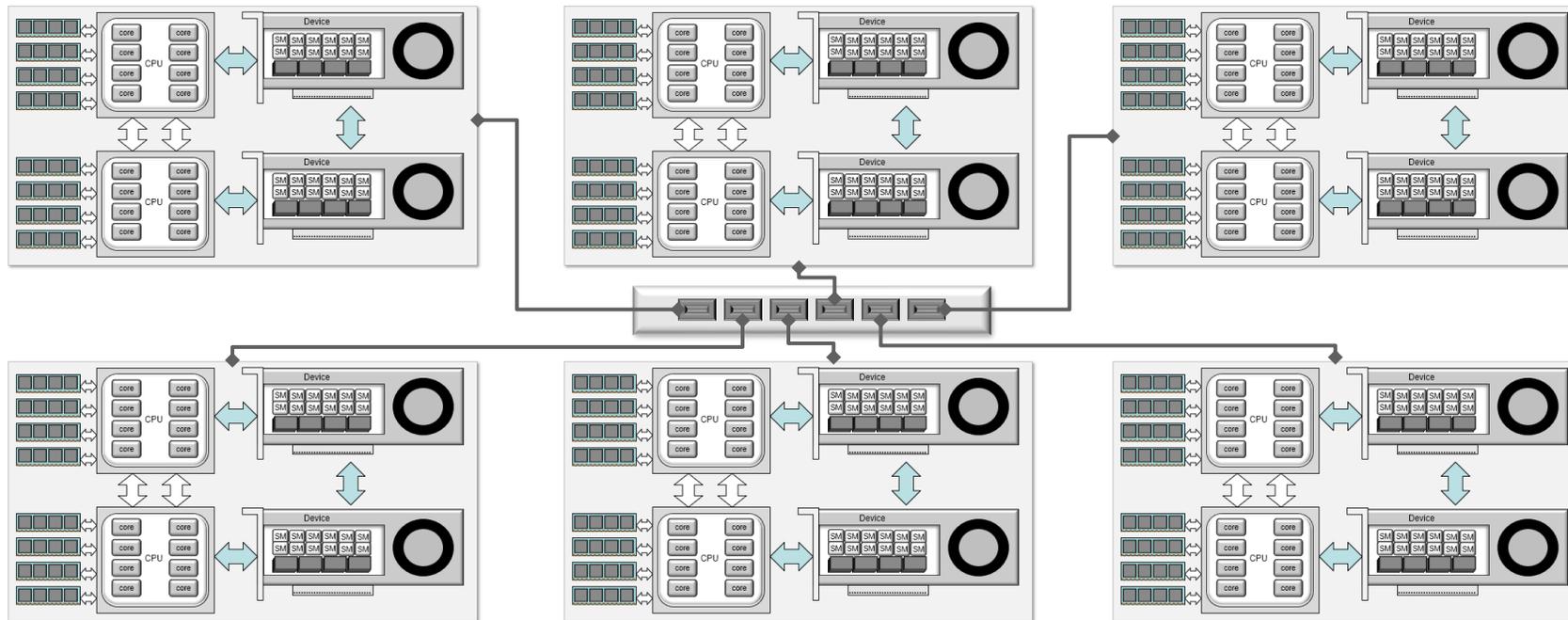
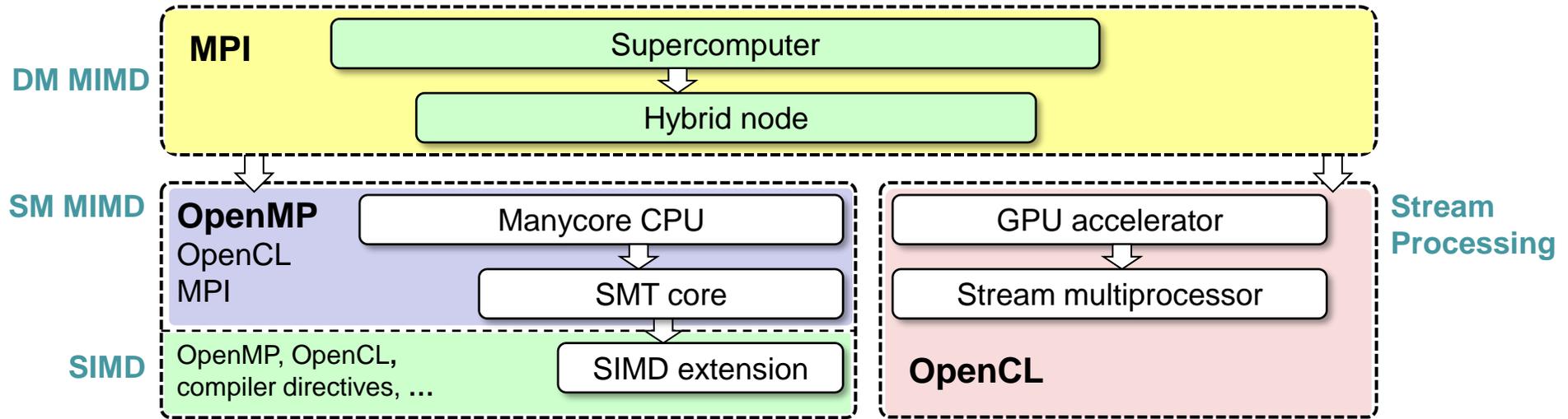
F. X. Trias, D. Folch, A. Gorobets, A. Oliva. Physics of Fluids 27 (2015) 065103. <https://doi.org/10.1063/1.4921817>

- **Подсеточный масштаб Delta-LSQ**

F.X.Trias, A.Gorobets, et.al. Physics of Fluids. 29 (2017) 115109 <https://doi.org/10.1063/1.5012546>



Параллельные технологии



Многоуровневая декомпозиция

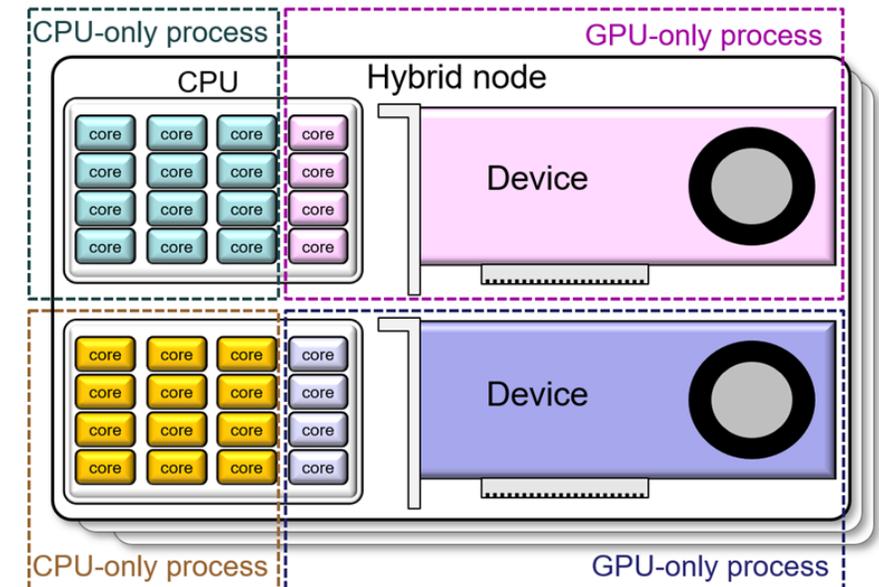
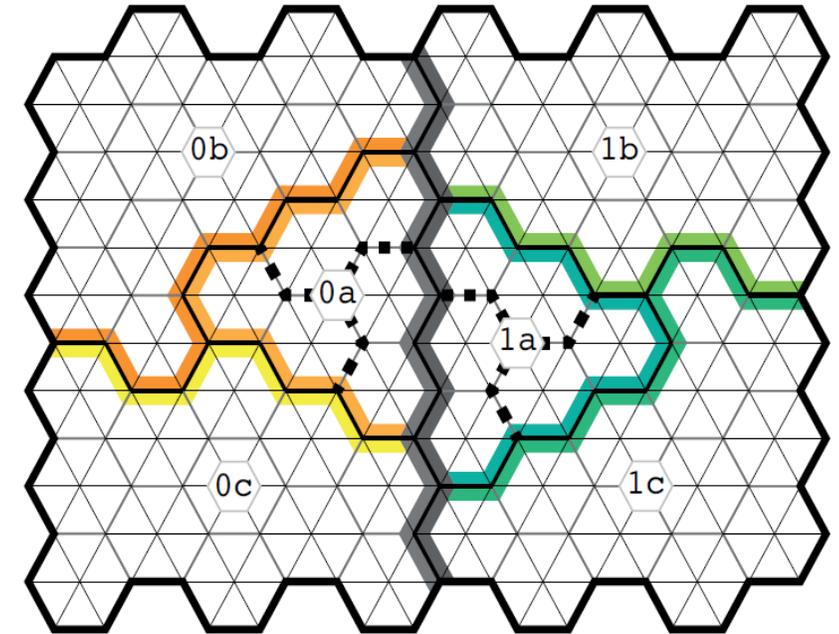
- **MPI:** декомпозиция сетки по узлам кластера
- **MPI:** декомпозиция внутри узлов – по CPU и GPU
- **OpenMP:** декомпозиция по потокам

