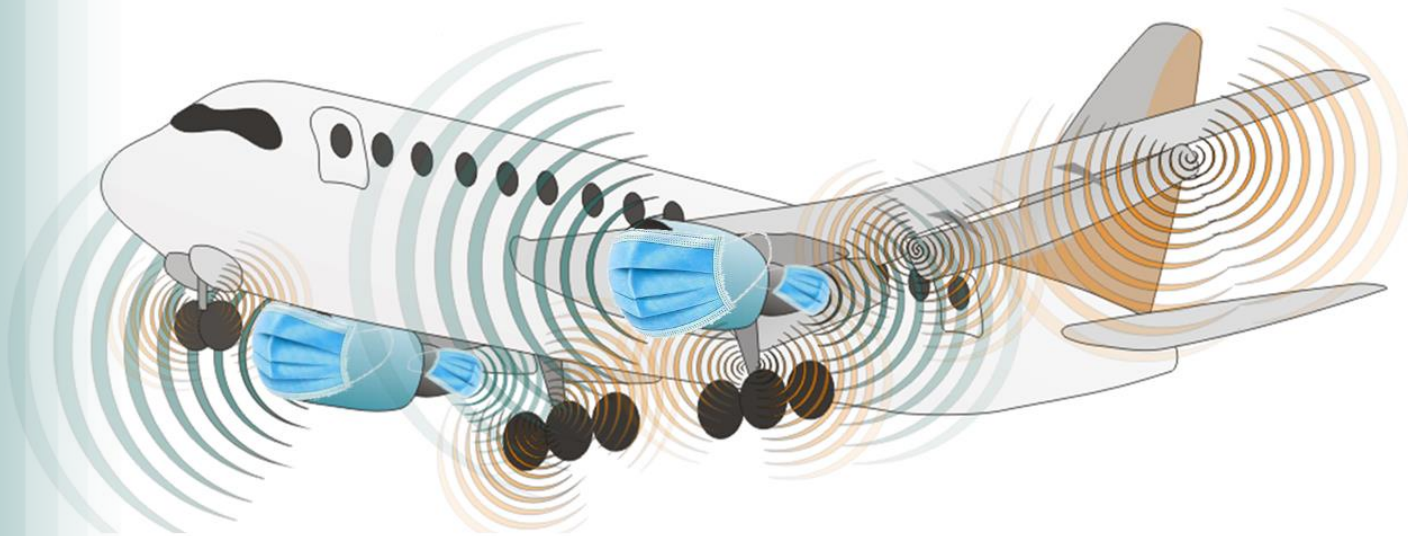


Что нового принес 2021 год в код NOISEtte

Коллектив Сектор вычислительной аэродинамики и аэроакустики et al.



<http://caa.imamod.ru/noisette>

Код NOISEtte:

- Вихреразрешающее моделирование
- Вычислительная аэродинамика и аэроакустика
- Схемы пониженной надежповышенной точности
- Неструктурированные смешанные сетки
- Многоуровневое распараллеливание
- MPI + OpenMP + OpenCL

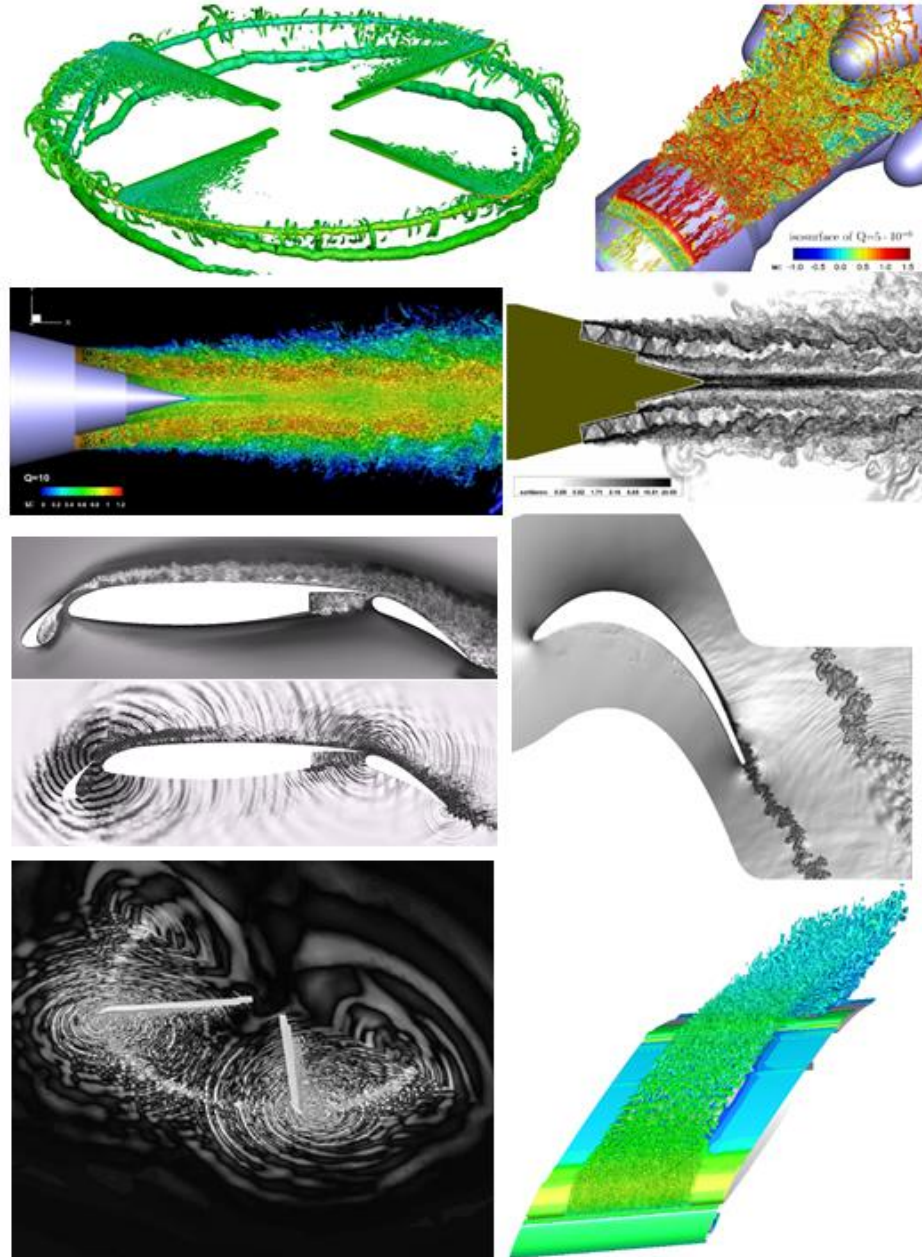


Сектор вычислительной аэродинамики и аэроакустики
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

<http://caa.imamod.ru>

NOISETTE – CFD код для исследований и для приложений

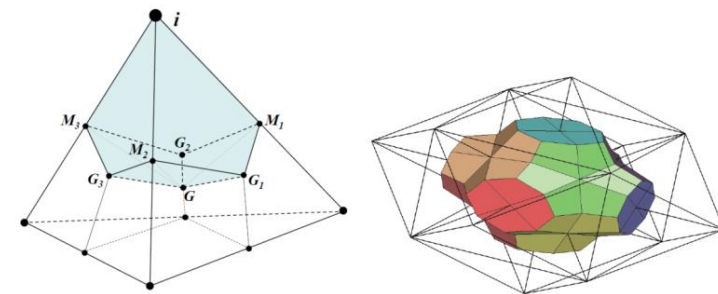
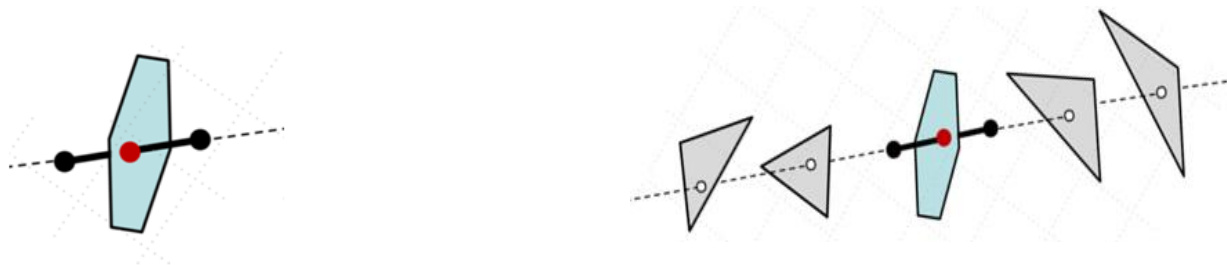
- **C++, MPI, OpenMP, OpenCL**
200К строк, MSVS, SVN, Redmine, Sphinx, ParMetis, FFTW, LZMA, opti2d, ...
- **Экономичные схемы повышенной точности**
неструктурированные сетки
- **Вихреразрешающие расчеты**
сжимаемые течения, дозвук, сверхзвук,
предсказание аэродинамических и акустических характеристик
- **HPC параллельная реализация**
масштабируемые алгоритмы
гетерогенные вычисления CPU+GPU
- **Технологии моделирования**
турбулентность – RANS, LES, DES
IBC, акустика в дальнем поле FW/H,
численный beamforming, деформируемые сетки,
динамически адаптивные сетки,
скользящий интерфейс, ...



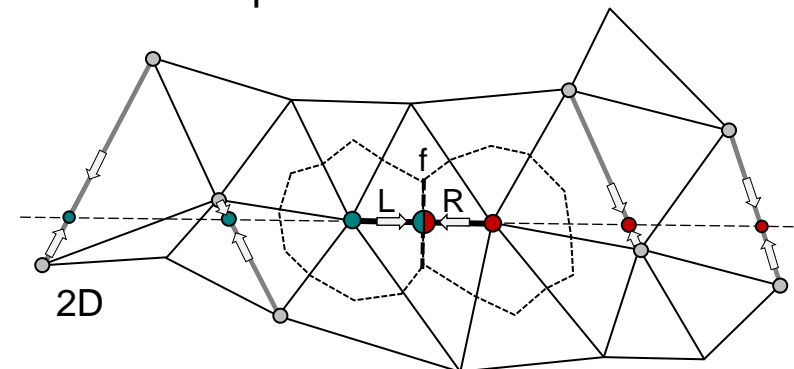
Оригинальные схемы EBR

повышенная точность, повышенный порядок на Т-сетках

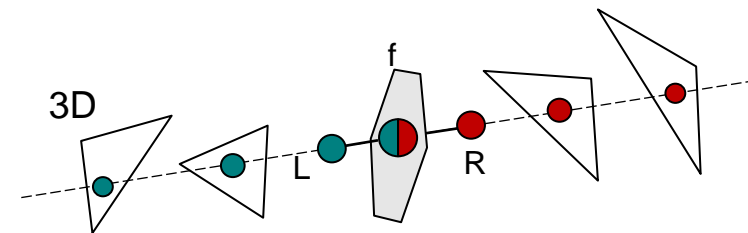
(пониженная социальная ответственность на неструктурированных сетках)



Контрольные объемы



3D



Интерполяционные конструкции

Базовая схема 1 порядка

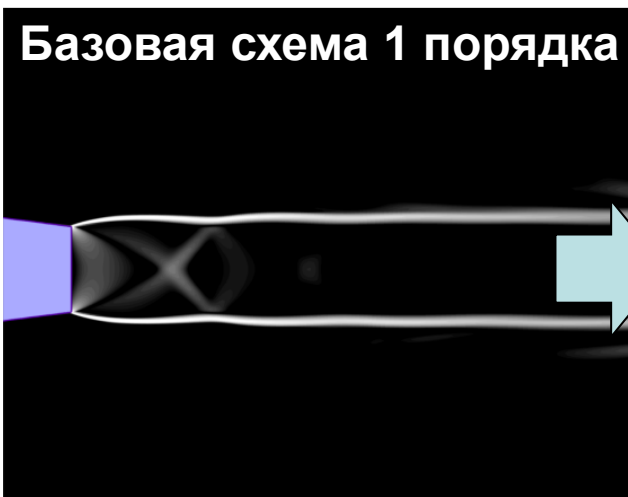


Схема EBR5



в ту же цену
до 5-го порядка точности (на ТС сетках)

Bakhvalov Pavel, Abalakin Ilya, Kozubskaya Tatiana. Edge-based reconstruction schemes for unstructured tetrahedral meshes.

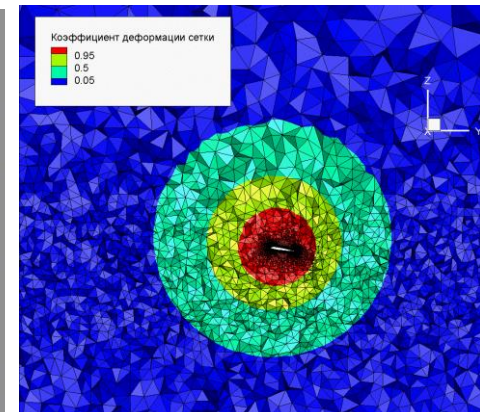
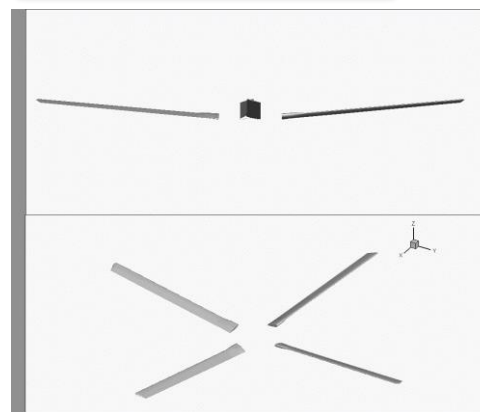
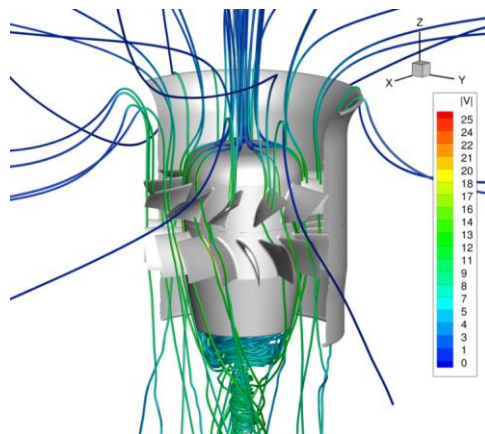
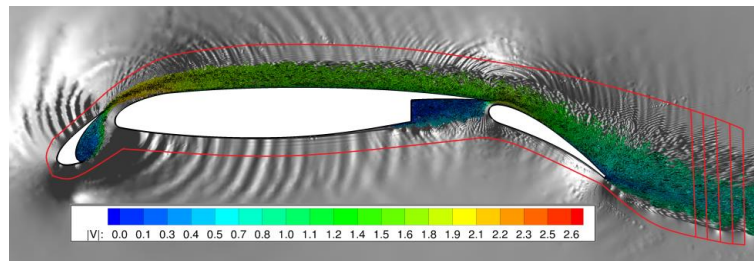
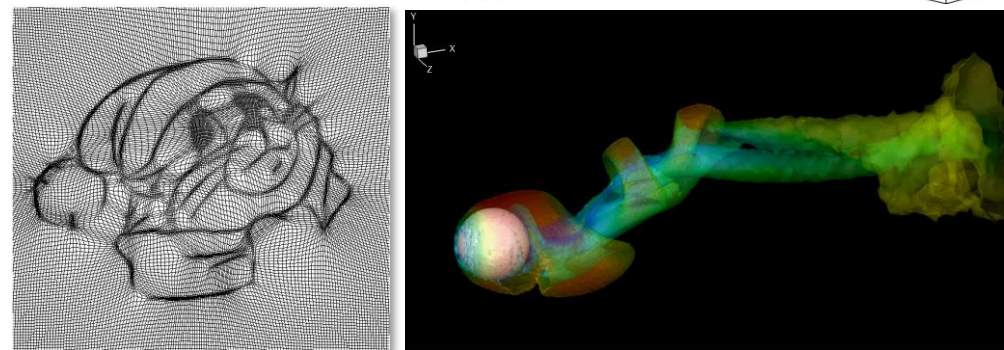
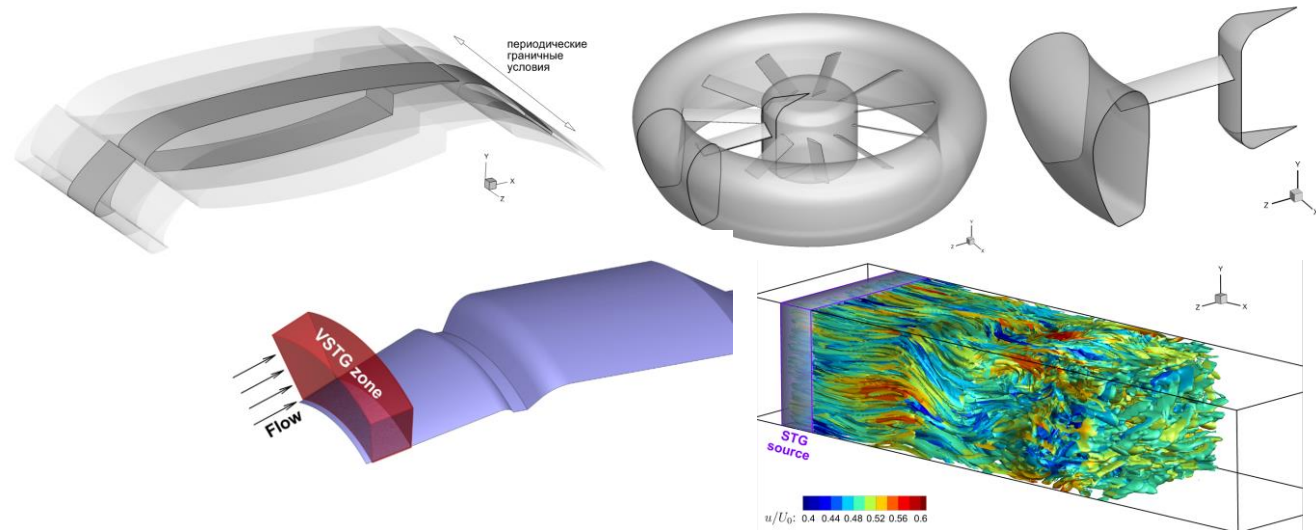
International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2016. Vol.81(6). P. 331–356. <https://doi.org/10.1002/flid.4187>

Bakhvalov Pavel, Kozubskaya Tatiana. EBR-WENO scheme for solving gas dynamics problems with discontinuities on unstructured meshes.