- Переупорядочивание сеточных объектов
- Affinity и NUMA

EBR5, неявная BDF2, IDDES, сетка >1M узлов

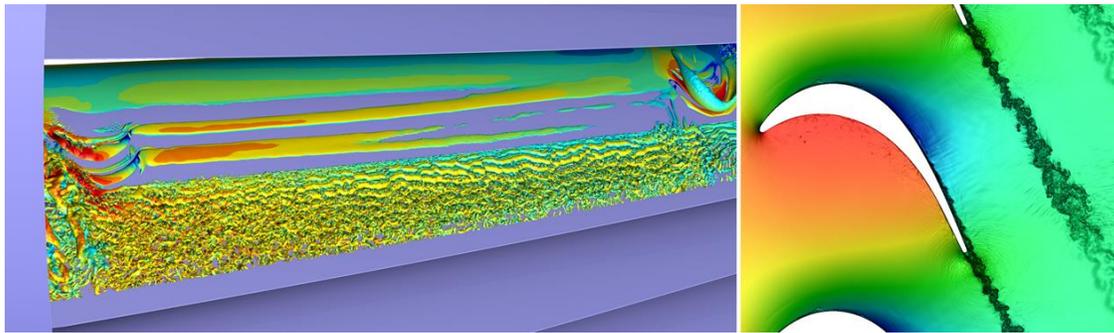
Intel Xeon	Ядер	Ускорение
2 x Gold 5218	32	30
Phi 7250	68	92

- **OpenCL:** потоковая обработка на GPU
- **Гетерогенные вычисления на CPU и GPU**
 - Сокращение обменов за вычислениями



Параллельная эффективность и производительность

EBR5, BDF2 (BiCGSTAB), IDDES, FP64/32, сетка 80M



K60-GPU:

2 x16C CPU

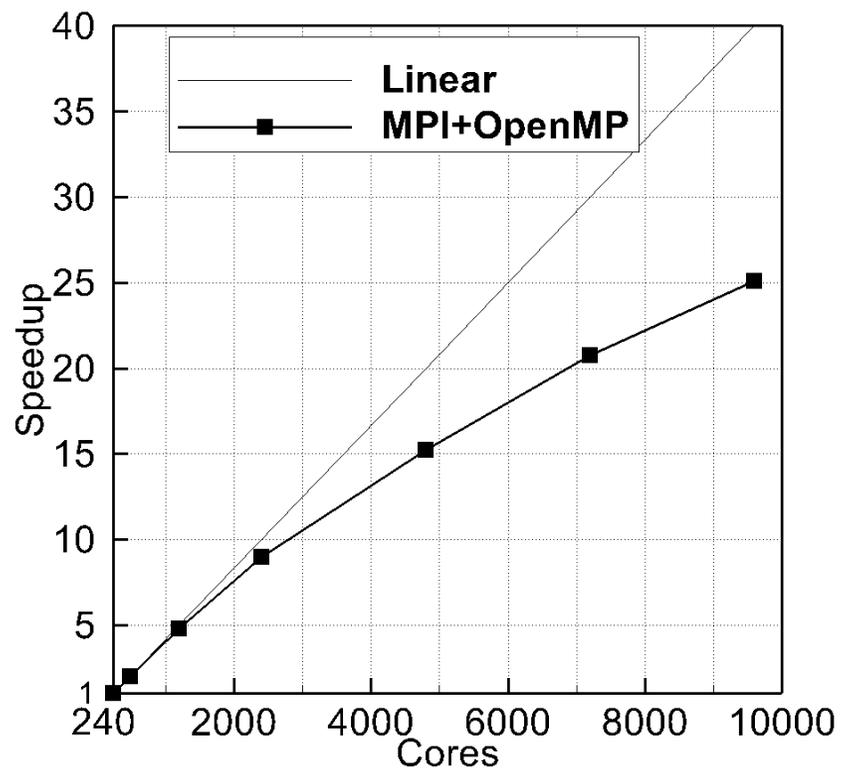
Intel Xeon **Gold 6142** (120 GB/s)

4 x GPU

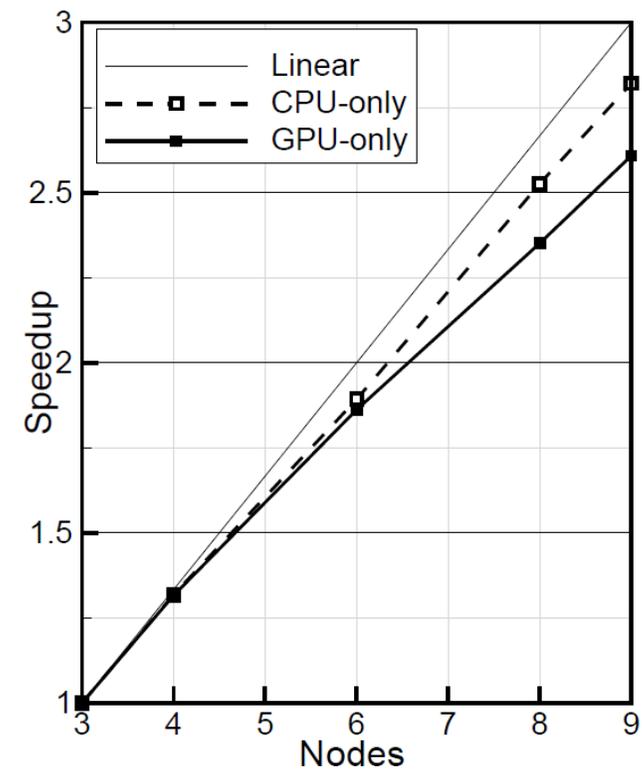
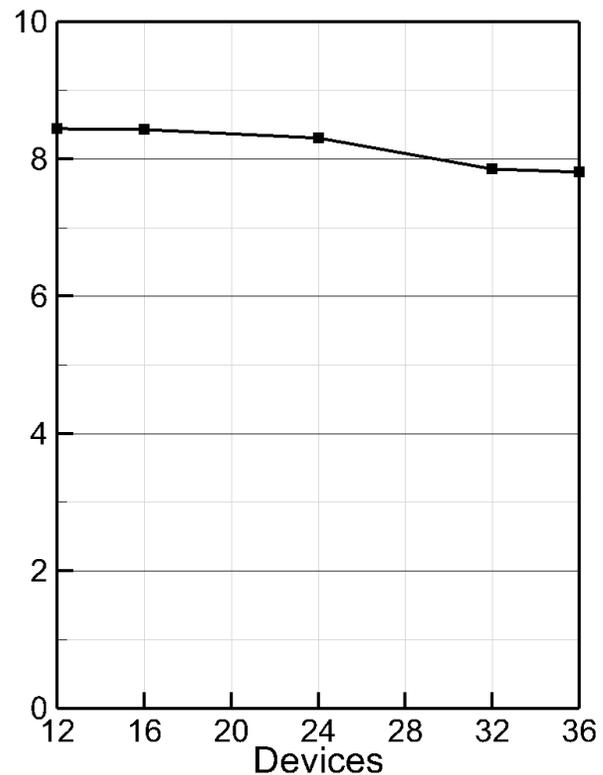
NVIDIA **V100** (32 GB, 900GB/s)



CPU: 2xCPU 24C Intel Xeon 8160



GPU vs 16-core CPU



Гетерогенный режим CPU + GPU

Численная конфигурация: EBR5, BDF2, IDDES

Параллельная конфигурация: MPI+OpenMP+OpenCL, NT=14/4

Сетка: 12M узлов (обтекание круглого цилиндра)

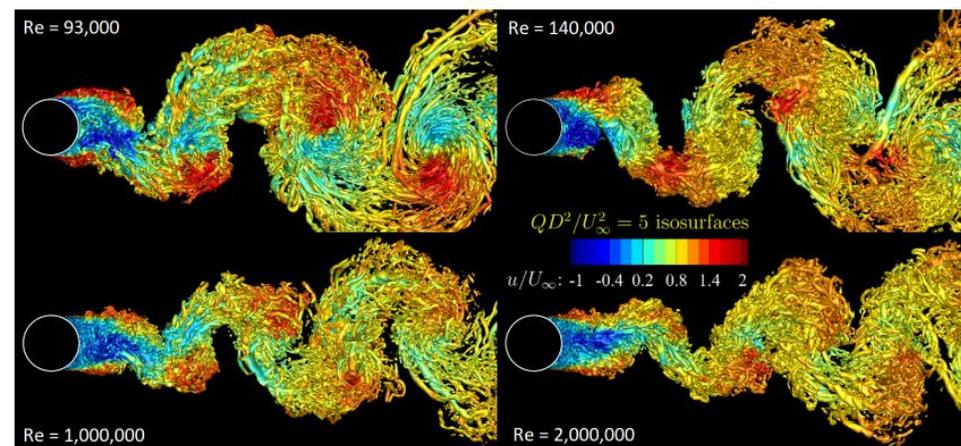
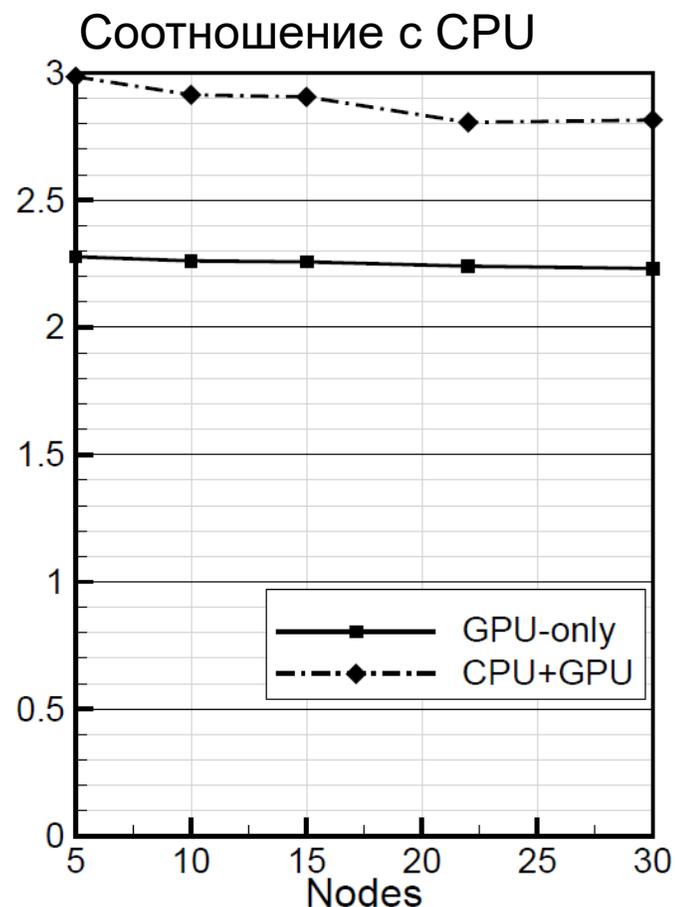
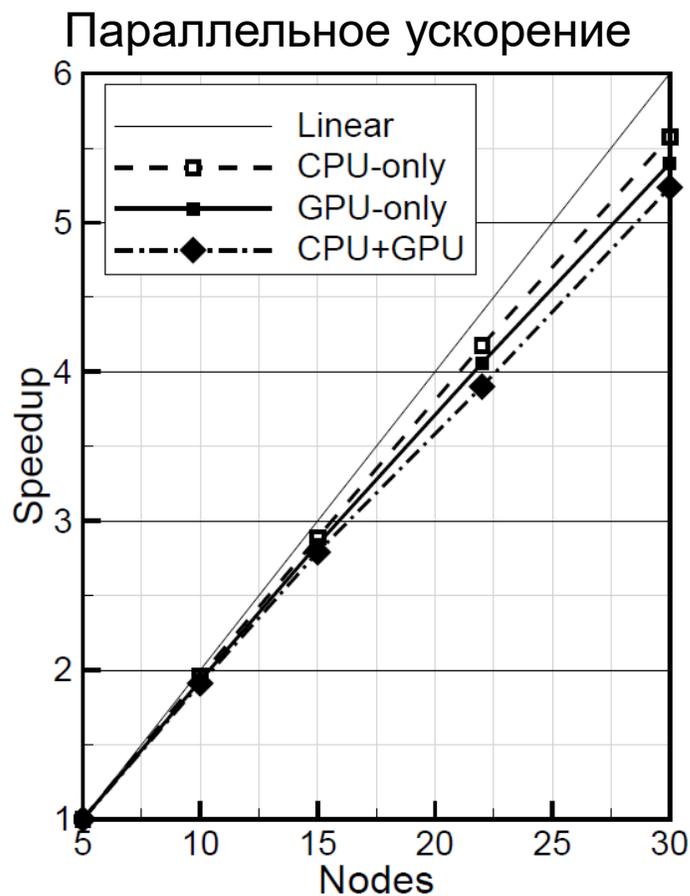