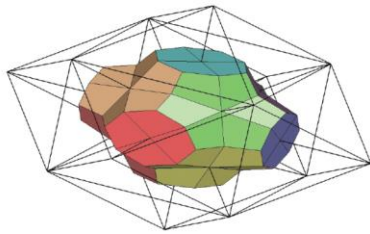
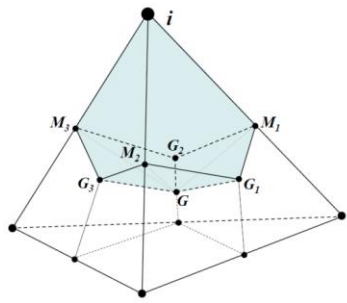
Computers and Fluids. 2017. Vol. 157, p. 312-324. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.09.004>

Технологии вычислительного эксперимента

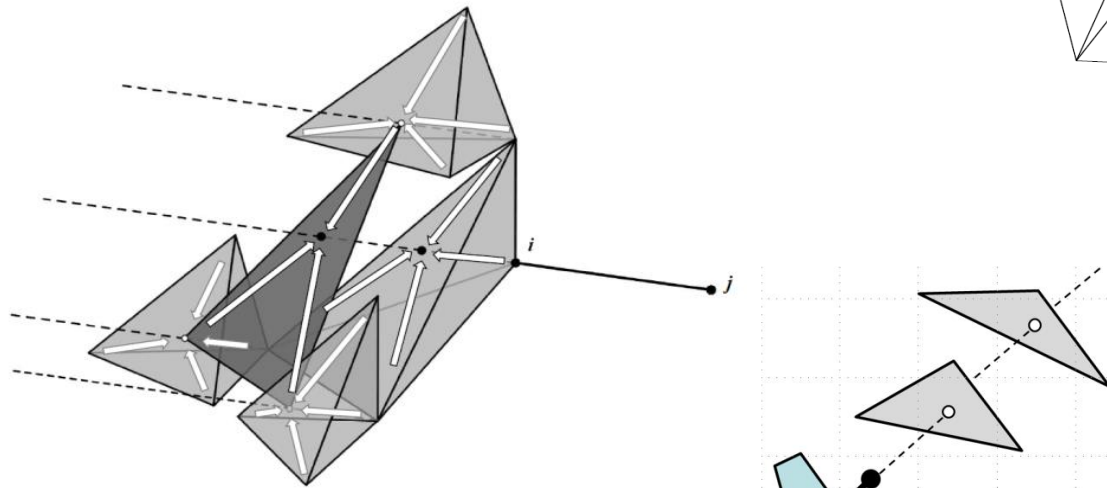
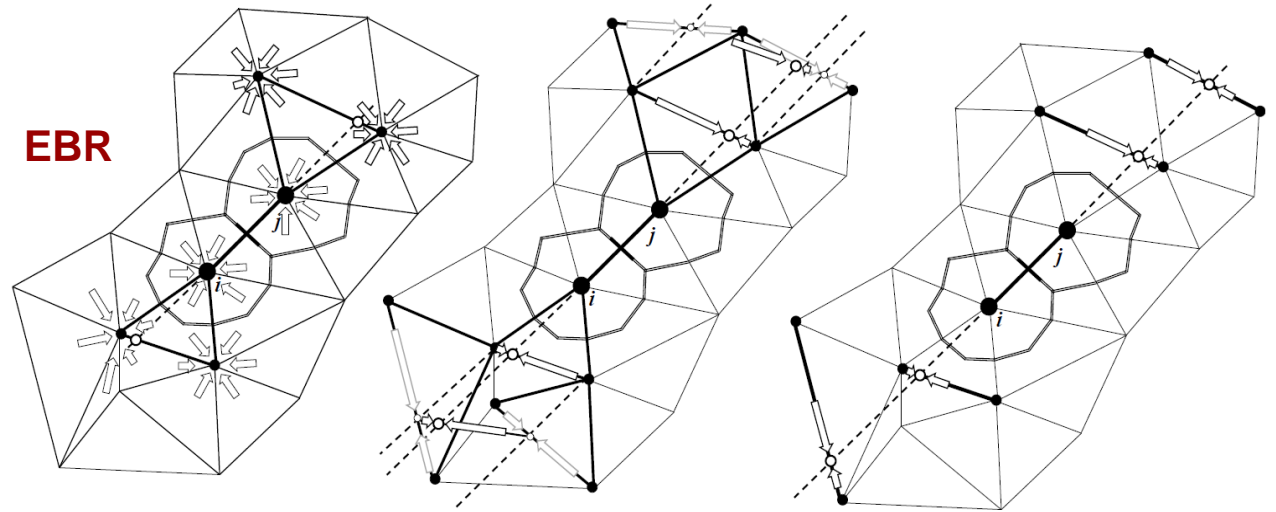
- Неявные схемы интегрирования по времени
- Периодические граничные условия
- Генерация синтетической турбулентности
- Поглощающий слой
- Погруженные граничные условия – IBC
моделирование подвижных объектов
- Динамическая адаптация сетки без изменения топологии
- Деформируемые сетки
- Скользящий интерфейс – вращающиеся сетки
- Акустика в дальнем поле – FW/H



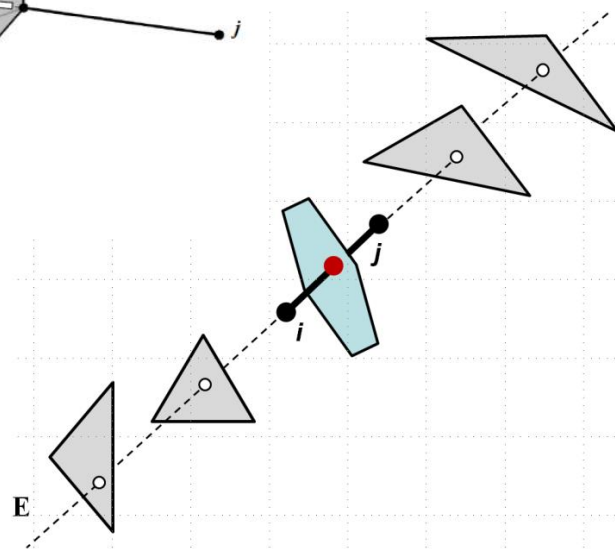
Зоопарк схем и прочих численных методов



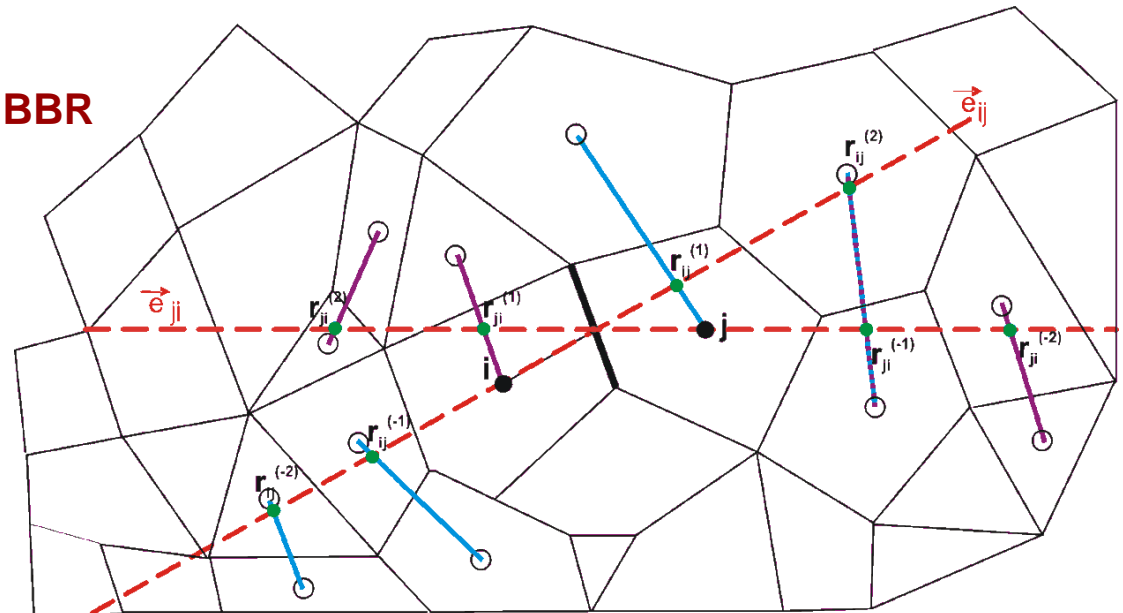
EBR



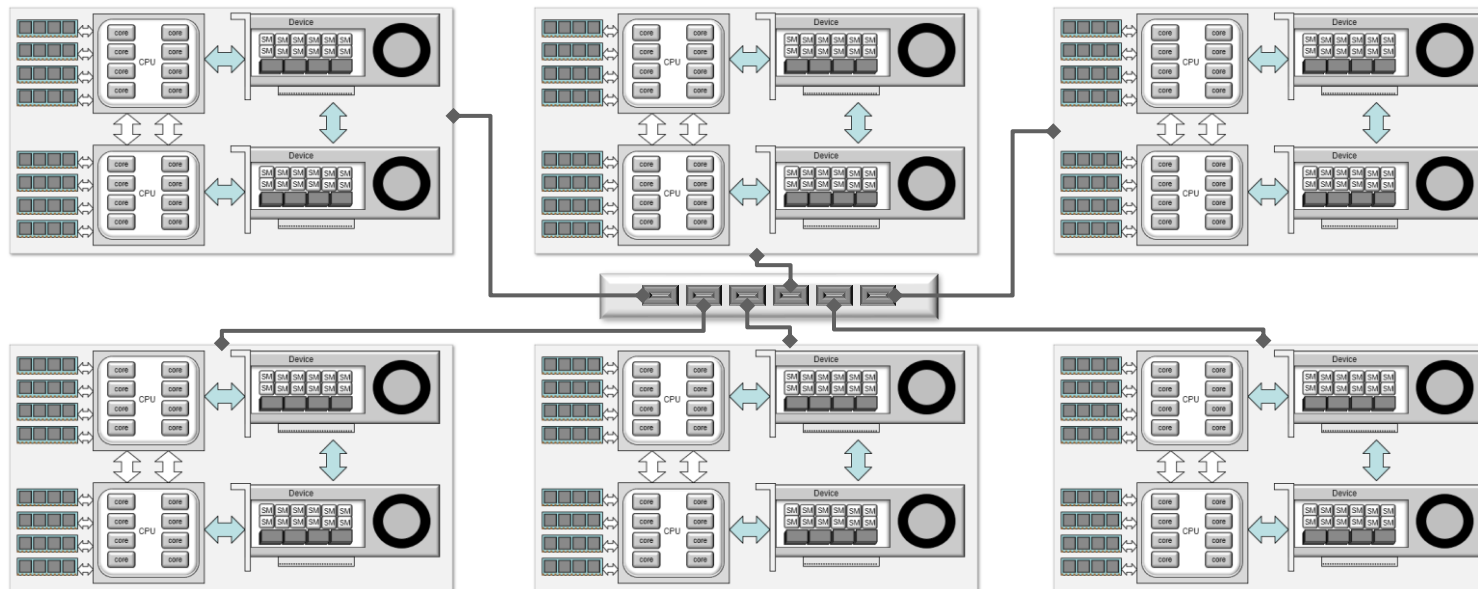
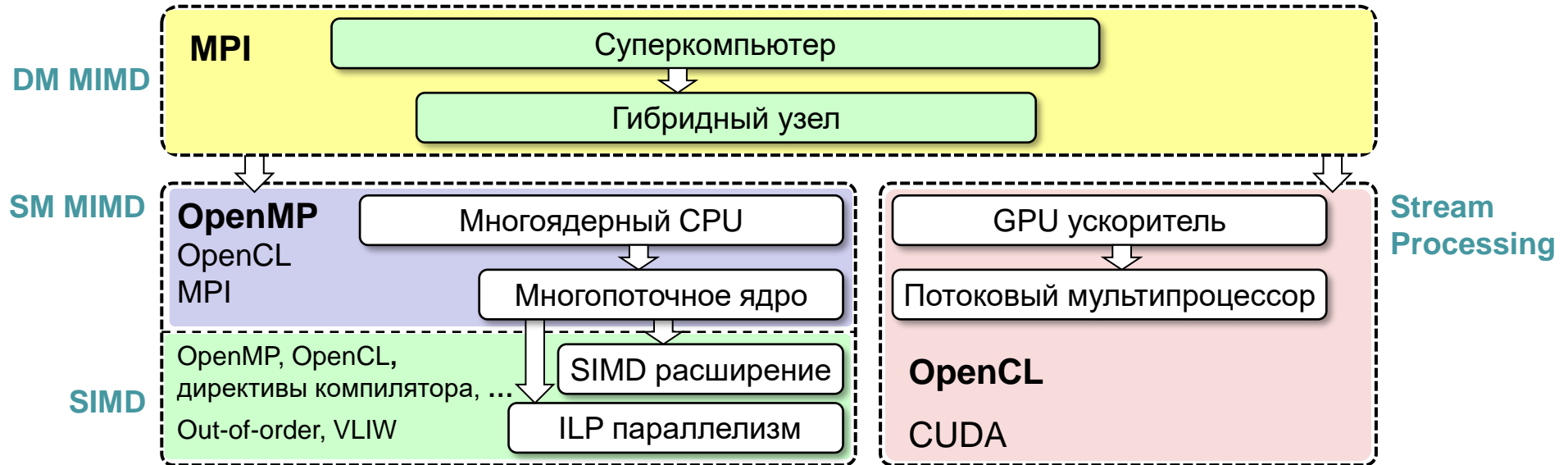
Животных
не кормить!



BBR



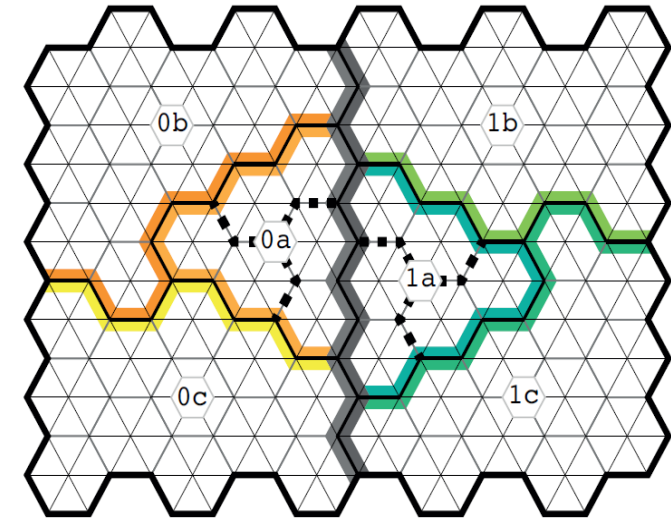
Уровни параллелизма и средства разработки



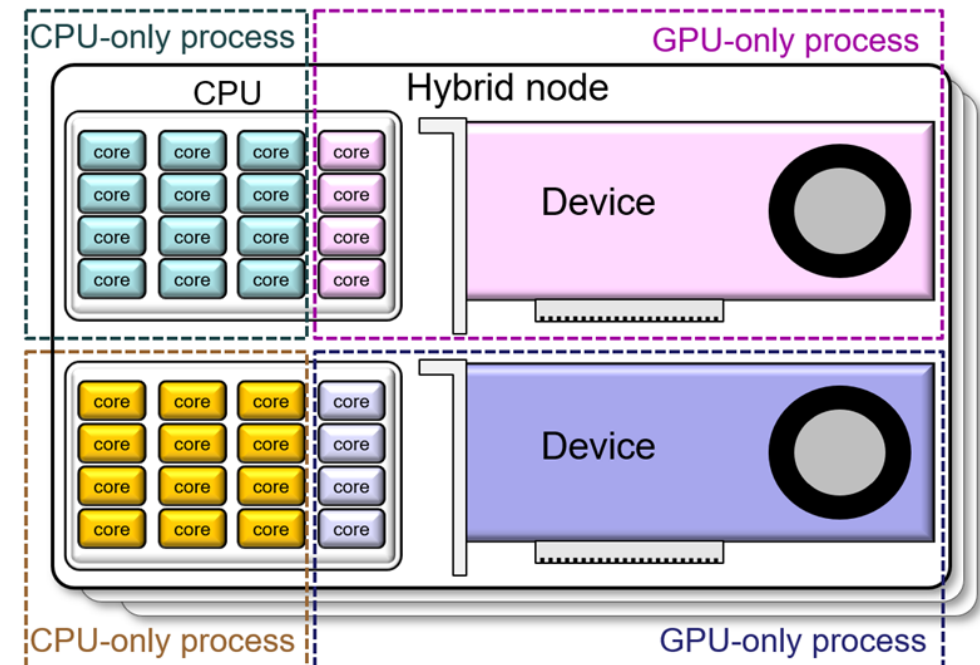
Многоуровневое распараллеливание MPI + OpenMP + OpenCL

- MPI: многоуровневая декомпозиция с балансировкой
- OpenMP: параллелизм на основе декомпозиции
- Сокращение обменов за вычислениями
- Гетерогенные вычисления CPU + GPU
- Кернел-код конфигурируется в рантайме
- Полная согласованность CPU и GPU версий
- Автоматизированная система QA
- Автотестирование CPU-GPU на рантайме

Andrey Gorobets, Pavel Bakhvalov. Heterogeneous CPU+GPU parallelization for high-accuracy scale-resolving simulations of compressible turbulent flows on hybrid supercomputers. Computer Physics Communications. Vol 271. 2022. 108231. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108231>

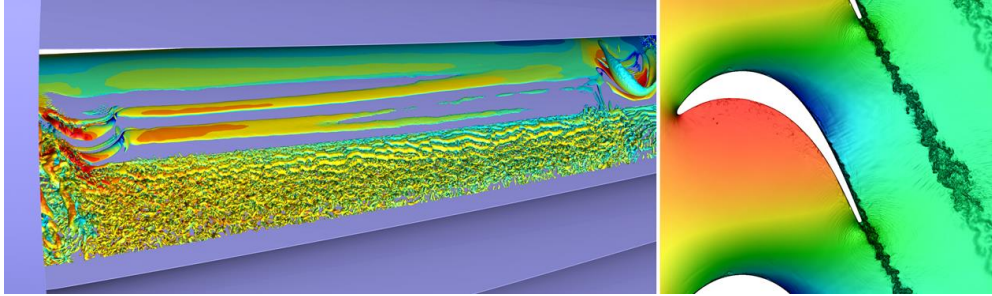


Многоуровневая декомпозиция

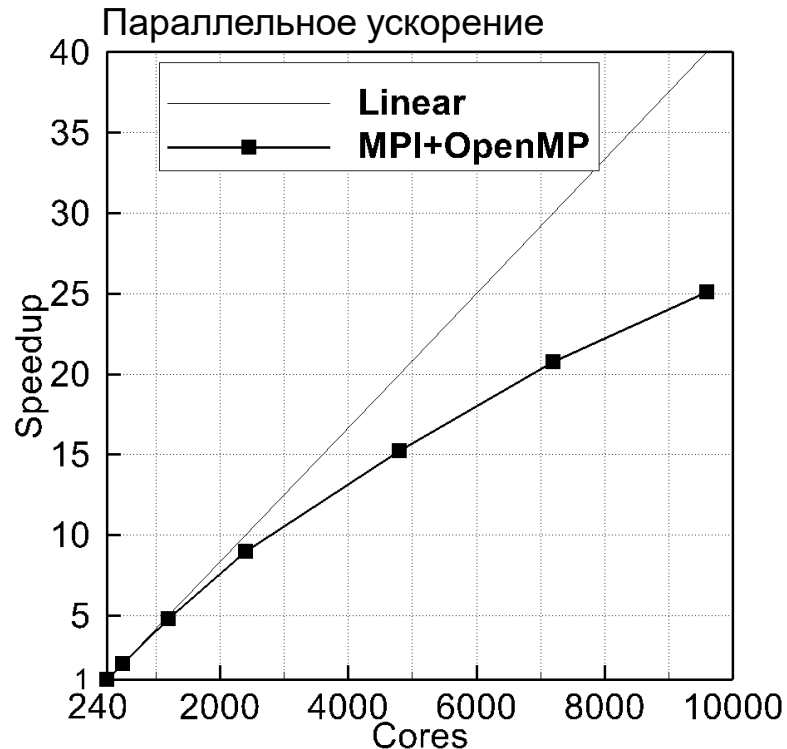


Параллельная эффективность на CPU и GPU

Численная конфигурация: схема по пространству EBR5, схема по времени неявная BDF2 с солвером BiCGSTAB, гибридный незонный RANS-LES подход IDDES, смешанная точность FP64/32, сетка: ~80М (обтекание лопатки ТНД)