Lomonosov-2

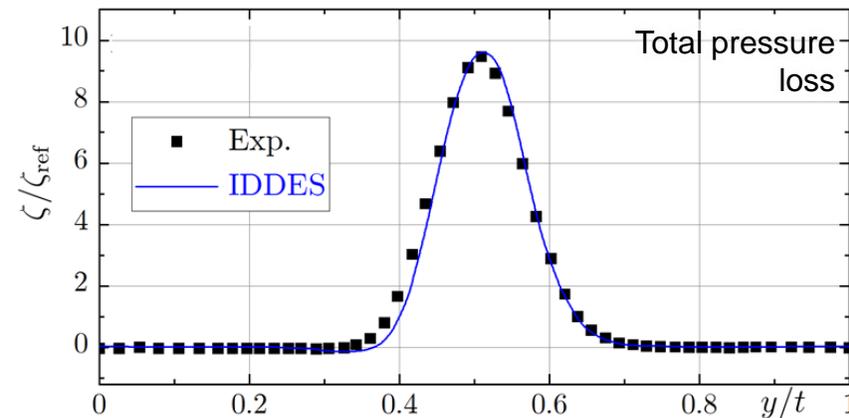
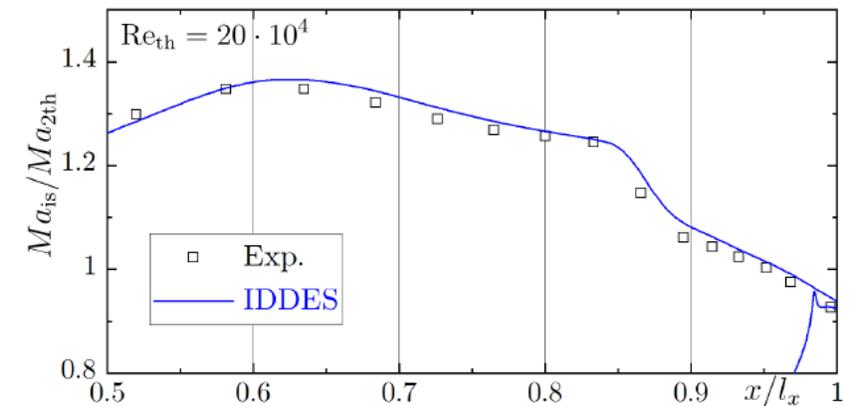
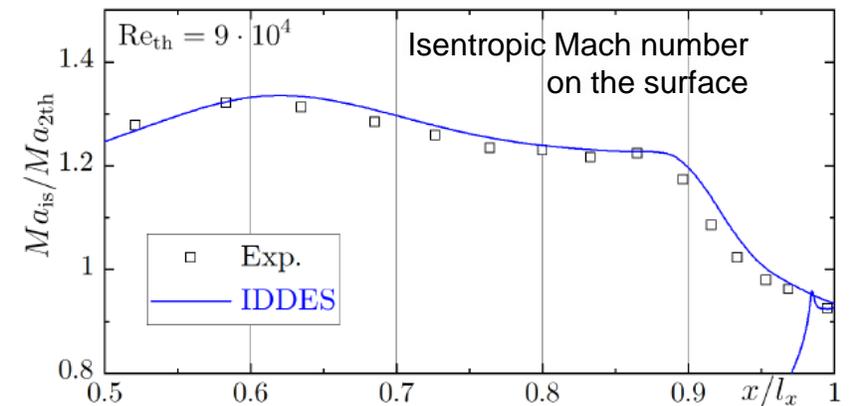
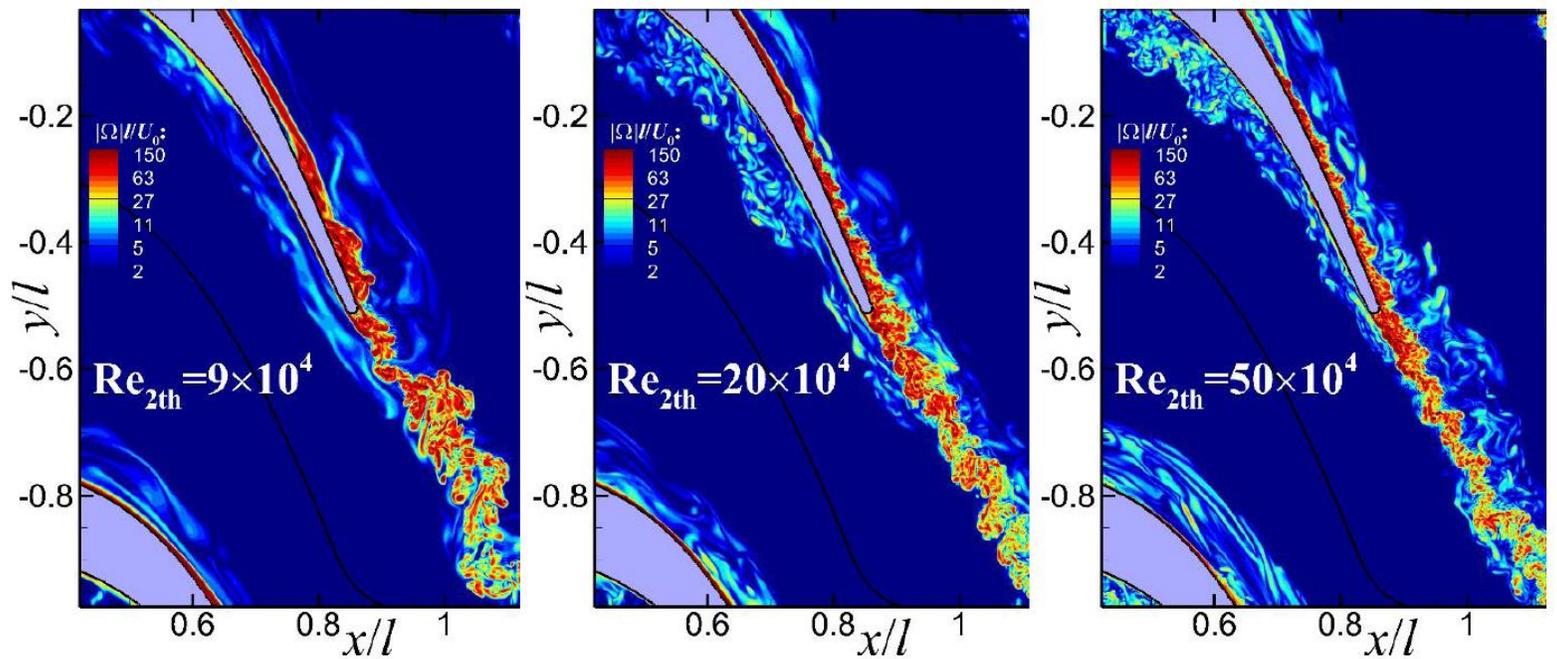
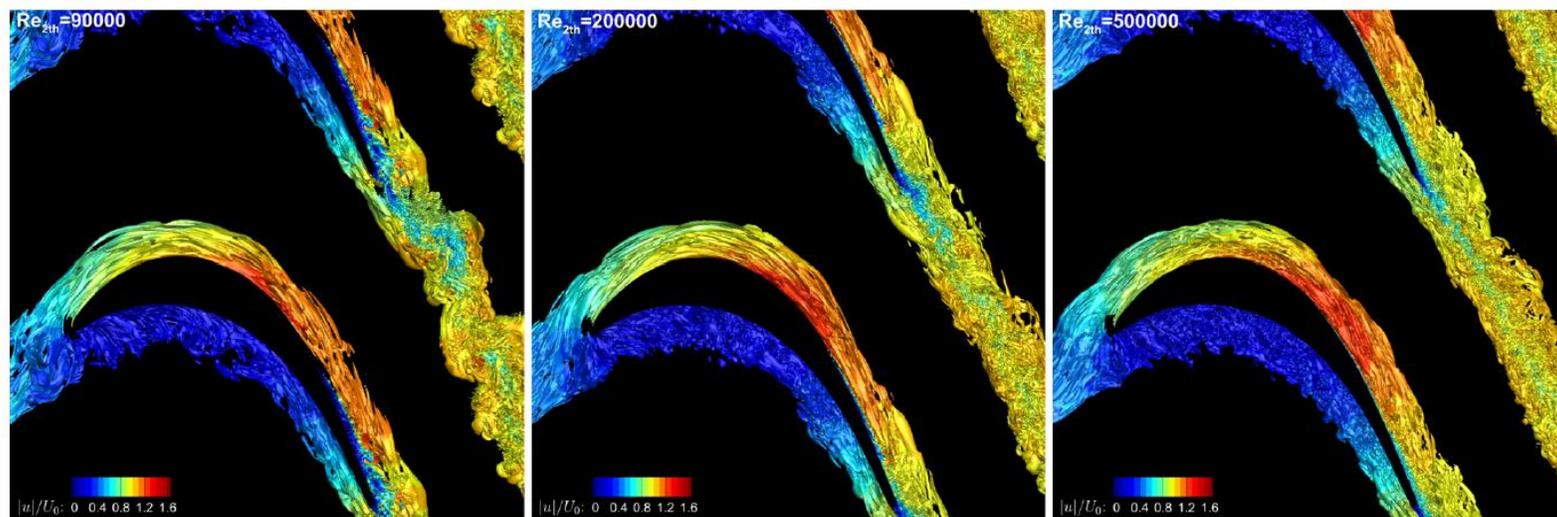
14C Intel Xeon E5-2697v3 & NVIDIA K40

Умеренное соотношение GPU vs CPU 2:1

<http://hpc.msu.ru/node/159>



Высокоточное вихреразрешающее моделирование



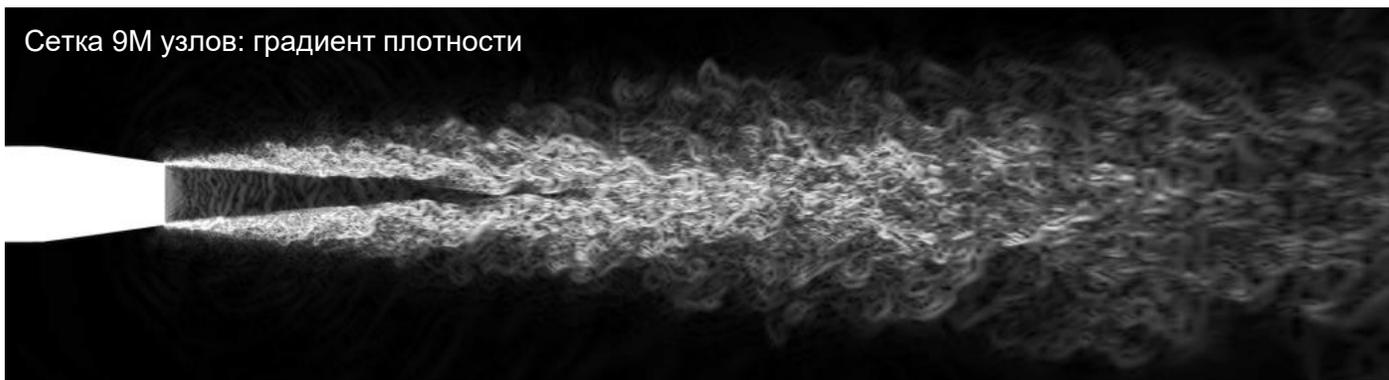
Высокоточное вихреразрешающее моделирование

Исследование GAM свойств разных конфигураций DES дозвуковая струя, $M=0.9$, $Re=1.1E6$, сетки 1.5M – 24M узлов
 LES: Smag., σ , WALE, S3QR; SGS: SLA, LSQ, ϖ , ω

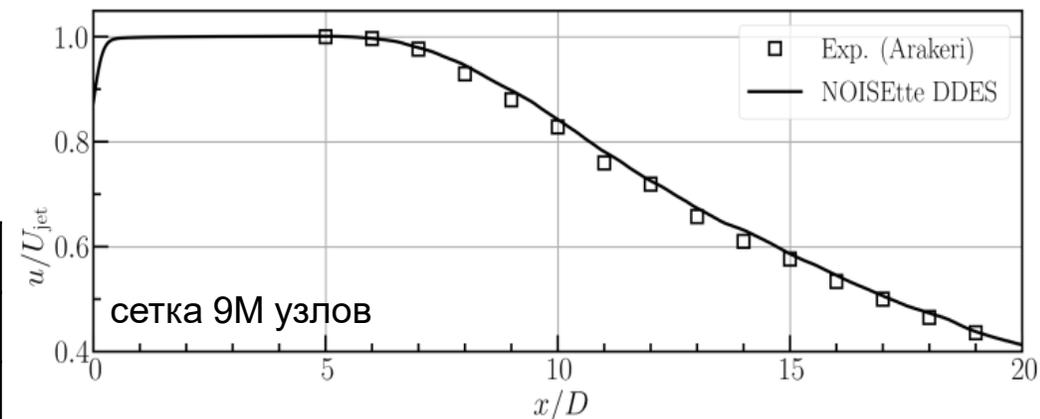
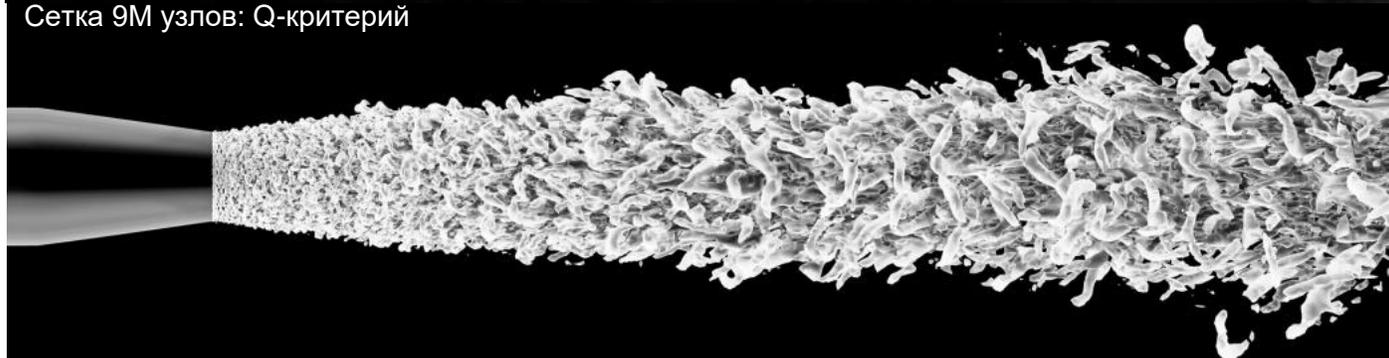
Время расчета 350 временных единиц (D/U)

Код	Матчасть	Время, ч
OpenFOAM	2 x 24C Intel Xeon 8160	80
NOISEtte	2 x 24C Intel Xeon 8160	42
NOISEtte	2 x GPU NVIDIA V100	6.3

Сетка 9M узлов: градиент плотности

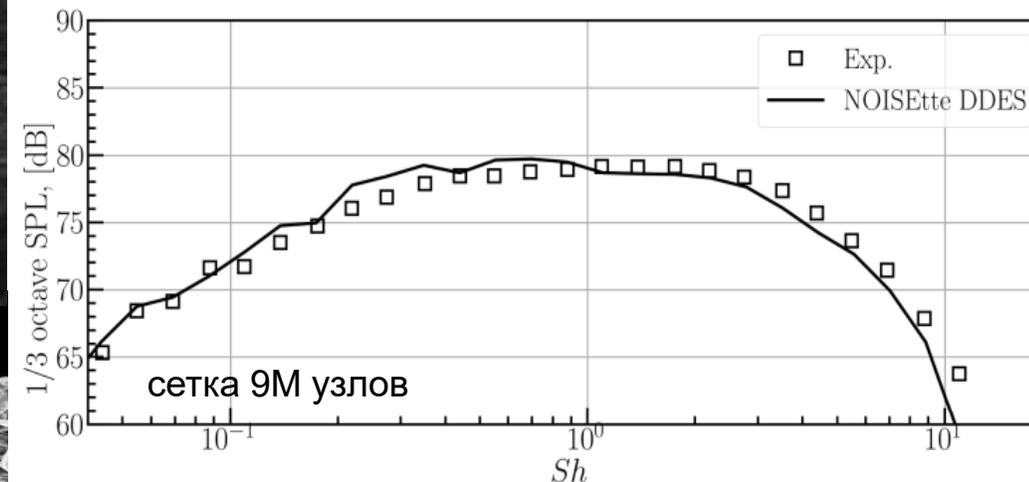


Сетка 9M узлов: Q-критерий



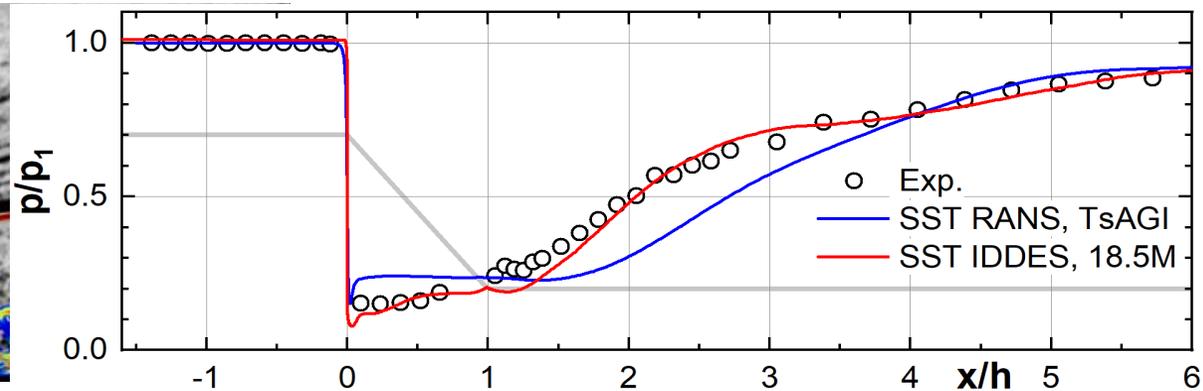
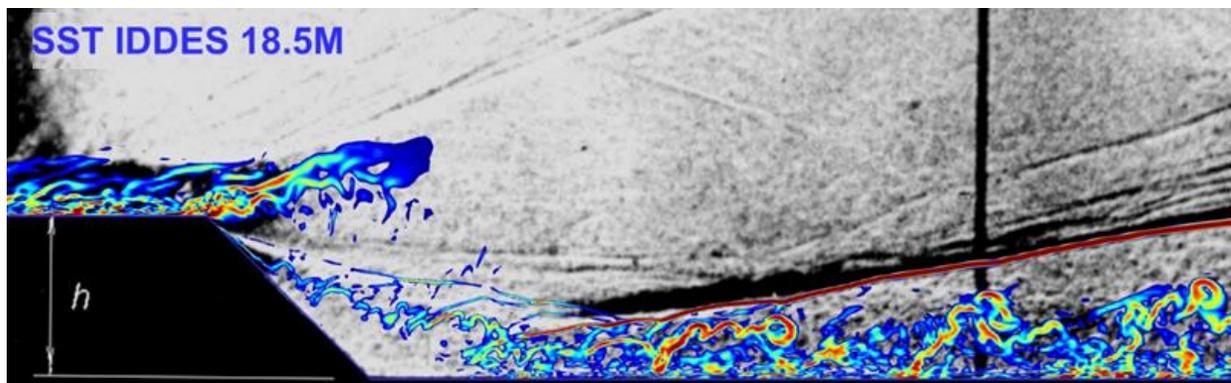
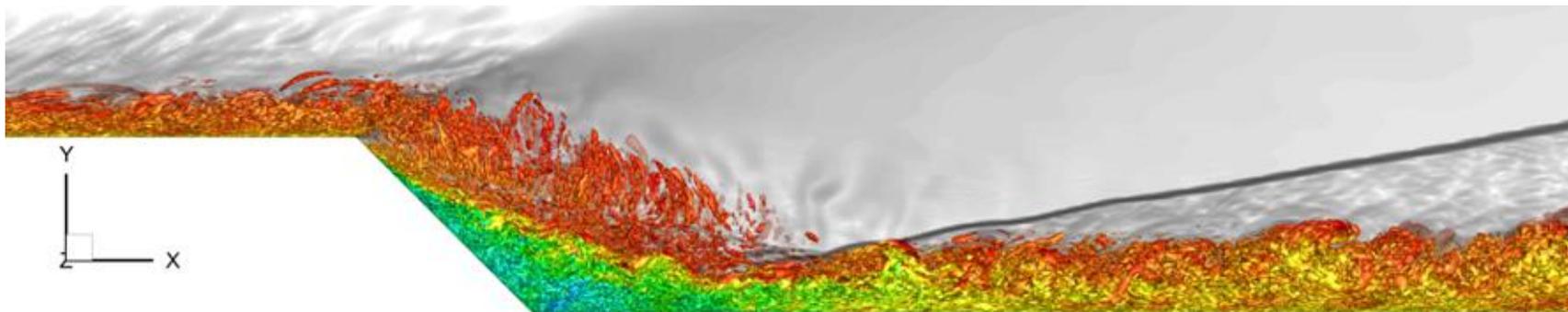
Сравнение профиля продольной скорости по центральной линии с экспериментом

<https://doi.org/10.1017/s0022112003005202>



Сравнение 1/3-октавного спектра для точки $\theta = 60^\circ$, 98D с экспериментом <https://doi.org/10.1017/s0022112004000151>