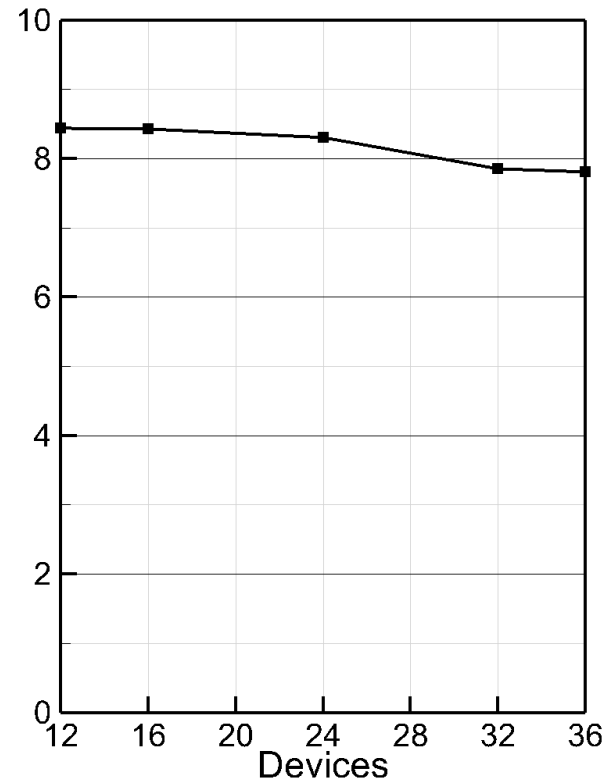
CPU кластер: узлы 2xCPU 24C Intel Xeon 8160



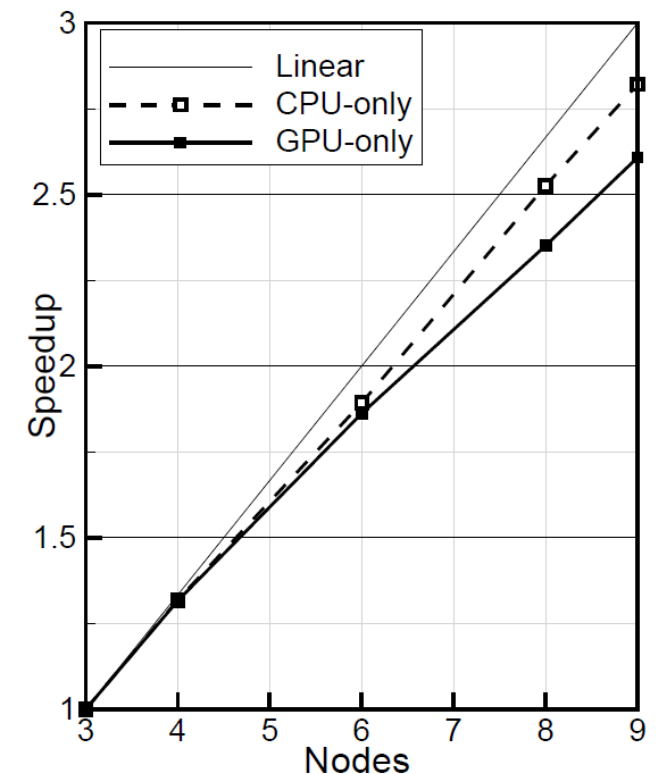
Гибридный кластер K60-GPU: на узлах
2 x16C CPU Intel Xeon **Gold 6142** (120 GB/s)
4 x GPU NVIDIA **V100** (32 GB, 900GB/s)



Соотношение производительности
GPU против 16-ядерного CPU



Параллельное ускорение



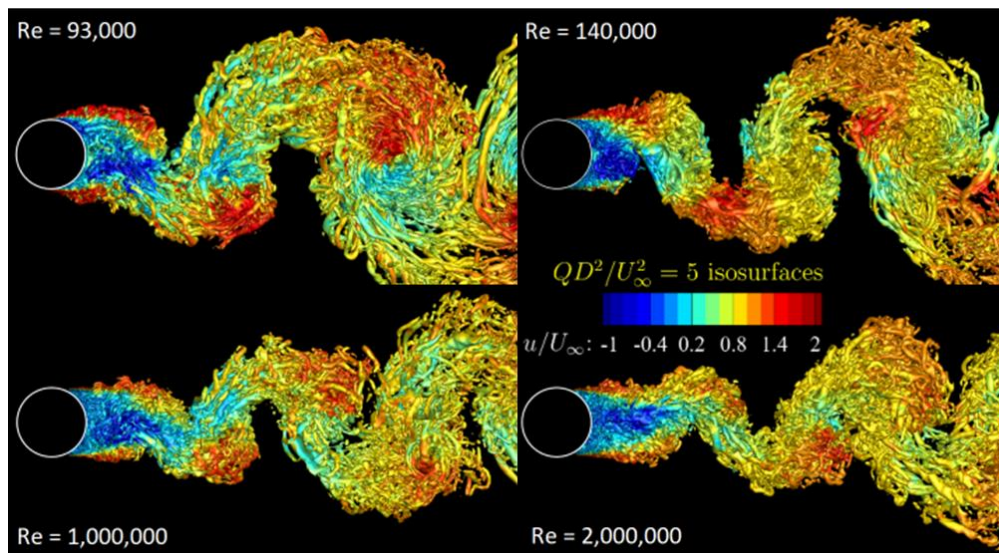
Параллельная эффективность на CPU и GPU

Численная конфигурация: схема по пространству EBR5, схема по времени неявная BDF2 с солвером BiCGSTAB, гибридный незонный RANS-LES подход IDDES, смешанная точность FP64/32, сетка 12.5М узлов (обтекание цилиндра)

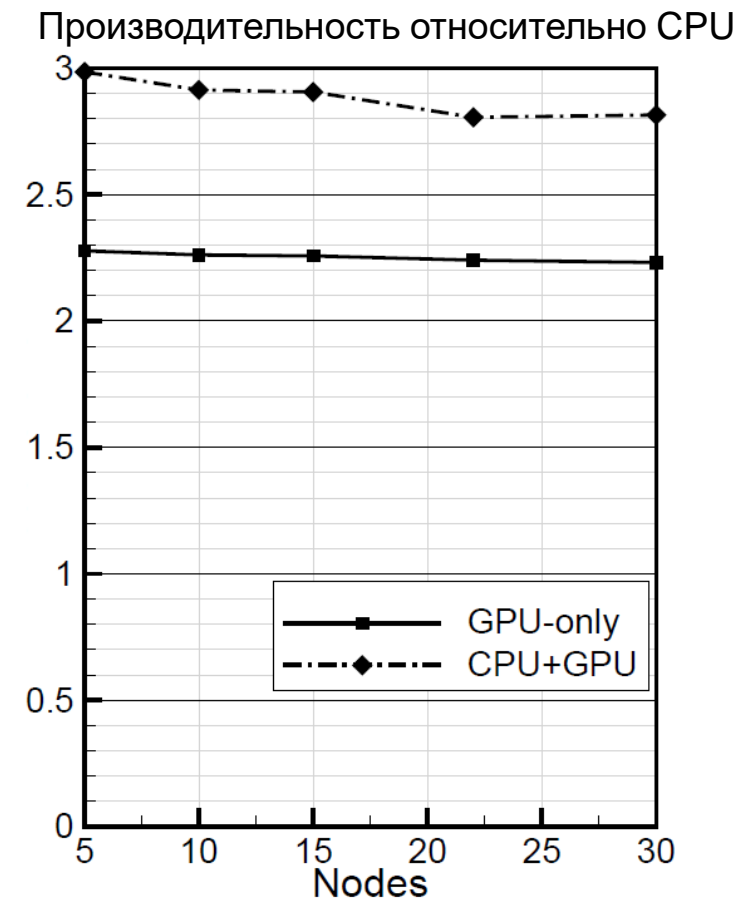
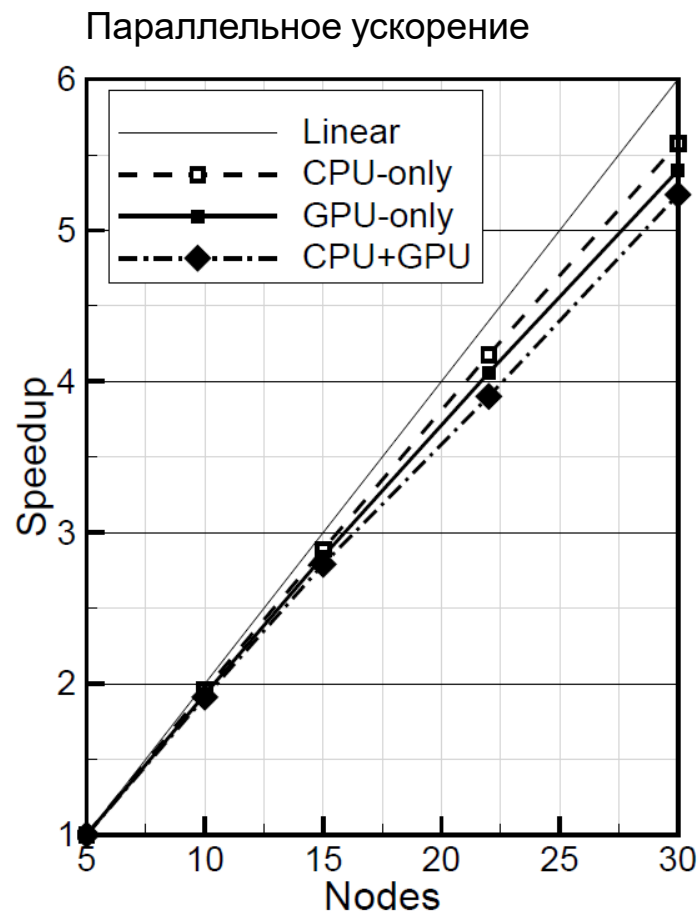
Гибридный кластер Ломоносов-2: на узлах одному 14C CPU Intel Xeon E5-2697v3 и GPU NVIDIA K40

Три режима вычислений: только на **CPU**, только на **GPU**, гетерогенный режим – совместно **CPU + GPU**

- **Выигрыш от гетерогенного режима:** прирост производительности до 30% относительно GPU



Моментальные картины течения в тестовой задаче



- Для вершинно-центрированных схем
- Совпадает с P1 Галеркиным на симплициальных сетках
- Дает 5- (2D) или 7-точечную (3D) аппроксимацию оператора Лапласа на декартовых сетках
- Доказан порядок $3/2$ в 2D и 1 в 3D для эллиптических задач
- Хорошо подходит для неявных схем на основе метода Ньютона:
сильно экономит память на несимплициальных сетках
может использовать упрощенный якобиан со смежностью только по ребрам
7 ненулей вместо 27 на гексаэдральных сетках
- Алгоритм в пореберной форме – объединение с конвективной частью
- Основа GPU реализации

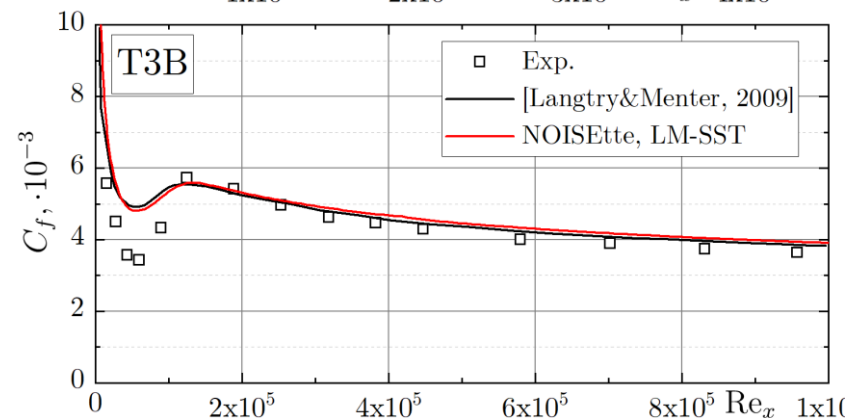
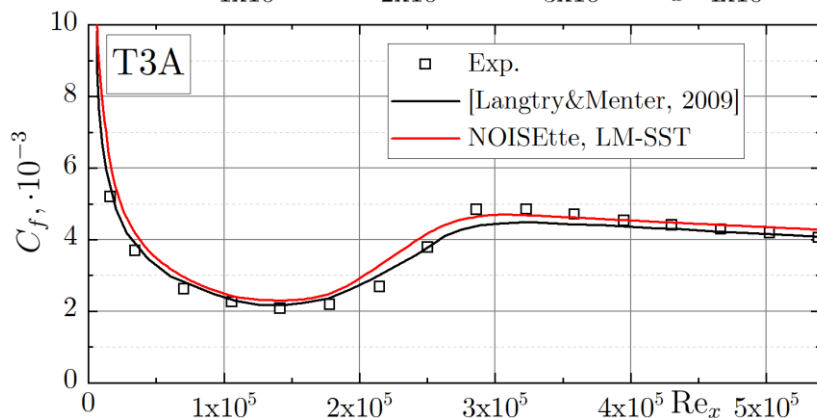
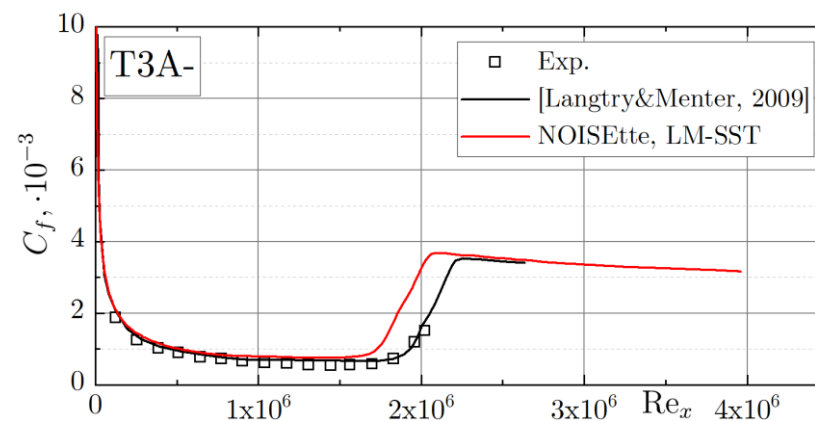
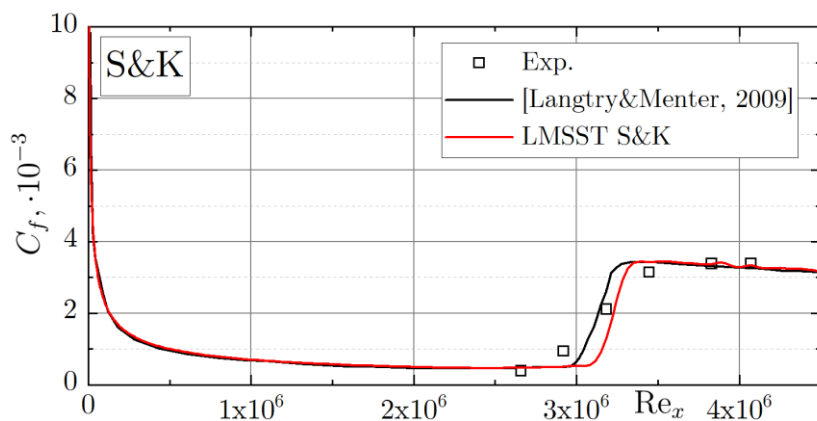
Bakhvalov P.A., Surnachev M.D.

Method of averaged element splittings for diffusion terms discretization in vertex-centered framework.
Journal of Computational Physics, 2021, 110819. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110819>

Реализация модели ЛТ перехода Лэнгтри-Ментера¹

Тесты ERCOFTAC²: течение возле пластины (без градиента давления)

	S&K ³	Т3А- ²	Т3А ²	Т3В ²
Входная Tu , %	0.3	0.874	3.3	6.5
Re_1	3.34M	1.32M	0.36M	0.627M

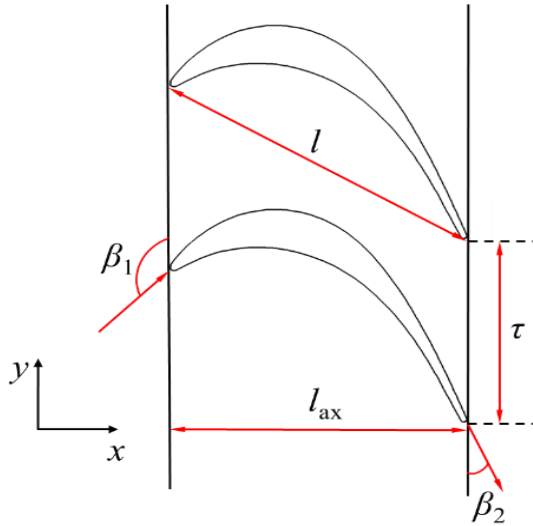


¹Langtry, R. B. and Menter, F. R., "Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes," *AIAA Journal*, Vol. 47, No. 12, December 2009, pp. 2894-2906

²Savill, A. M., "Some Recent Progress in the Turbulence Modeling of By-Pass Transition," *Near-Wall Turbulent Flows*, edited by R. M. C. So, C.G. Speziale, and B. E. Launder, Elsevier, NewYork, 1993, p. 829.

³Schubauer, G. B., and Klebanoff, P. S., "Contribution on the Mechanics of Boundary Layer Transition," NACATN 3489, 1955.