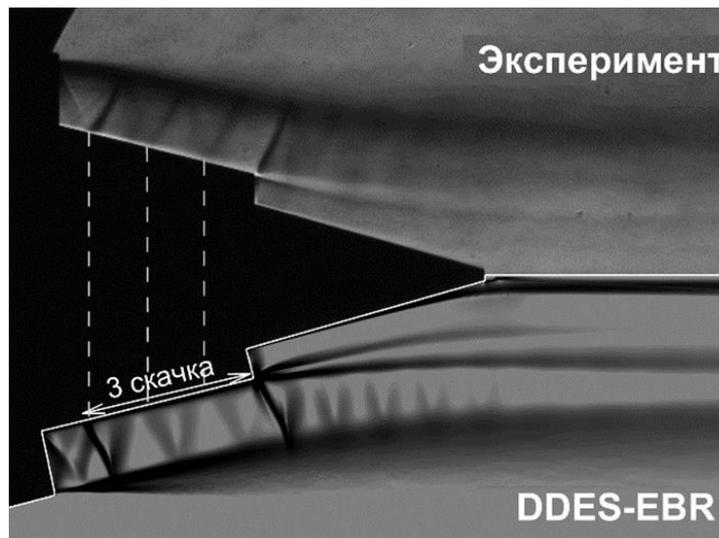
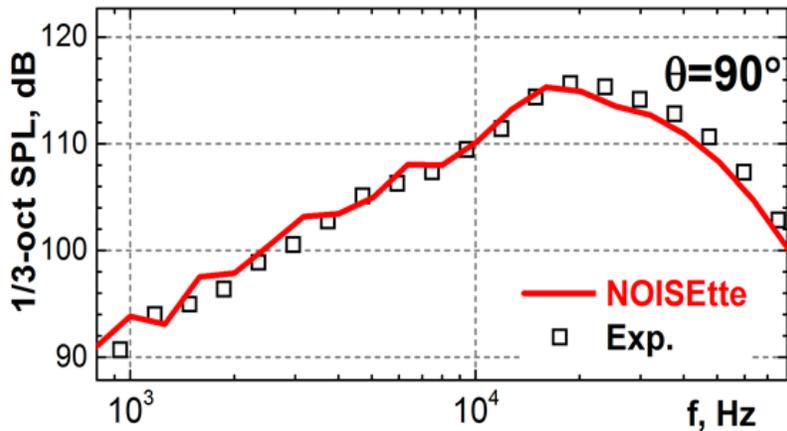
Высокоточное вихреразрешающее моделирование



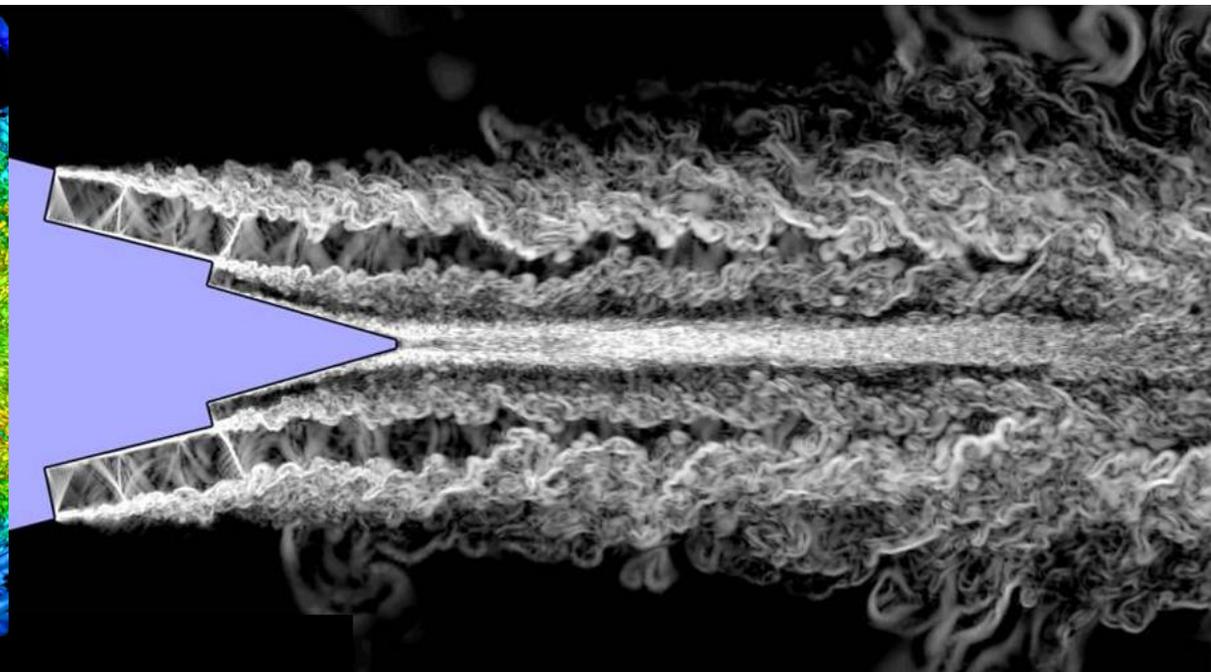
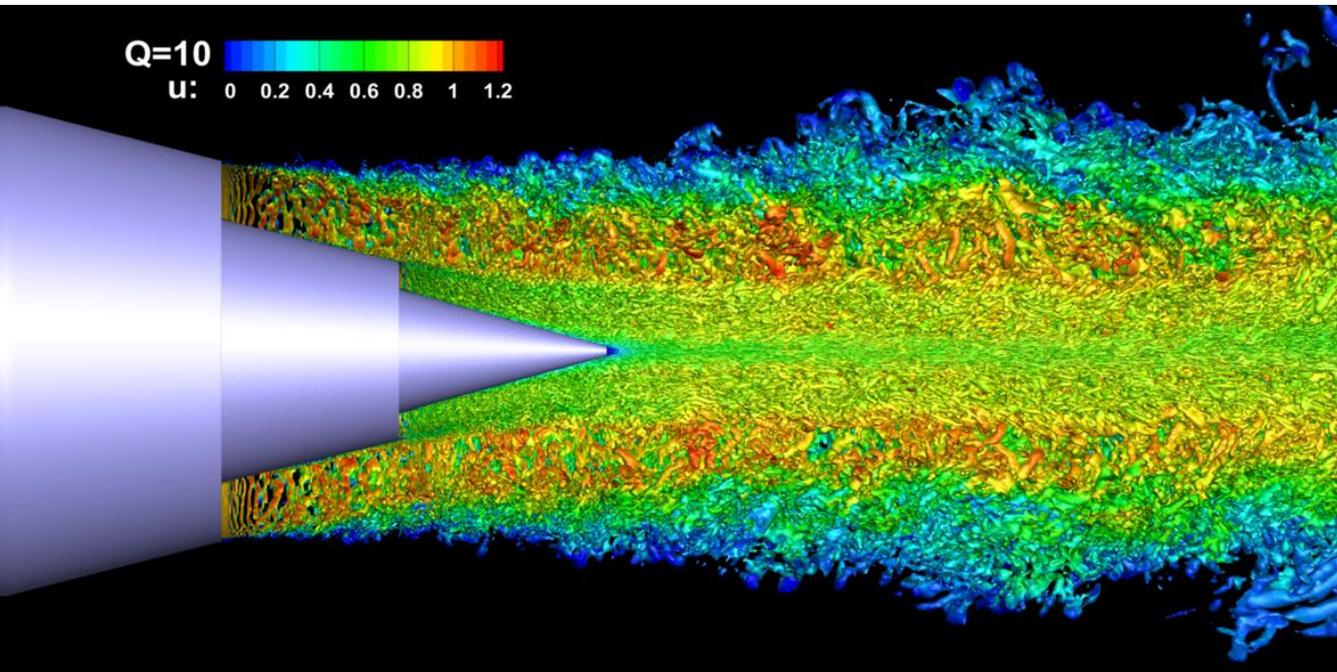
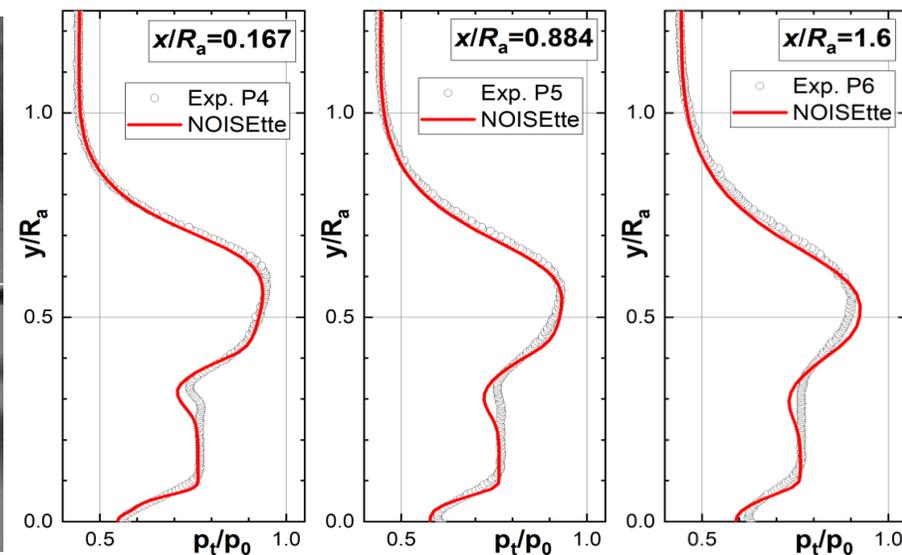
Высокоточное вихреразрешающее моделирование

Реактивная струя газотурбинного двигателя

1/3 октавные спектры в точка дальнего поля, $R=100D$



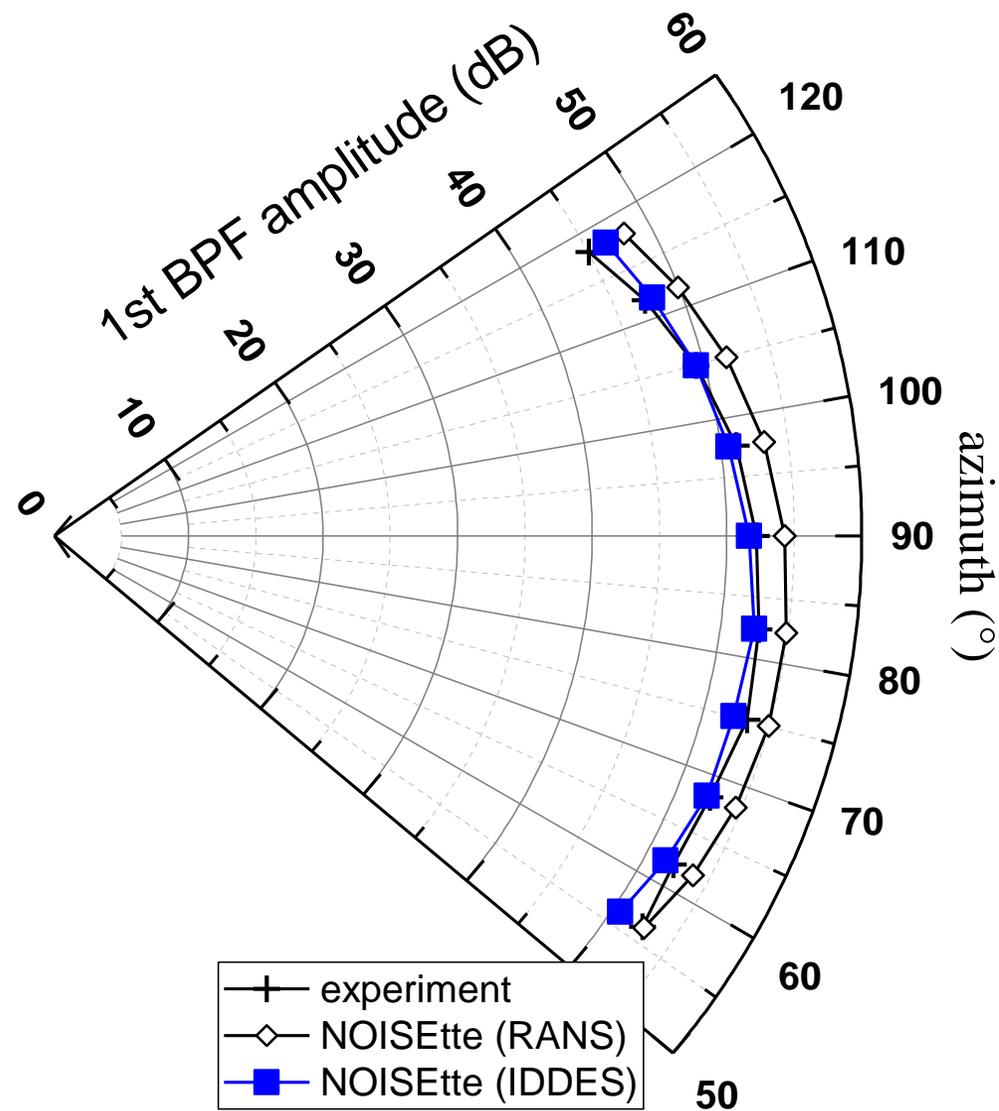
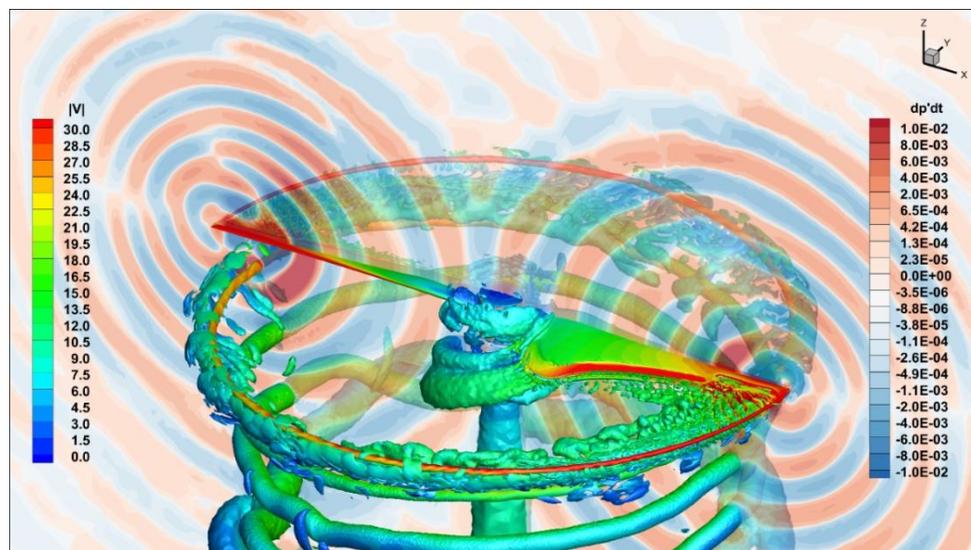
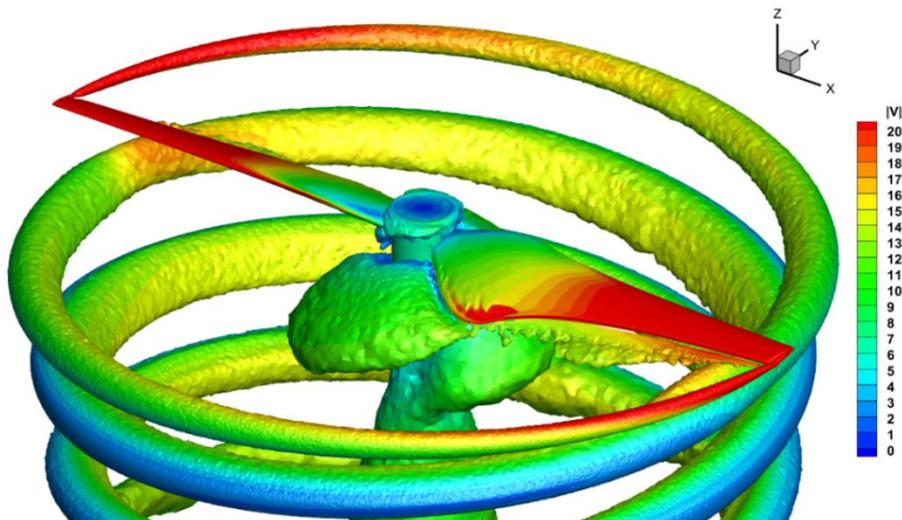
Эксперимент ИТПМ СО РАН (В.И. Запрыгаев)