Тестирование модели перехода: турбинная решетка T106C¹ (1/2)



Параметр	Обозначение	Величина
Теоретическое число Маха на выходе	Ma_{2th}	0.65
Хорда	l	100 мм
Осевая хорда	l_{ax}	85.9 мм
Относительный шаг	t/l	0.95

Режимы обтекания

$Re_{2th} \cdot 10^4$	P_{t1} , Па	P_k , Па
9	7860.8	5900
20	17467	13110
50	43667.6	32775

$$Ma_{2th} = \left\{ \frac{2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_{t1}}{P_k} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \right\}^{1/2}$$

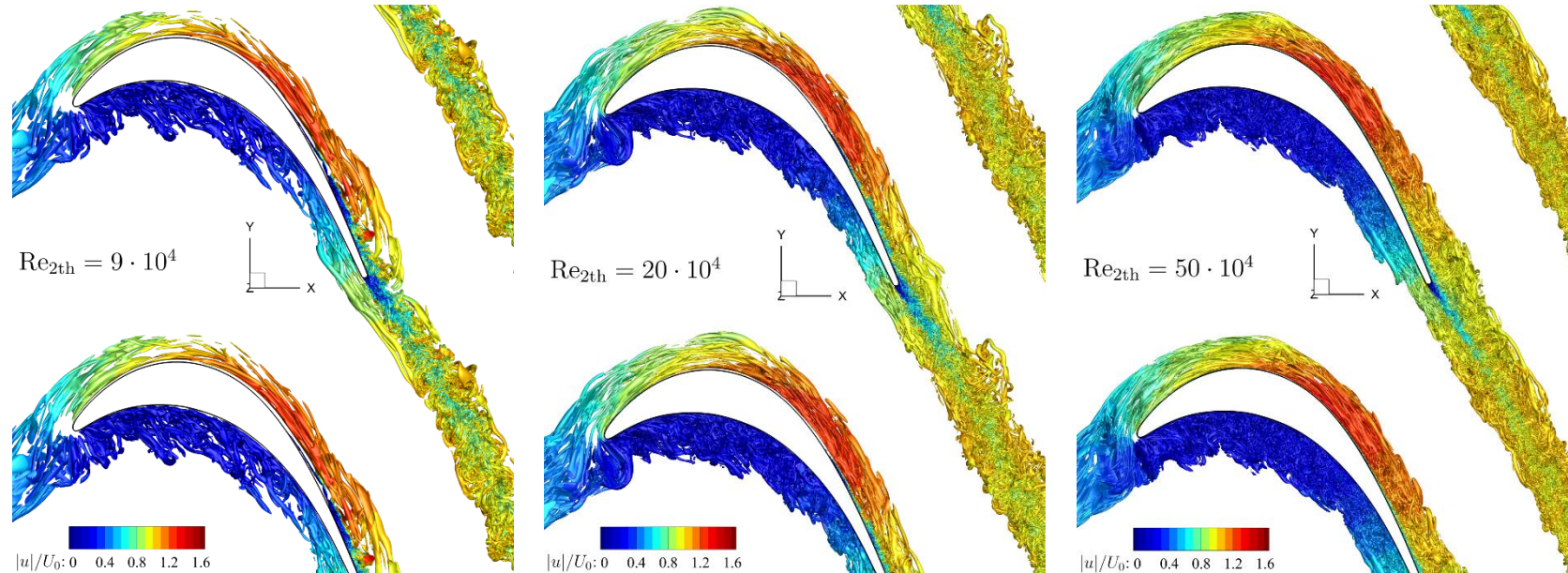
$$Re_{2th} = \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \frac{l}{C_S} \frac{Ma_{2th} P_k \left[T_{t1} / \left(1 + 0.5(\gamma-1) Ma_{2th}^2 \right) + S \right]}{\left[T_{t1} / \left(1 + 0.5(\gamma-1) Ma_{2th}^2 \right) \right]^2}$$

На входе:

- $T_{t1} = 303.15$ К
- $Tu = 3\%$
- масштаб вихря $\Lambda = 20$ мм

Референс:

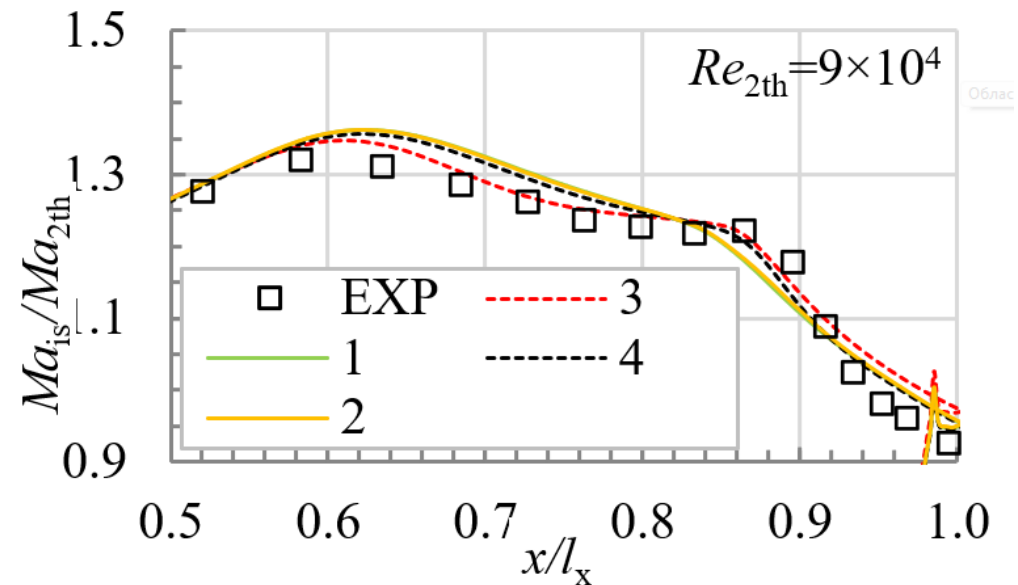
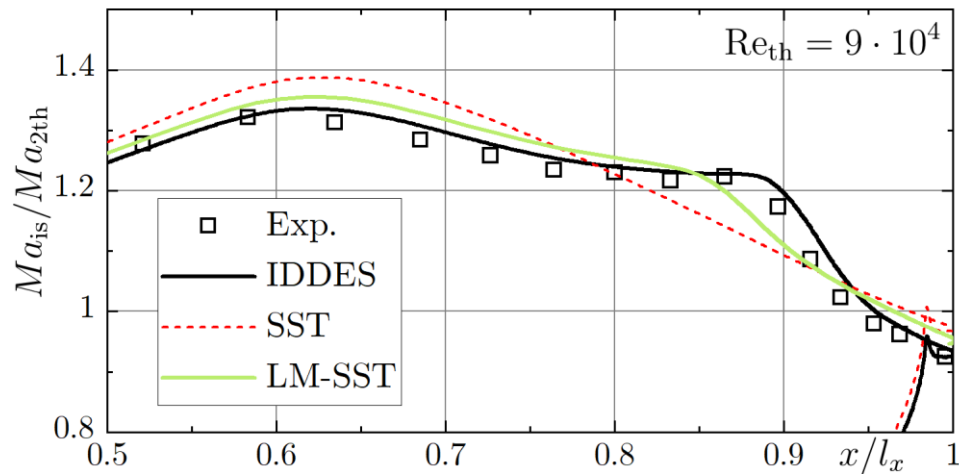
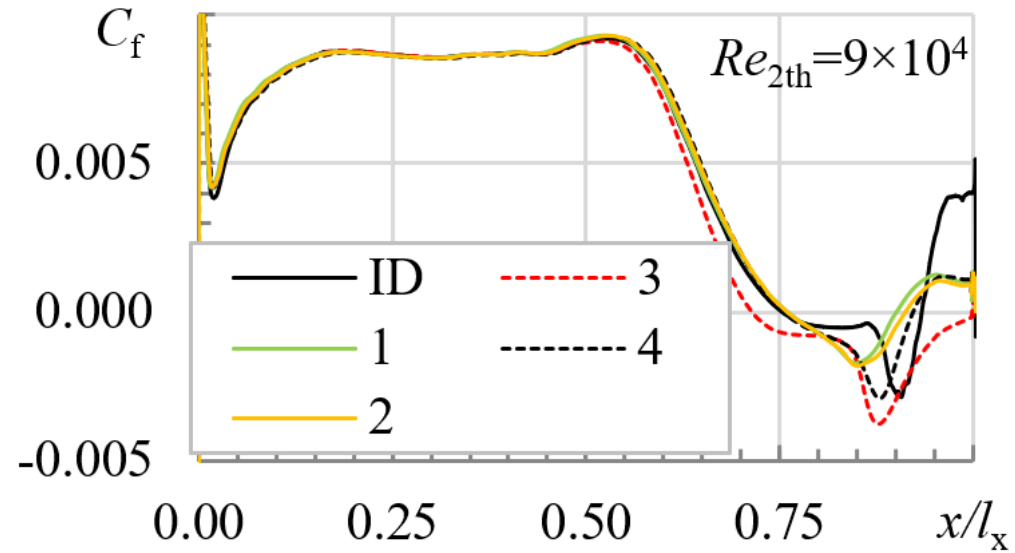
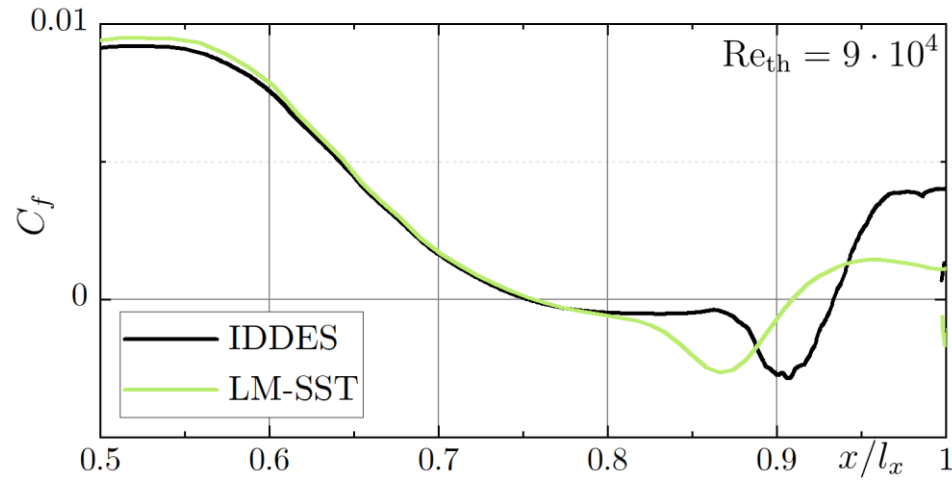
- Эксперимент¹
- Вихреразрешающий расчет NOISEtte²



¹Stotz, S., Guendogdu, Y., and Niehuis, R. Experimental Investigation of Pressure Side Flow Separation on the T106C Airfoil at High Suction Side Incidence Flow // ASME. J. Turbomach., 2017, 139(5): 051007

²A.P. Duben, T.K. Kozubskaya, O.V. Marakueva, D.V. Voroshnin. Simulation of flow over high-lifted turbine cascade at low Reynolds numbers // Journal of Physics: Conference Series, 1891 (2021) 012018

Тестирование модели перехода: турбинная решетка T106C (2/2)

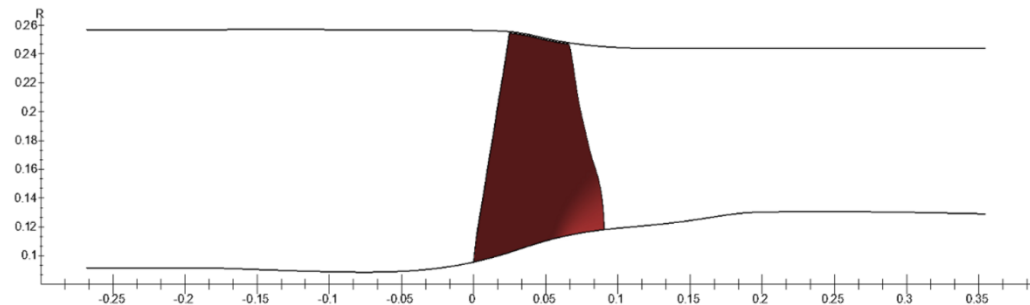
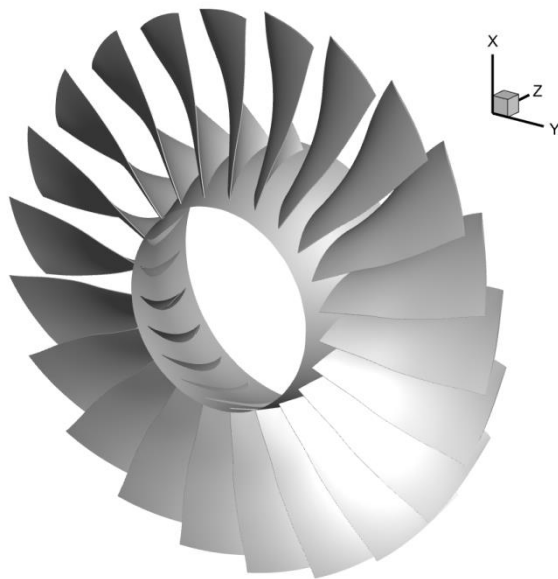


Результаты NOISEtte

Результаты NUMECA LM-SST:

Корреляции: 1 – LM; 2 – Malan; 3 – Sorensen; 4 - Kelterer

Течение в трансзвуковом осевом вентиляторе NASA Rotor67



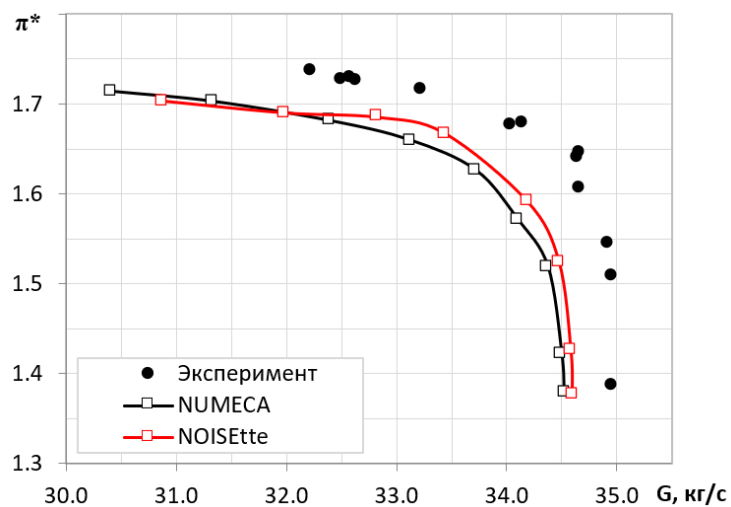
На входе:

- $T_t = 288.15$ К
- $P_t = 101325$ Па
- $RPM = 16043$ мин⁻¹
- масштаб вихря $\Lambda = 20$ мм

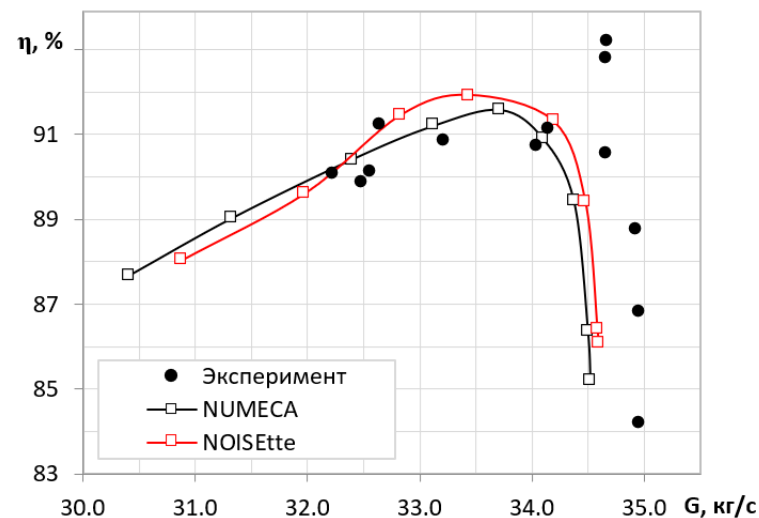
Давление на выходе варьировалось

Сетка: 2.95 млн. узлов

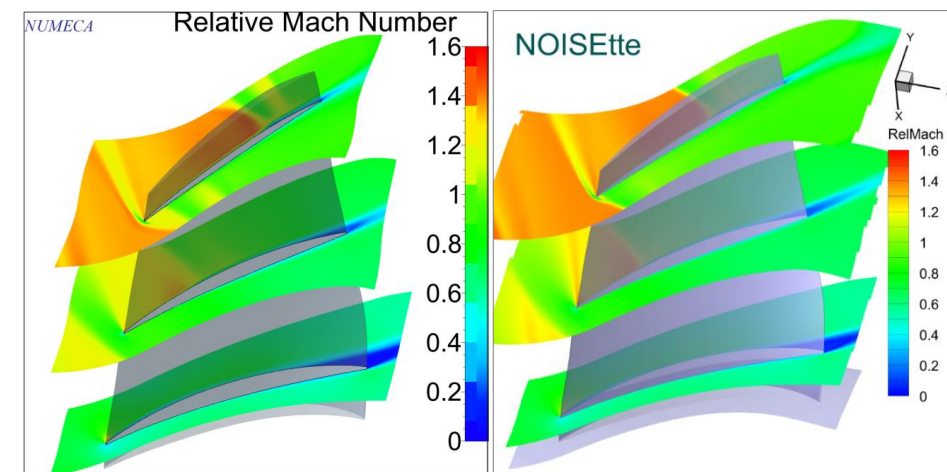
SST RANS подход



Отношение давлений за и перед вентилятором



КПД от расхода

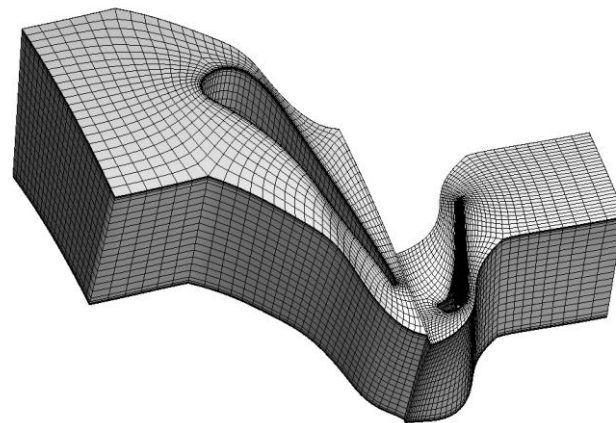
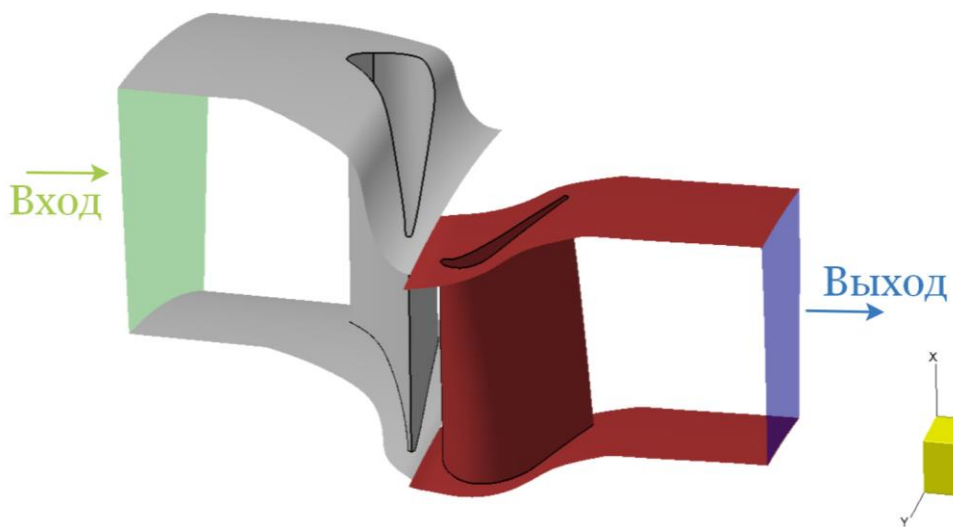


Относительное число Маха при максимальном КПД

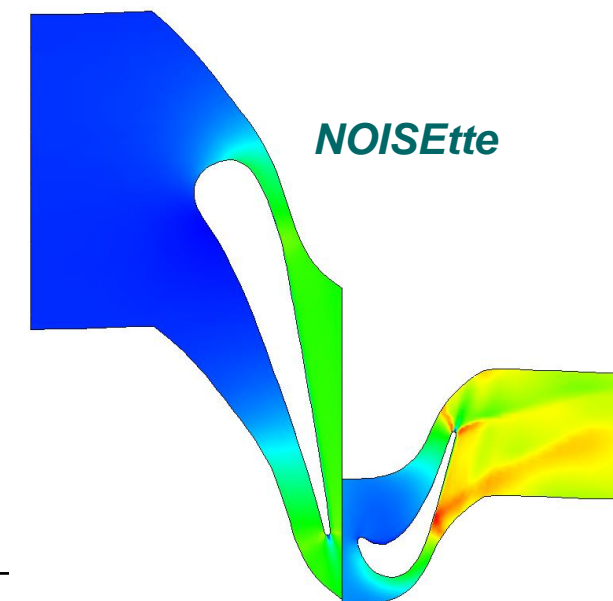
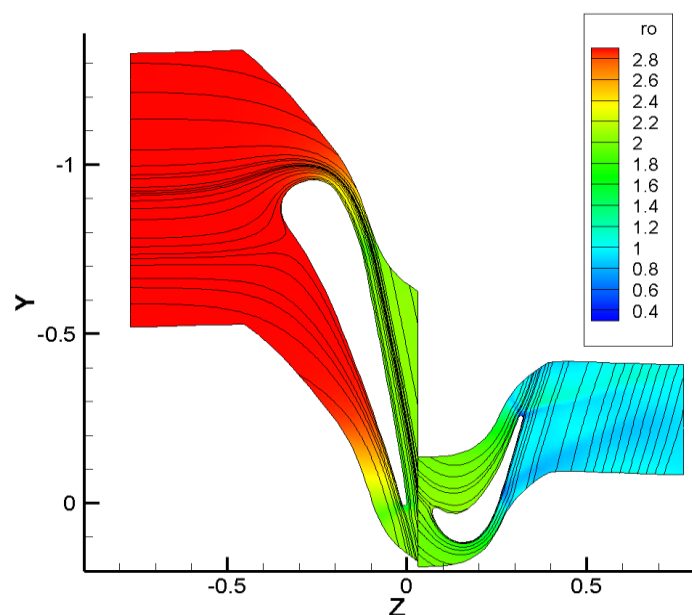
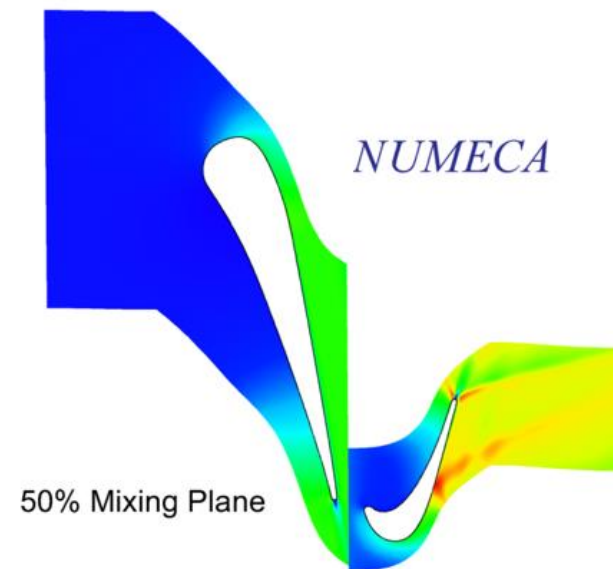
Поверхность смешения – Mixing plane интерфейс

- Консервативный
- Неотражающий (?)
- Плоскость
- Структурированная сетка

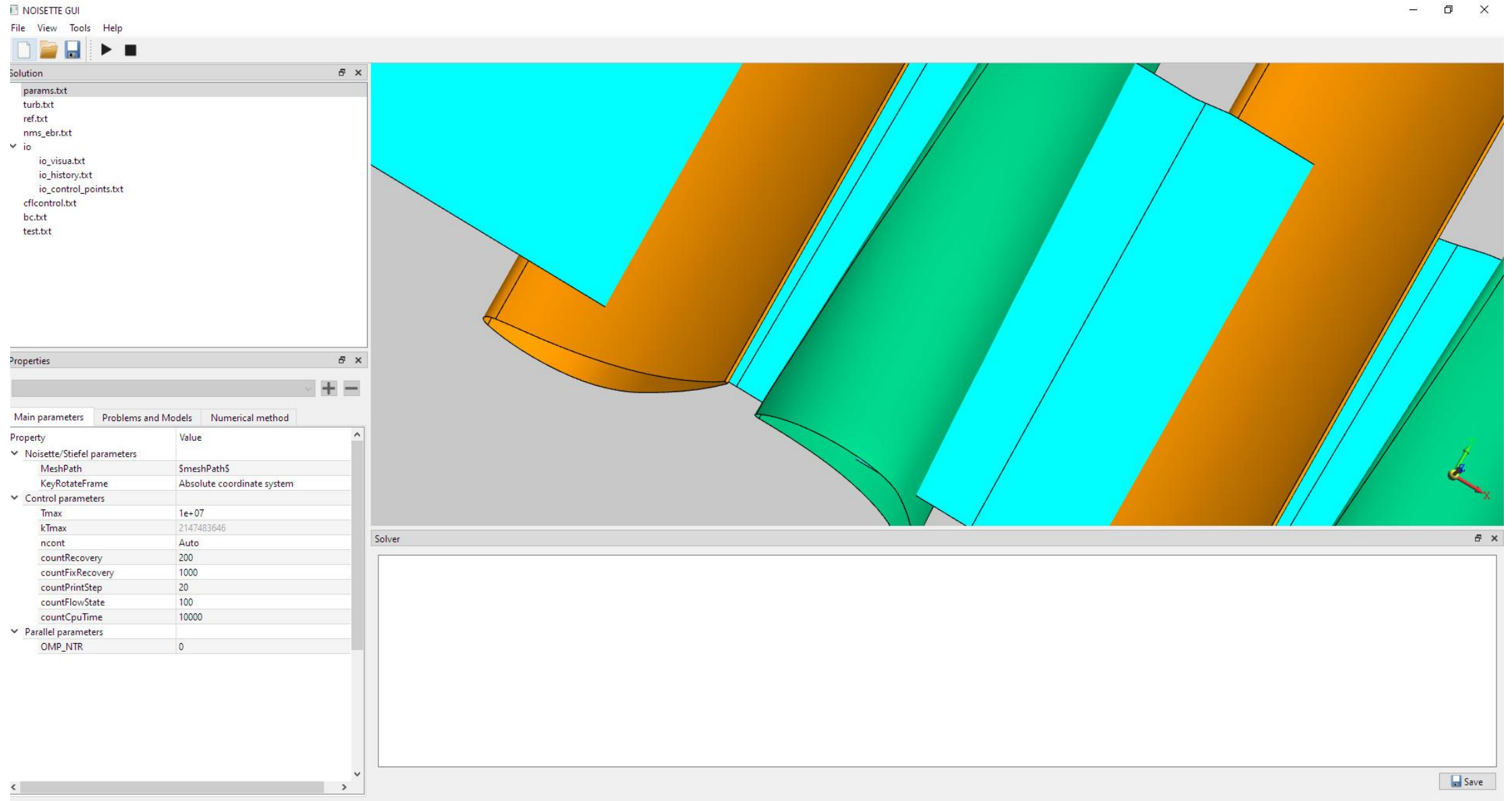
$P^* = 310$ кПа; $T^* = 400$ К;
Частота вращения $N = 12770.27$ об/мин
Сетки: 1.1M Numeca, 0.15M NOISEtte



	Numeca	NOISEtte
Outlet G, kg/s	4.19	4.12



- Переносимый (QT), проблемно-ориентированный, 3D движок – C3D



Метод погруженных границ

- Проведено полностью галилеево-инвариантное обобщение метода штрафных функций Бринкмана для сжимаемых течений.

Использована математическая модель пористой среды, которая обеспечивает корректность распространения акустических волн внутри твердого тела, в том числе и **подвижного**.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = -\chi \left(\frac{1}{\phi} - 1 \right) \frac{\partial \rho (u_j - U_{Bj})}{\partial x_j},$$

χ – характеристическая функция поверхности твёрдого тела ,

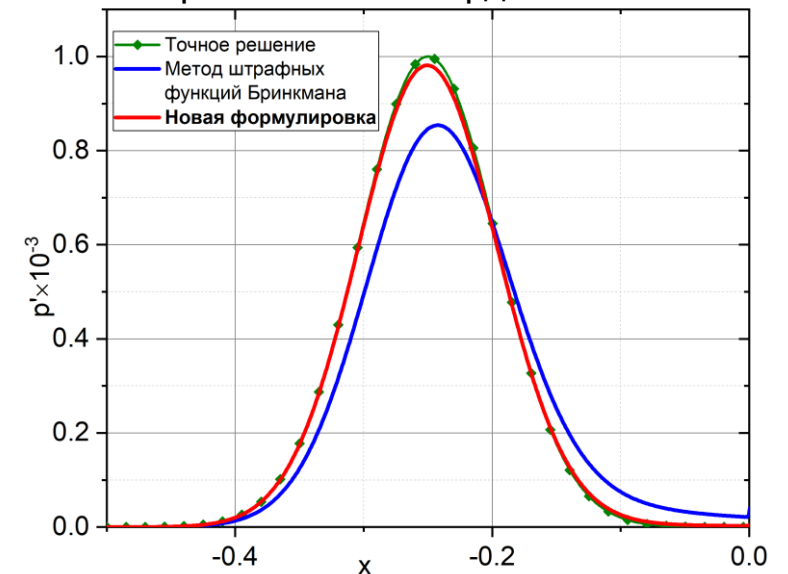
$0 < \phi \leq 1$ – коэффициент пористости,

U_B – скорость движения тела.

Реализованные варианты метода погруженных границ

- Обобщенный метод штрафных функций Бринкмана: несжимаемые и сжимаемые течения (дозвуковые), граничное условие Дирихле, адиабатическая или изотермическая поверхность.
- Характеристический метод штрафных функций: несжимаемые и сжимаемые течения, граничные условия Дирихле, Неймана и Робина, адиабатическая или изотермическая поверхность.

Профиль одномерной акустической волны, отраженной от твердой стенки

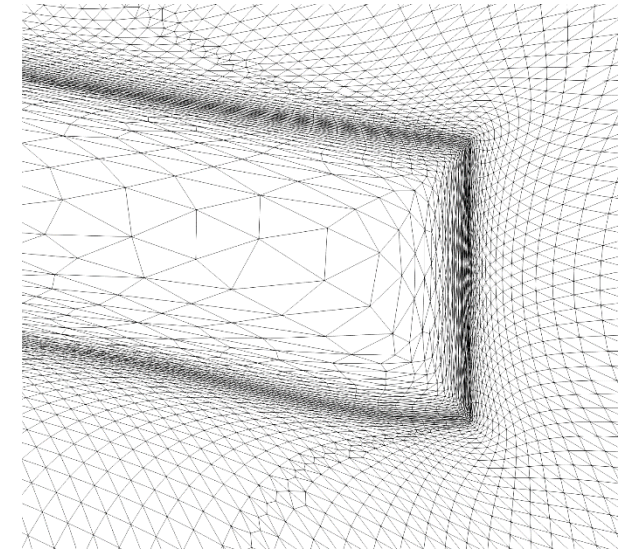
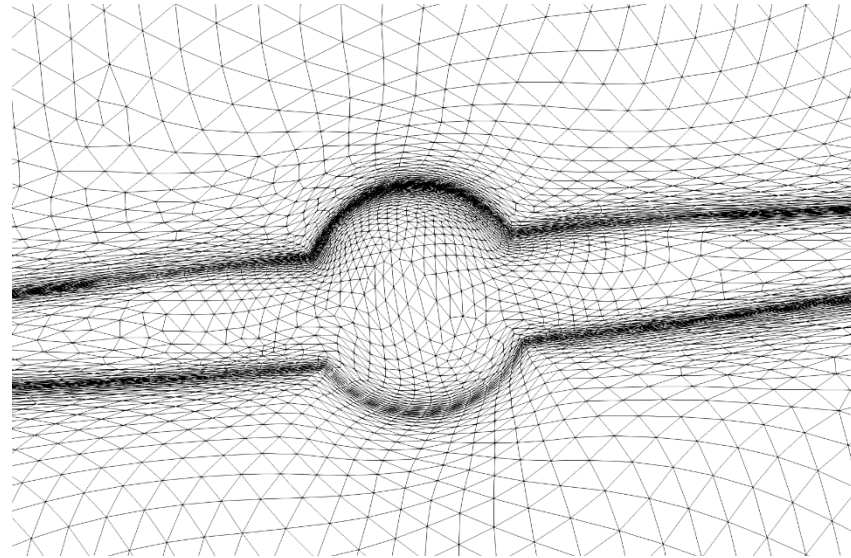
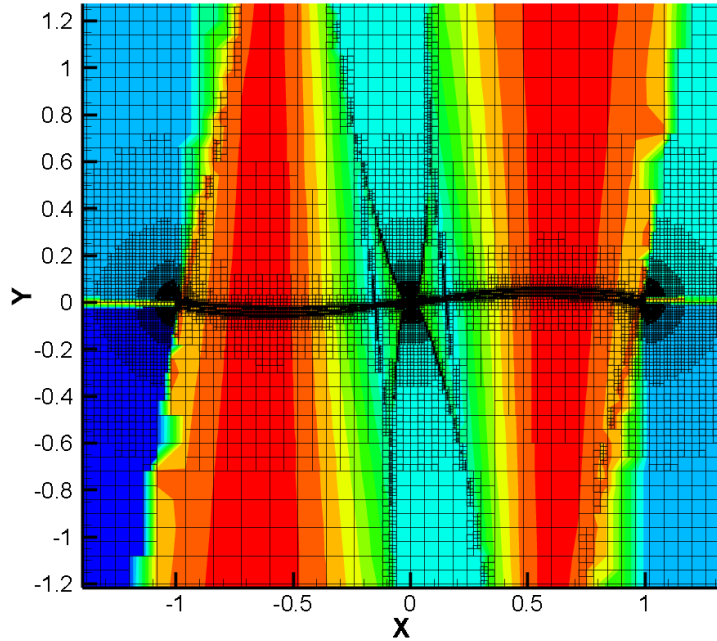


Сеточная адаптация

Учет особенностей геометрии. Тест в 2D – сечение винта дрона



Углы, тонкие кромки требуют разрешения. Адаптация должна выстраивать изотропные ячейки вблизи особенностей геометрии



Кривизна сечения винта хранится в вершинах восьмидерева.

Адаптация с учетом особенностей формы тела

Тело задано интерполяционной решеткой.

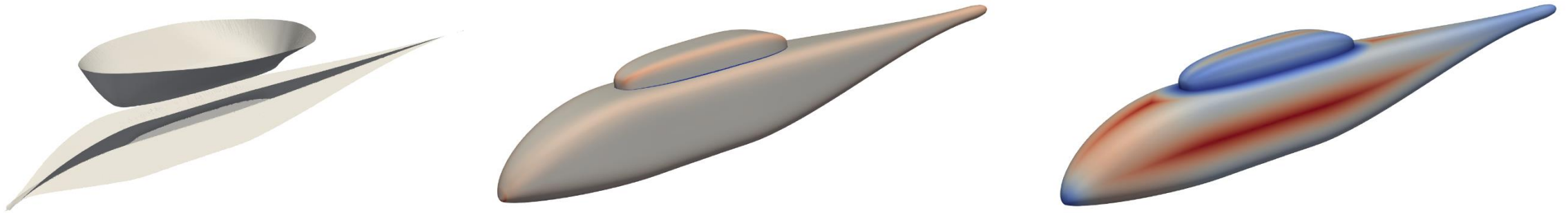
Теперь решетка содержит информацию о кривизне геометрии и расстоянии до медиальных осей.

Garanzha V., Kudryavtseva L. (2018) Hypoelastic Stabilization of Variational Algorithm for Construction of Moving Deforming Meshes // Communications in Computer and Information Science 974: 497-511.

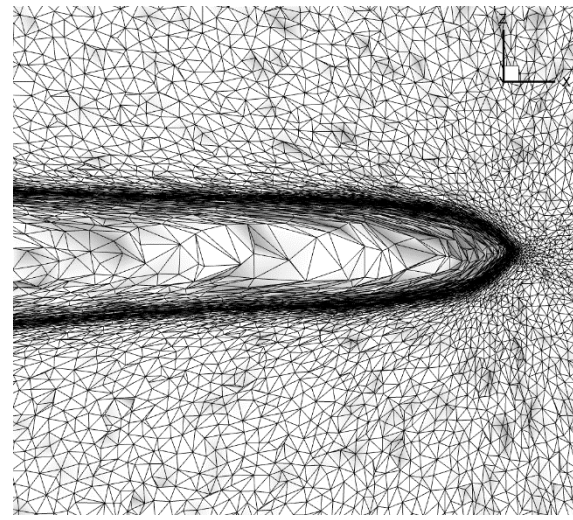
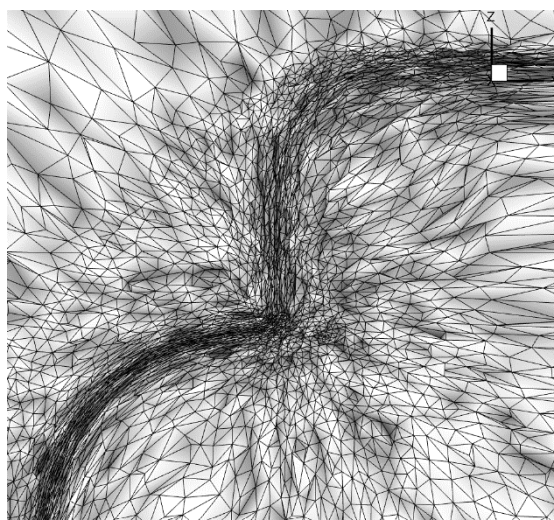
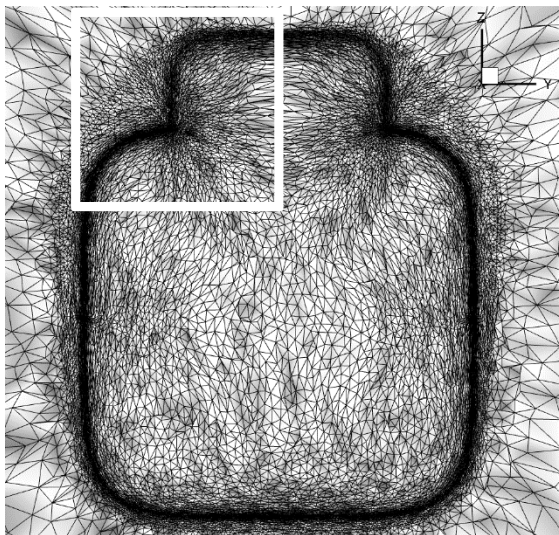
Суков С.А. (2020) Комбинированный алгоритм вычисления расстояния со знаком для задач численного моделирования физических процессов и визуализации движения твердых тел // Научная визуализация 2020, том 12, номер 5, с 86 – 101 2020, [DOI: 10.26583/sv.12.5.08](https://doi.org/10.26583/sv.12.5.08)

Сеточная адаптация

Препроцессинг адаптации: расчет кривизны по триангуляции*, построение медиальных осей**, расчет расстояний до медиальных осей, экстраполяция полученных значений в вершины восьмидеревя



Медиальные оси, Гауссова кривизна и расстояние до медиальных осей для фюзеляжа вертолета