Высокоточное вихреразрешающее моделирование

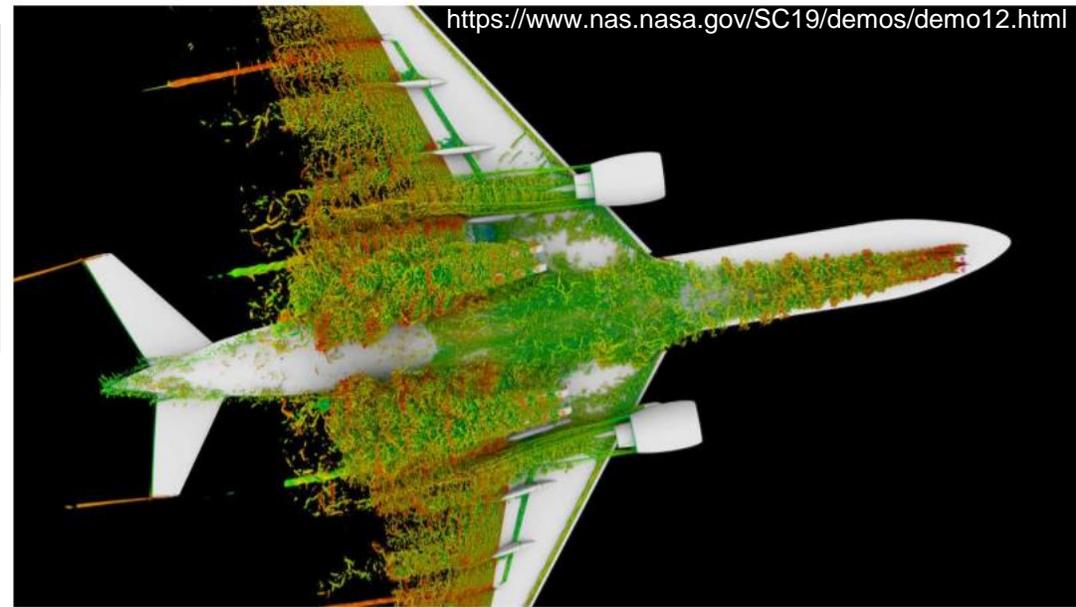
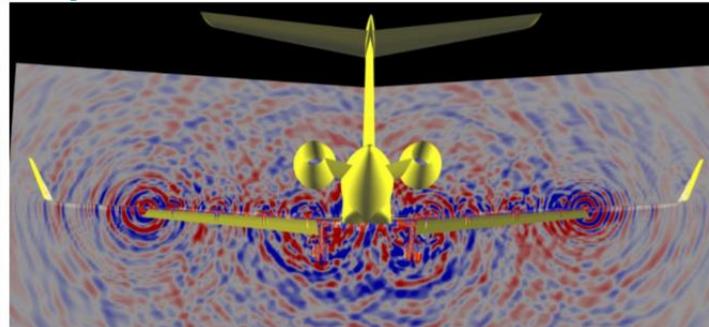
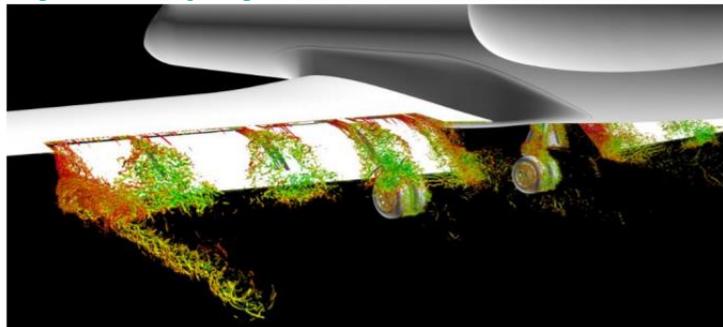
Пропеллеры дрона

Радиус 12 см, хорда 32мм, NACA4412, кутка $\sim 40^\circ$, частота вращения 60,90,120 об/с, $Re: 9.5 \times 10^5, 14.2 \times 10^5, 19 \times 10^5$
Эксперимент: Hong Kong University of Science and Technology

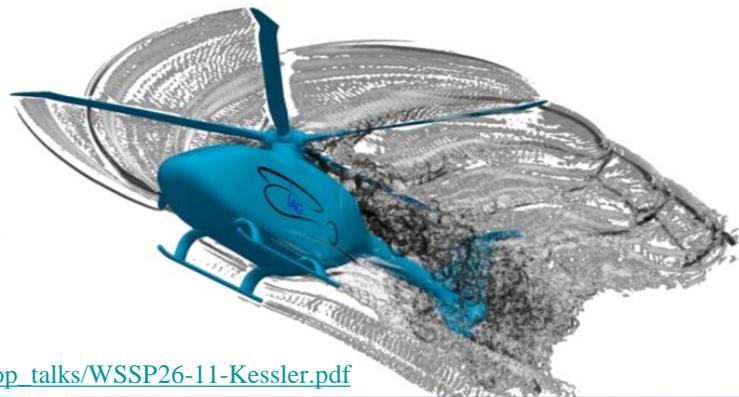
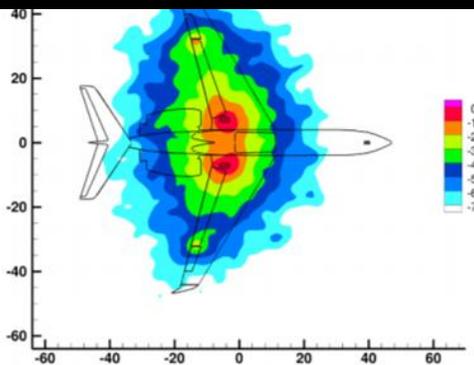


Когда НРС ресурсы станут доступнее...

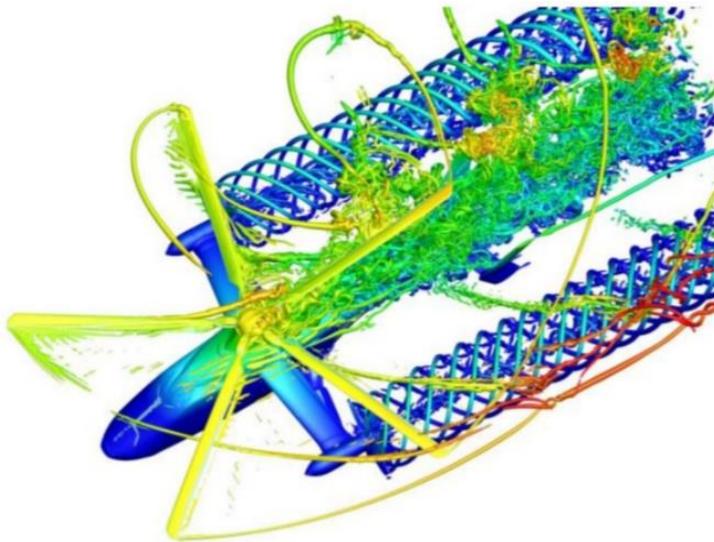
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160009089/downloads/20160009089.pdf>



<https://www.nasa.gov/SC19/demos/demo12.html>

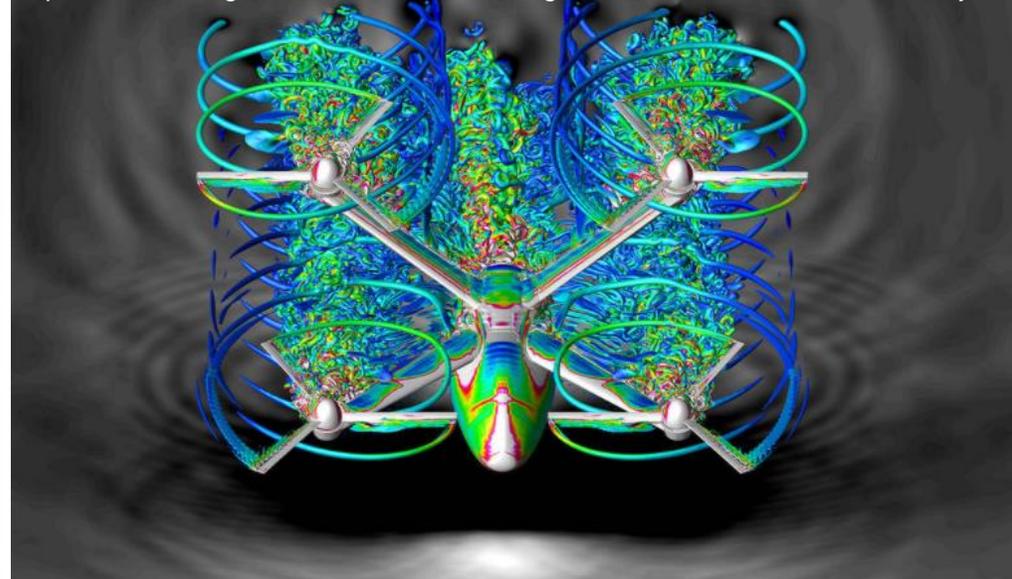


https://fs.hlrs.de/projects/teraflop/26thWorkshop_talks/WSSP26-11-Kessler.pdf



<https://www.nasa.gov/SC16/demos/demo7.html>

<https://www.nasa.gov/aeroresearch/visualizing-the-future-of-advanced-air-mobility/>



Выводы

- Современные вычислительные технологии позволяют выполнять высокоточные CFD расчеты
- Суперкомпьютерные CFD расчеты востребованы, это важный инструмент научно-технического прогресса, но...

Когда суперкомпьютеры станут в 1000 раз мощнее

Точнее, не просто мощнее, а в 1000 раз нам доступнее...

Точнее, не просто доступнее, а прямо таки в 1000 раз дешевле...

У-у-х! Заживем!

Высокоточное вихреразрешающее моделирование – не штучные, а массовые серийные многовариантные расчеты

Не отдельные фрагменты, а весь ЛА целиком

Сертификационные испытания по шуму – расчетом

А пока те светлые времена не настали (стоит ли их ждать?)

мы продолжаем улучшать мат модели и численные методы для повышения точности и снижения ресурсоемкости