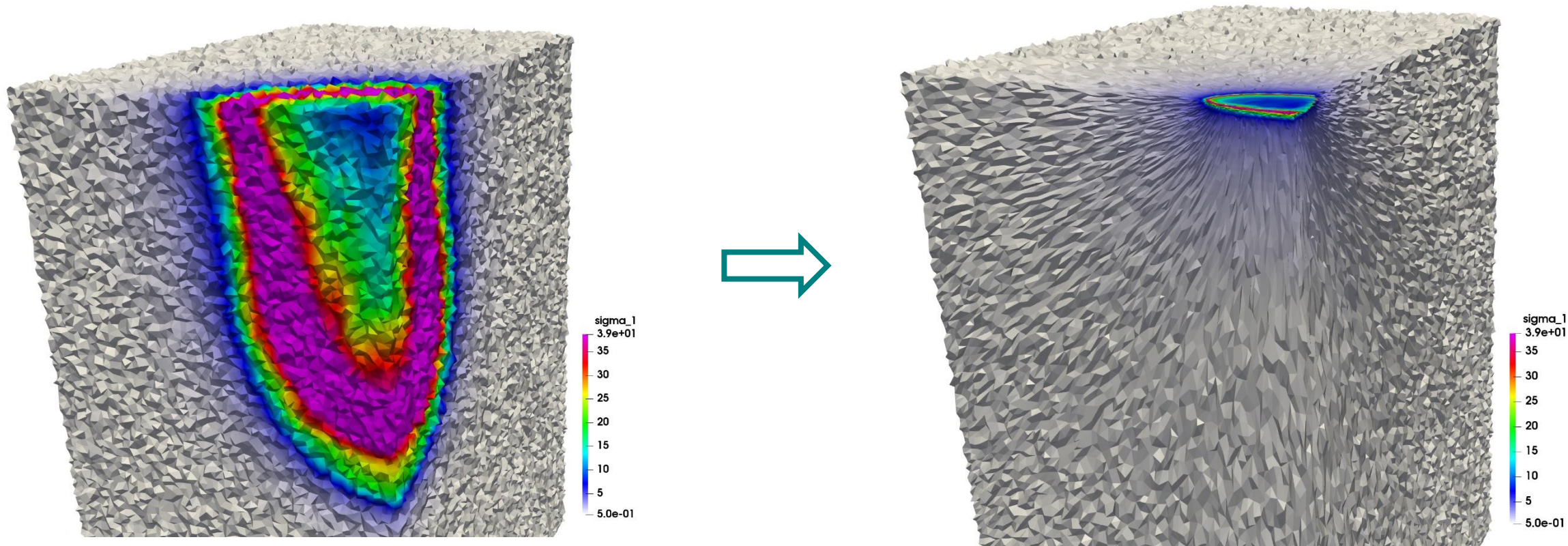


Фрагменты адаптивной сетки. На углах сетка изотропна

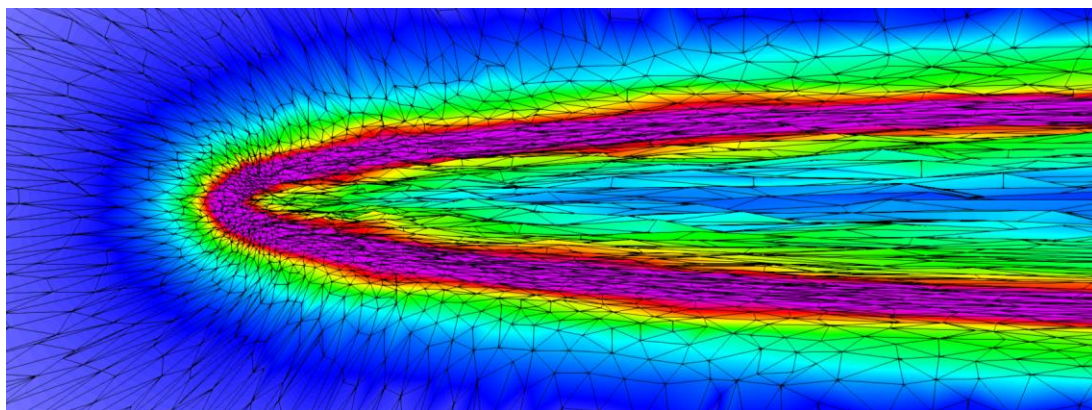
* Garimella, Rao. Curvature Estimation for Unstructured Triangulations of Surfaces. 2003

*** Nina Amenta, Sunghee Choi, and Ravi Krishna Kolluri. The power crust. In: the sixth ACM symposium. Ed. by David C. Anderson and Kunwoo Lee. 2001, pp. 249–266

Сеточная адаптация



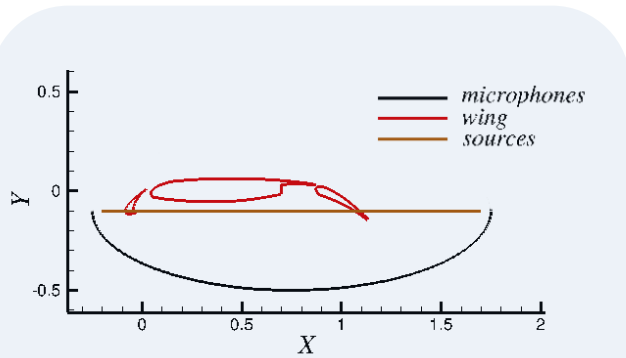
Адаптация к форме эллипсоида. Образ и прообраз эллипсоида при сильном сгущении



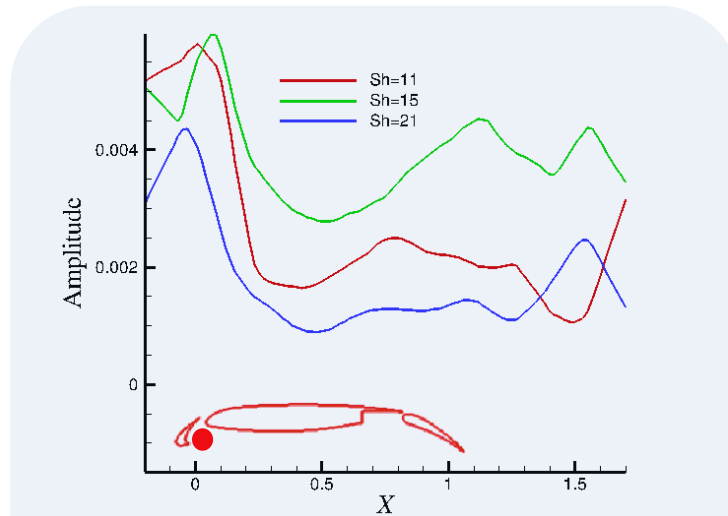
Сечение адаптивной сетки при сгущении к эллипсоиду

Экстрагирование физической информации: Численный бимформинг

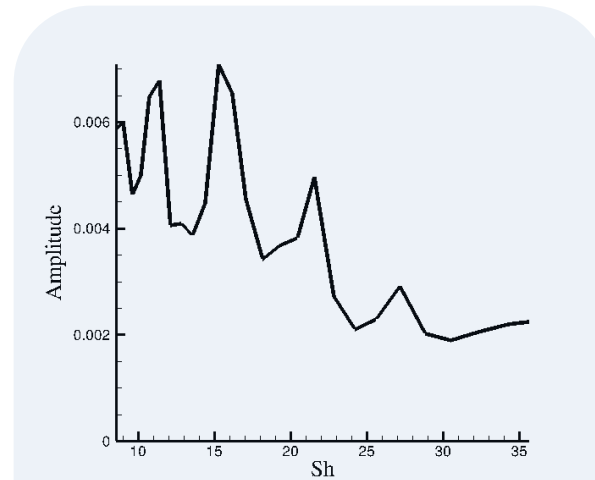
- Локализация акустического источника и определения его спектральных характеристик позволяет выявить полосы частот с повышенной амплитудой шума и примерно локализовать его источники



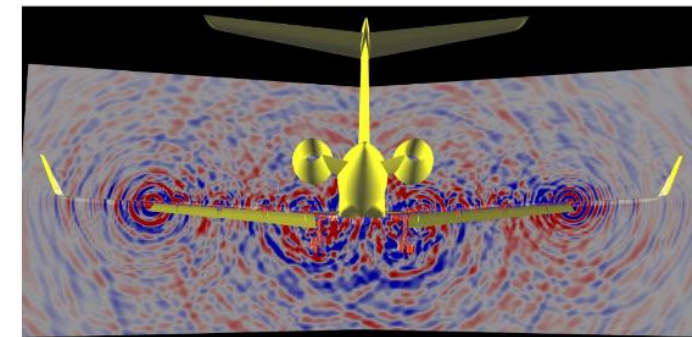
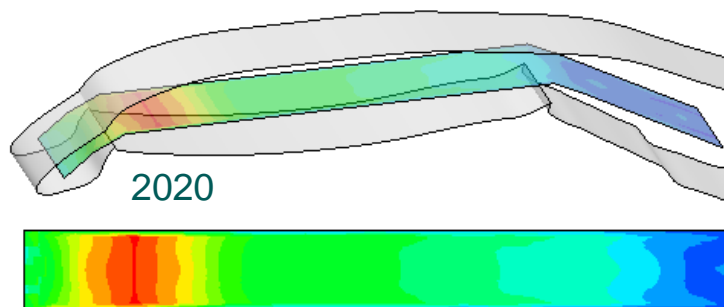
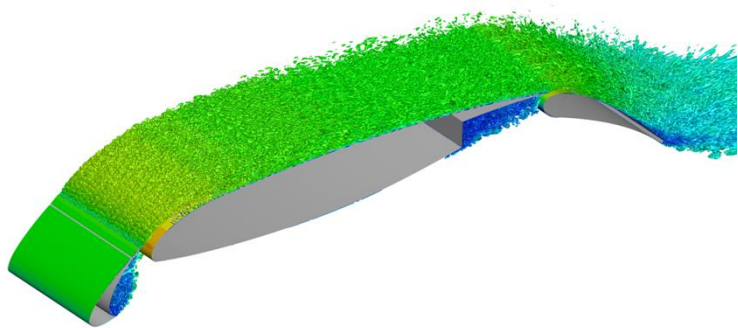
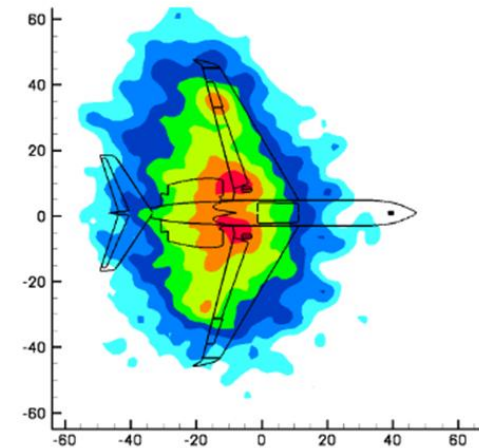
Расположение линий источника и микрофонов относительно крыла



Амплитуда вдоль крыла, $St = 15, 21$
Заметен подъем амплитуды в районе красной точки при $St = 21$



Зависимость максимальной амплитуды источника от частоты



Экстрагирование физической информации: Разложение по динамическим модам

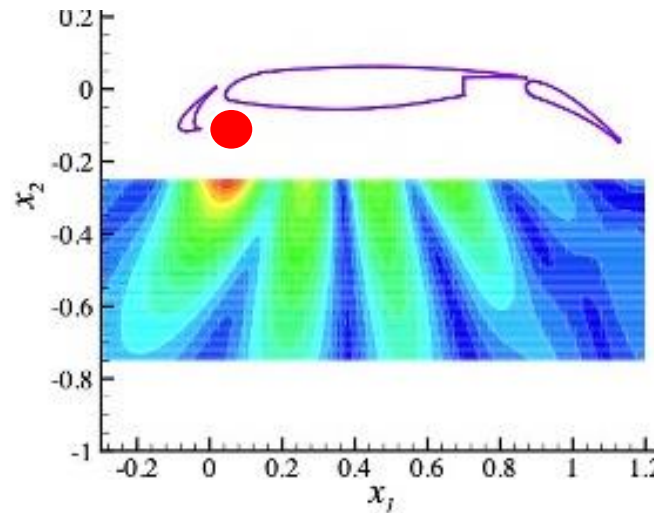
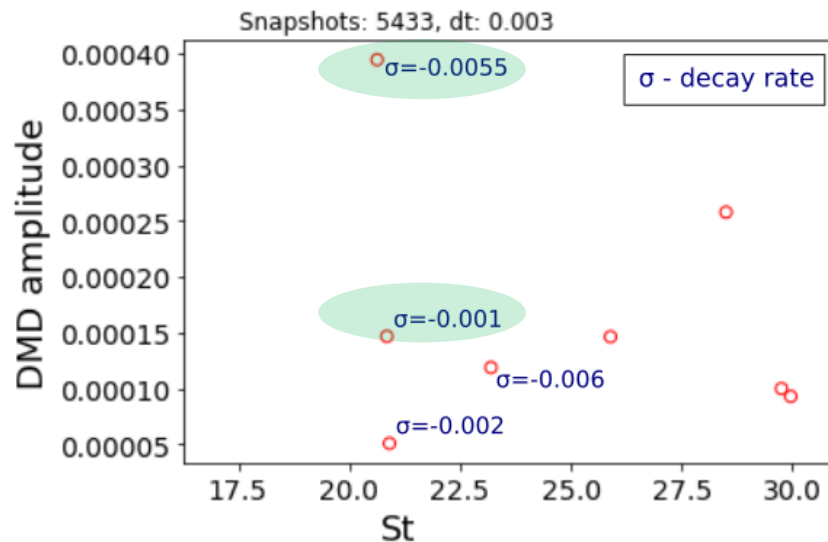
Методы декомпозиции пространственно-временных полей данных:

- разложение по ортогональным модам (Proper Orthogonal Decomposition / POD)
- разложения по динамическим модам (Dynamic Mode Decomposition / DMD)

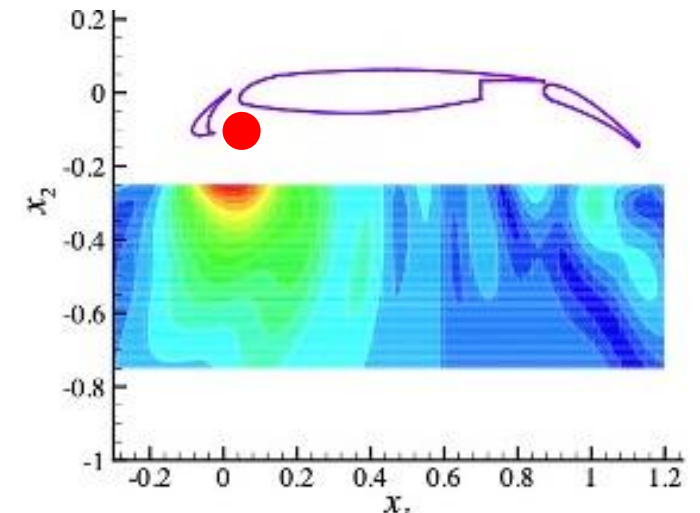
позволяет подтвердить сильно шумящие частоты и уточнить расположение источников шума и направления его распространения

Моды характеризуются пространственной **функцией амплитуды** $P_0(x)$ в некоторой области (прямоугольник под профилем)

Каждая мода имеет по времени свою **частоту ω** и **декремент затухания σ** : $P(t, x) = e^{\sigma t} e^{i\omega t} P_0(x)$, $\sigma \leq 0$, $\omega = 2\pi St$



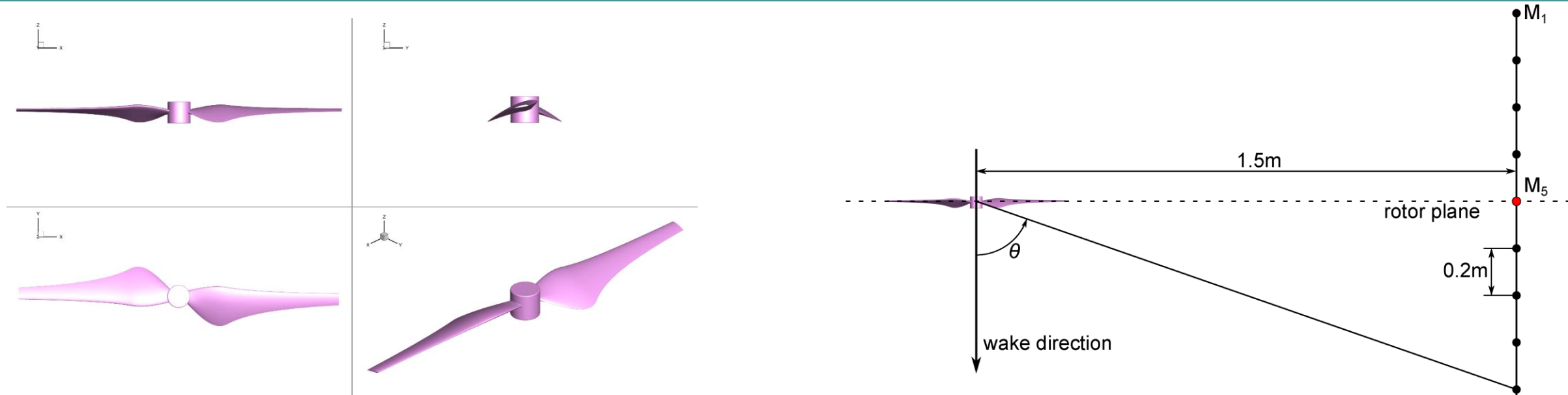
Мода для $St=17.4$



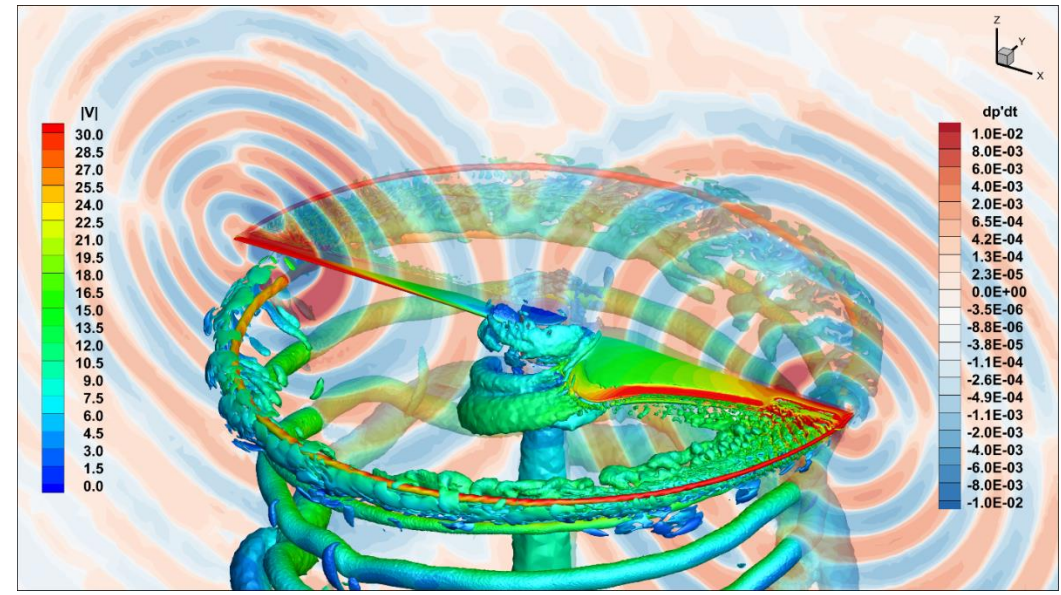
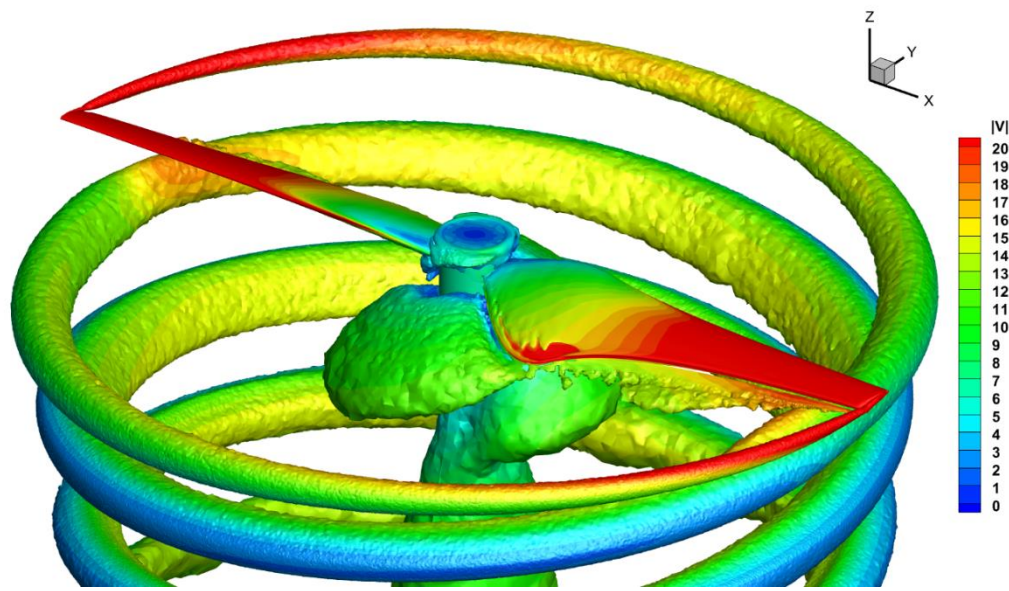
Мода для $St=21.1$

Амплитуда, частота (St) и декремент затухания (σ) некоторых DMD мод в рассматриваемом прямоугольнике

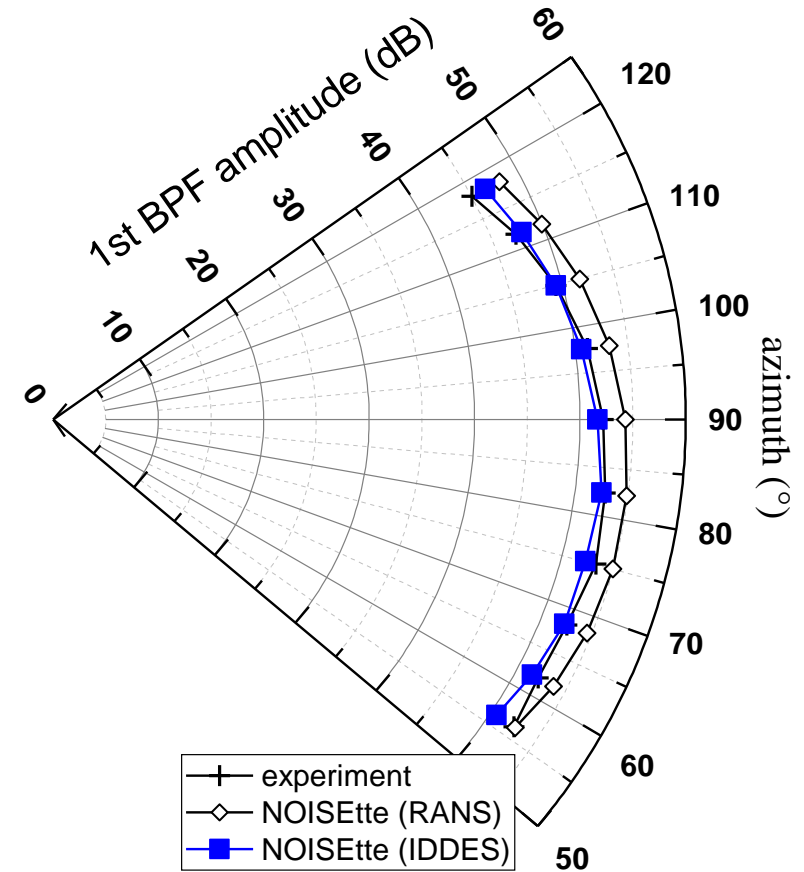
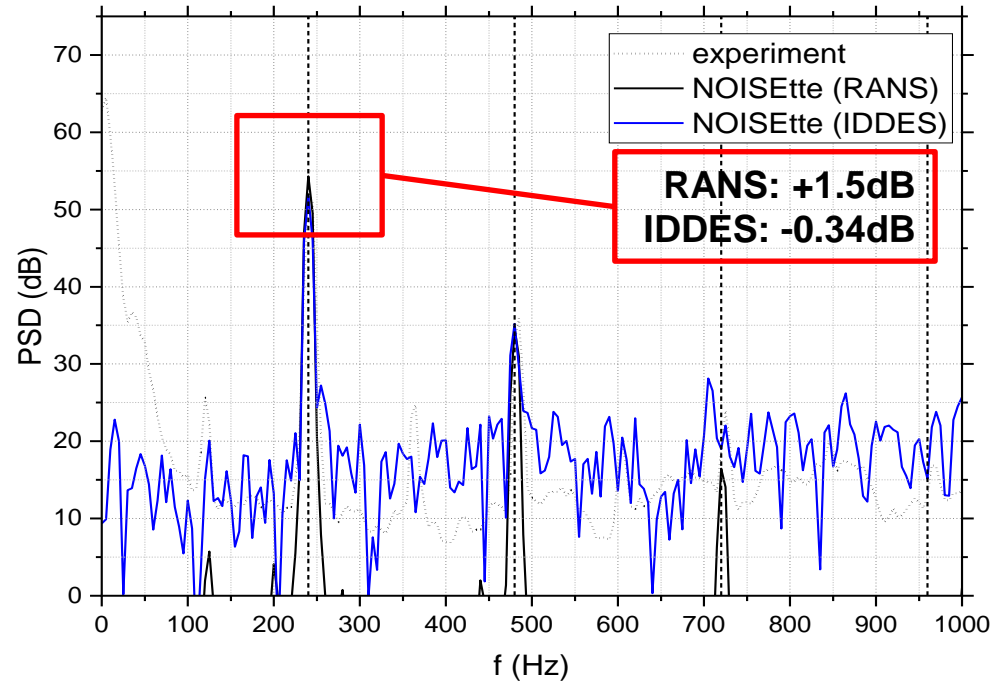
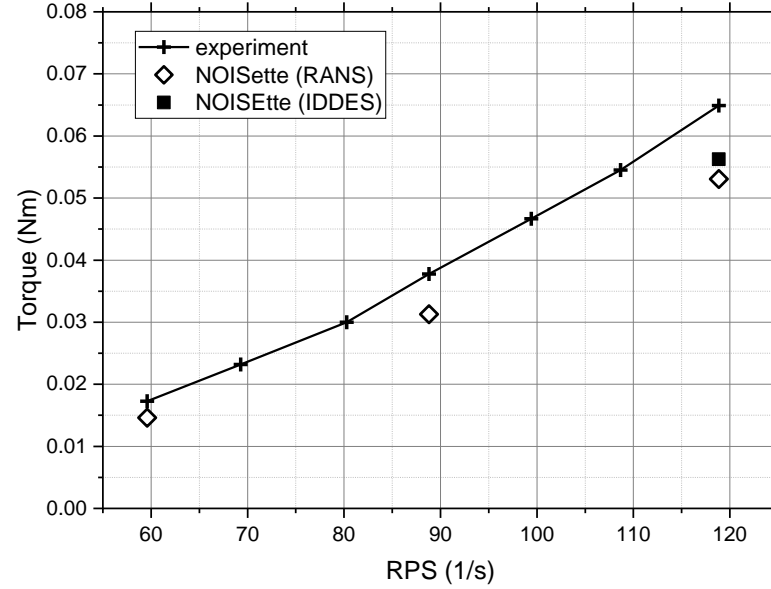
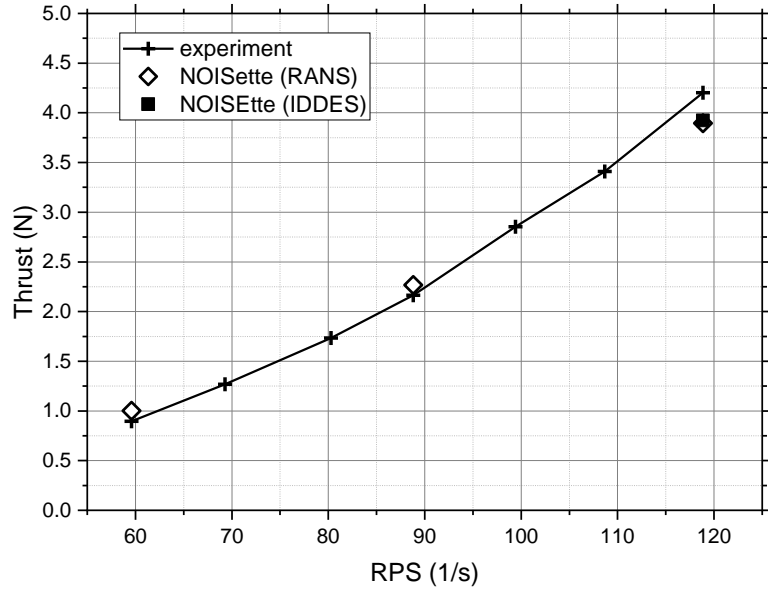
Приложения 2021: Пропеллер дрона



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

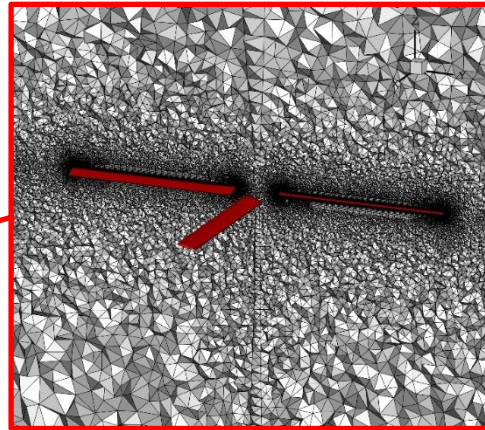
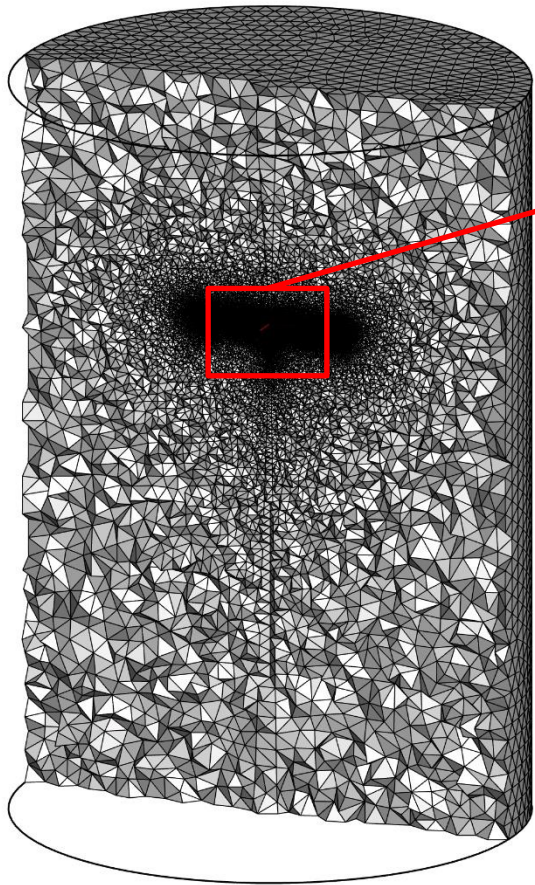


Приложения 2021: Пропеллер дрона

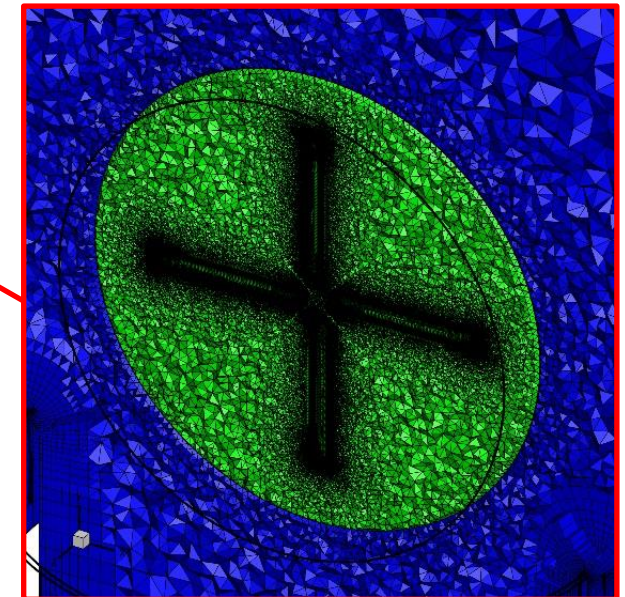
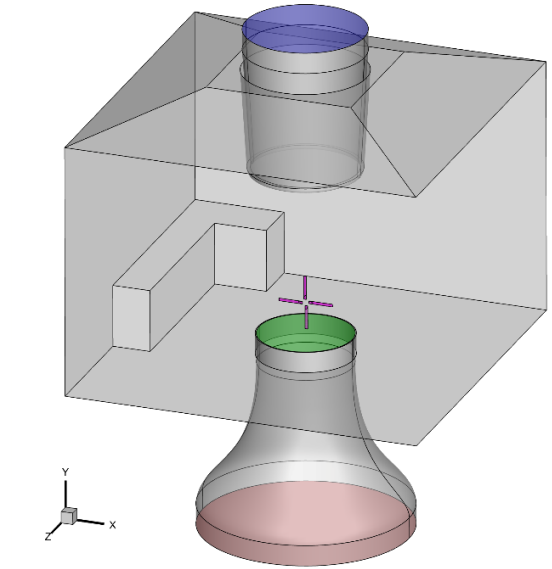
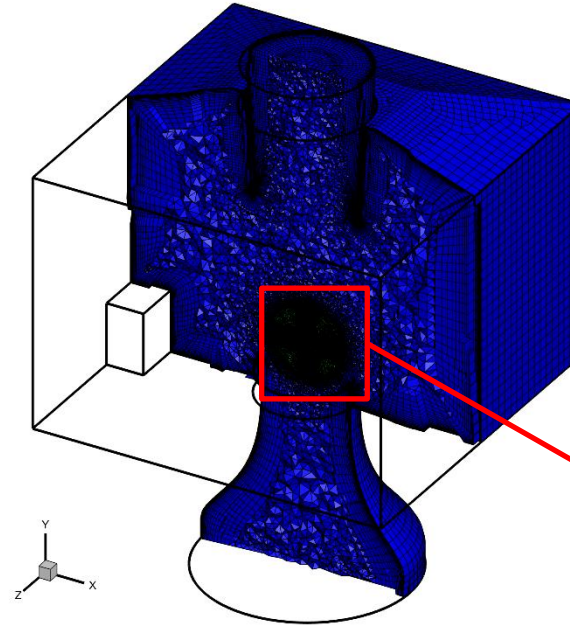


Приложения 2021: Изолированный винт vs. АДТ

Сравнение обтекание **изолированного** винта и винта в **АДТ Т-105** в режиме косо́го обтекания (режим горизонтального полета) совместно с **НИО-5 ЦАГИ**

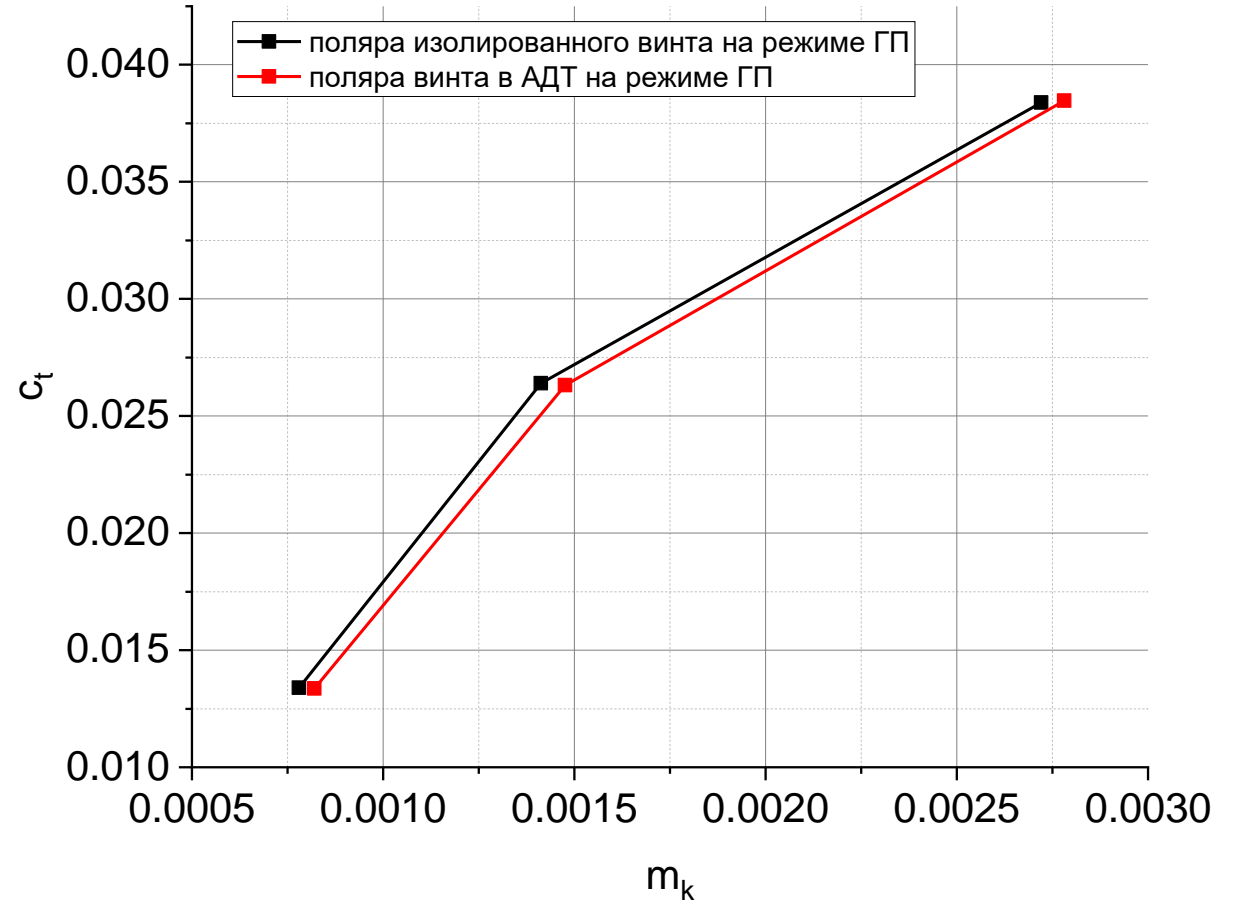
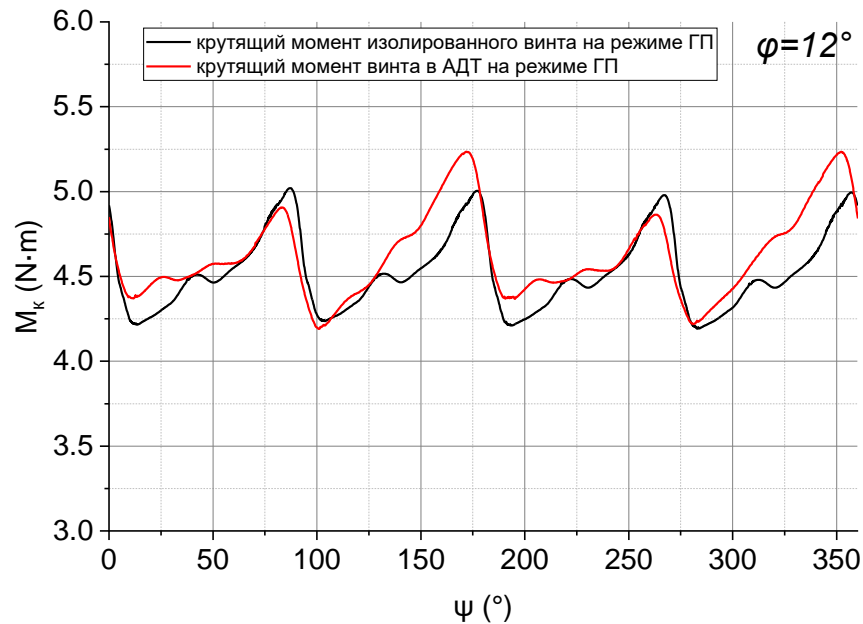
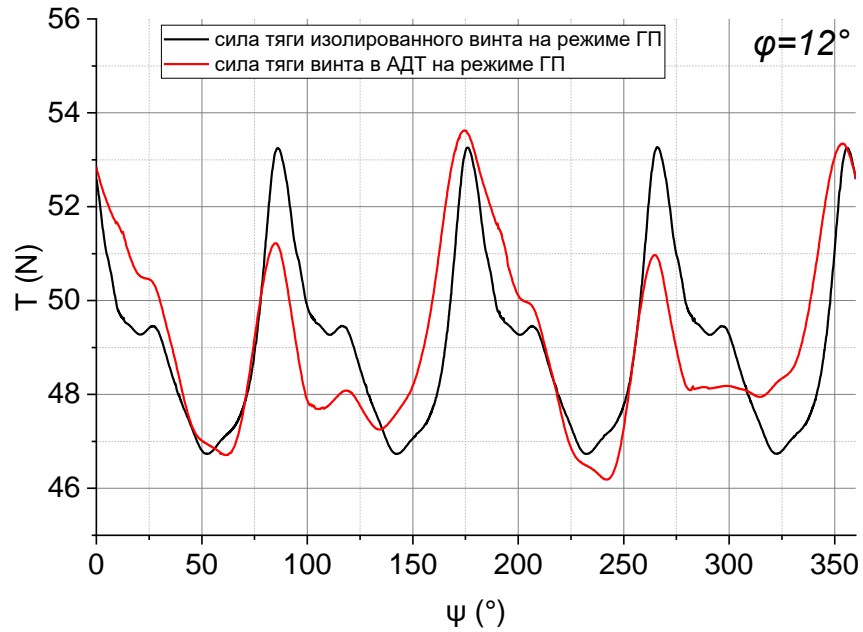


VS



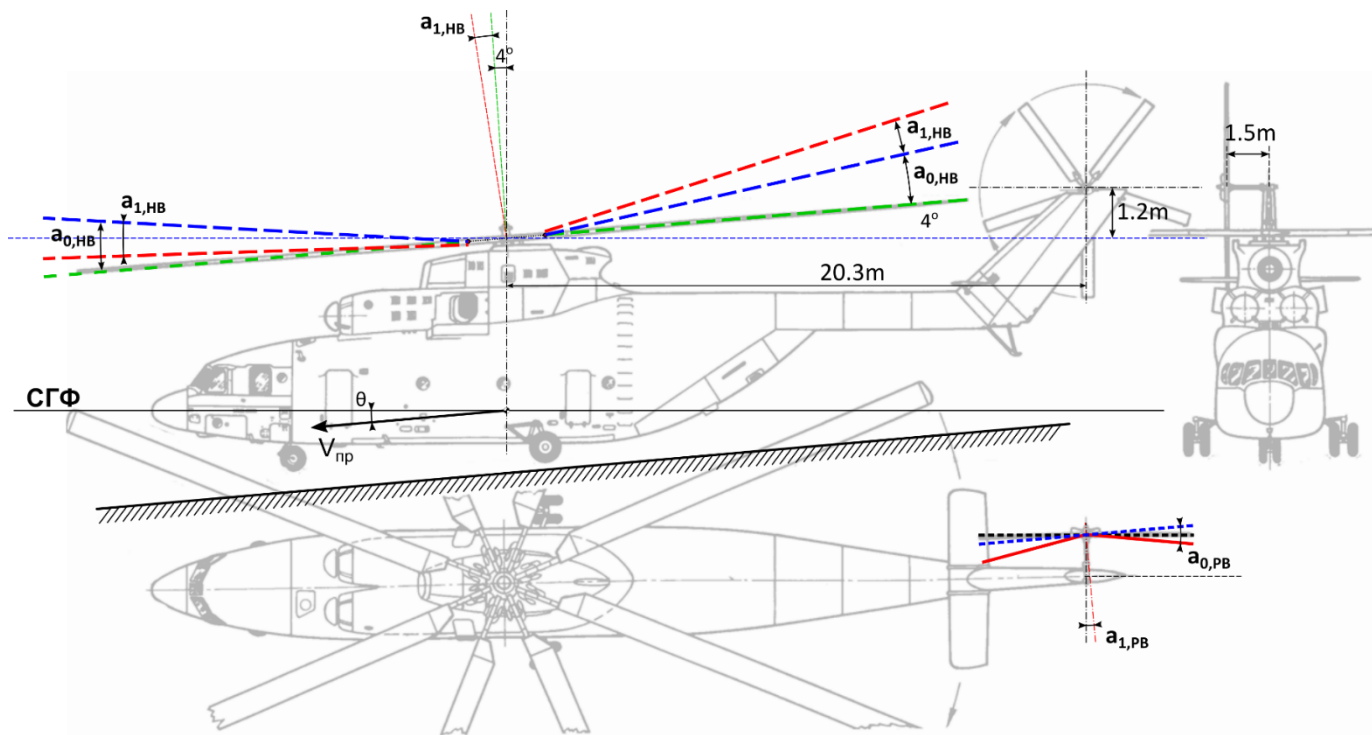
Приложения 2021: Изолированный винт vs. АДТ

Эволюция тяги/момента в течении оборота винта



Поляра винта по осредненным по обороту коэффициентам тяги и крутящего момента

Приложения 2021: Валидация на винтах Ми-26



	reference	расчет	разница
T HB, кгс	52045	51346	-1.3%
Mу, HB, кгс·м	76858	81202	5.6%
T PB, кгс	4035	3909	-3.1%

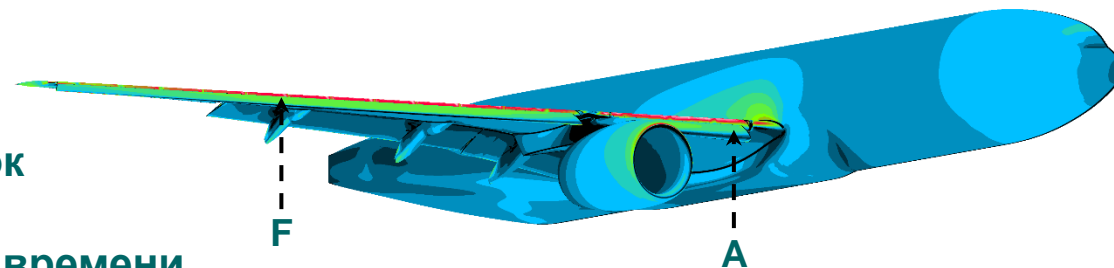
	HB	PB
R, м	16	3.805
b, м	0.8	0.47
N	8	5
$V_{tip} = \omega R,$ м/с	220	227
Re	11.6×10^6	7×10^6

HB: частота вращения 2.19 об/с, ЧСЛ 17.51 Гц
 PB: частота вращения 9.48 об/с, ЧСЛ 47.39 Гц

В процессе – акустика...

Приложения 2021: 4th AIAA CFD High Lift Prediction Workshop

- Тестирование кода на обтекании геометрии NASA High Lift Common Research Model (10%-scale)
- Условия эксперимента: $M = 0.2$, $Re = 5.49 \times 10^6$, $\alpha = 7.05^\circ$
- Последовательность гибридных неструктурированных сеток
- RANS SA, схема EBR5 PL (Prismatic Layers), неявный шаг по времени

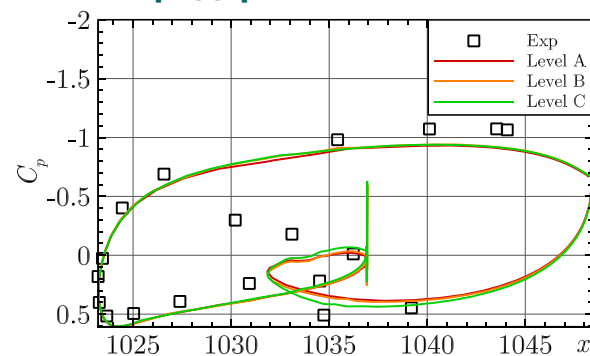


Интегральные характеристики:

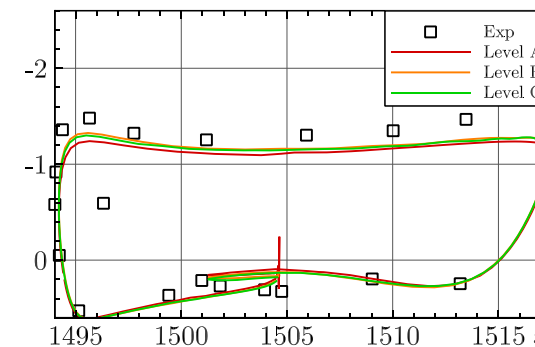
	Mesh nodes	CL	Error	CD	Error
Exp		1.77862		0.18671	
Level A	12 332 217	1.735	2.45%	0.1785	4.40%
Level B	32 303 132	1.764	0.82%	0.183	1.99%
Level C	91 981 488	1.76	1.05%	0.1835	1.72%

Коэффициент давления в сечениях:

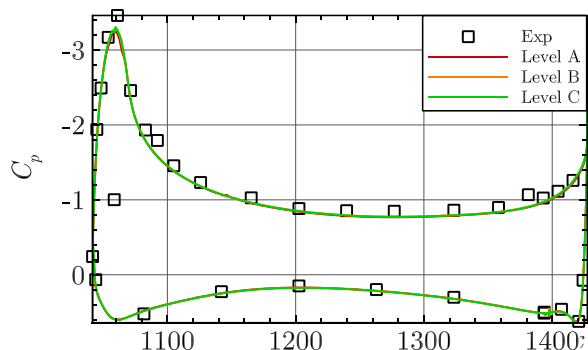
Предкрылок: Сечение A



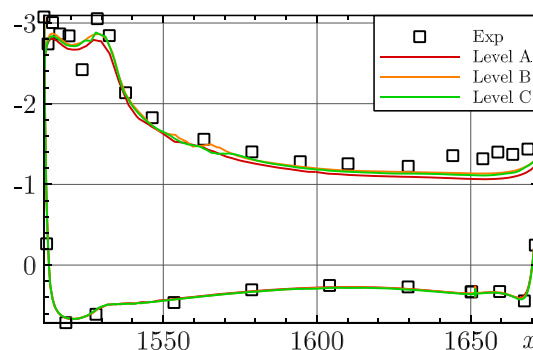
Предкрылок: Сечение F



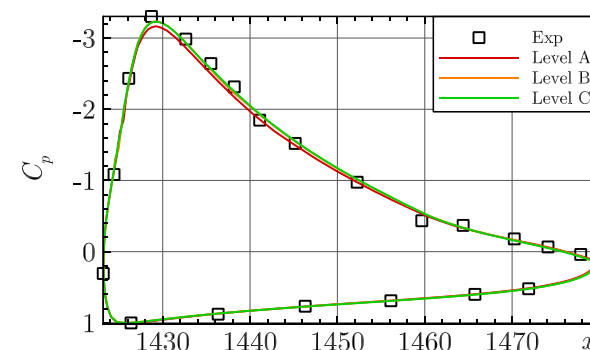
Крыло: Сечение A



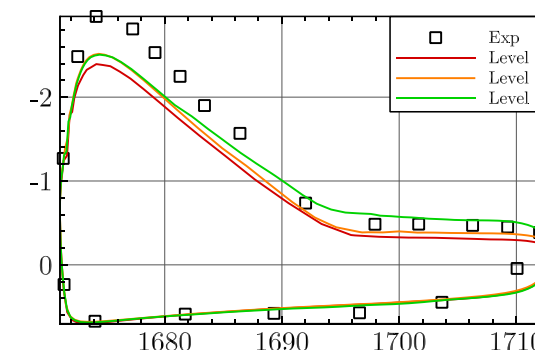
Крыло: Сечение F



Закрылок: Сечение A

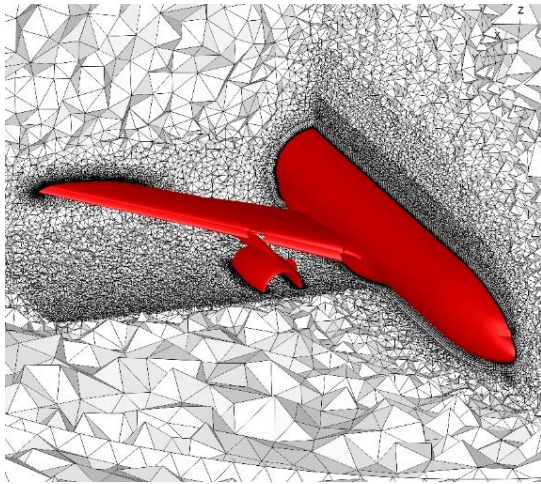


Закрылок: Сечение F

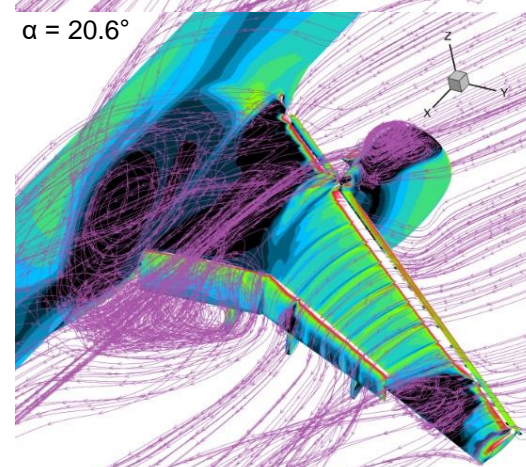
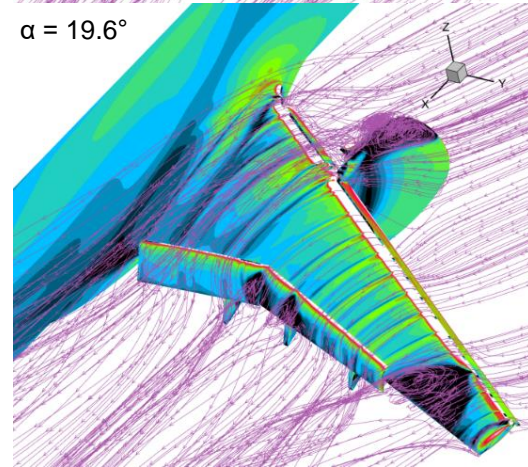
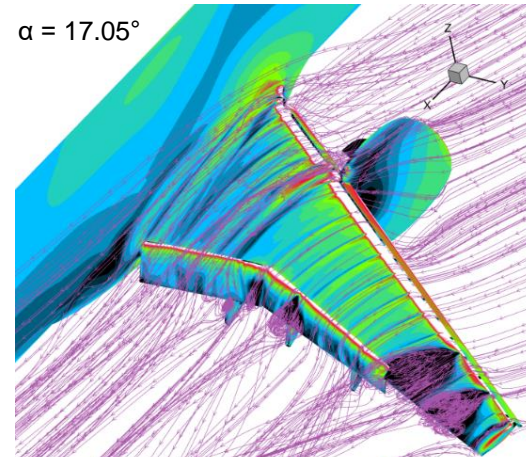
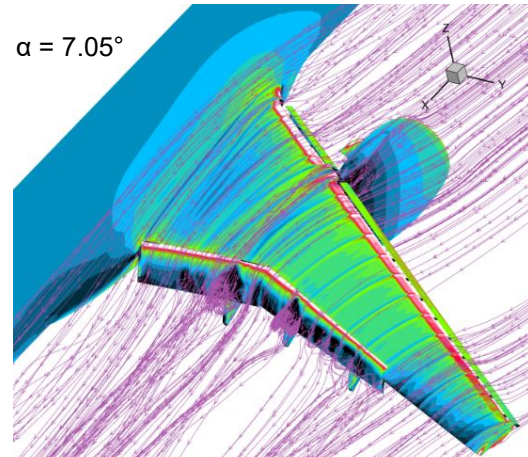


Приложения 2021: 4th AIAA CFD High Lift Prediction Workshop

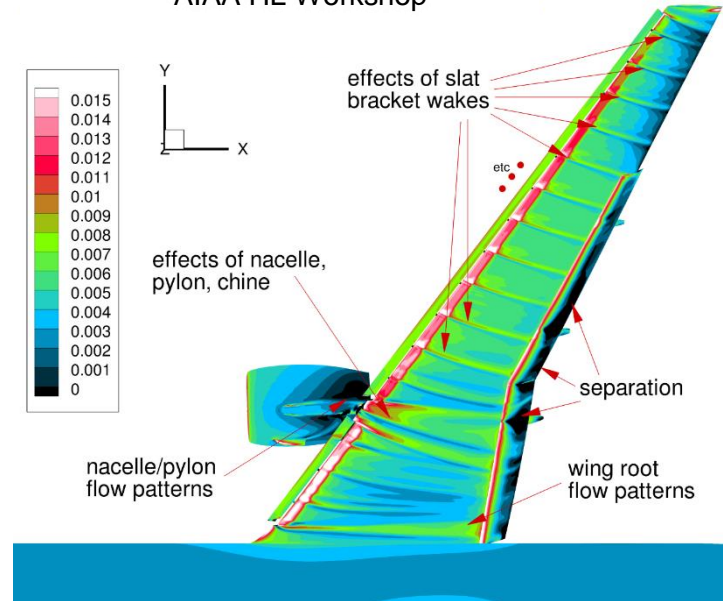
Модель CRM HL, 4th AIAA CFD High Lift Prediction Workshop, $M=0.2$, $Re = 5.5E6$



Сеточная модель
от 12 до 92 млн узлов

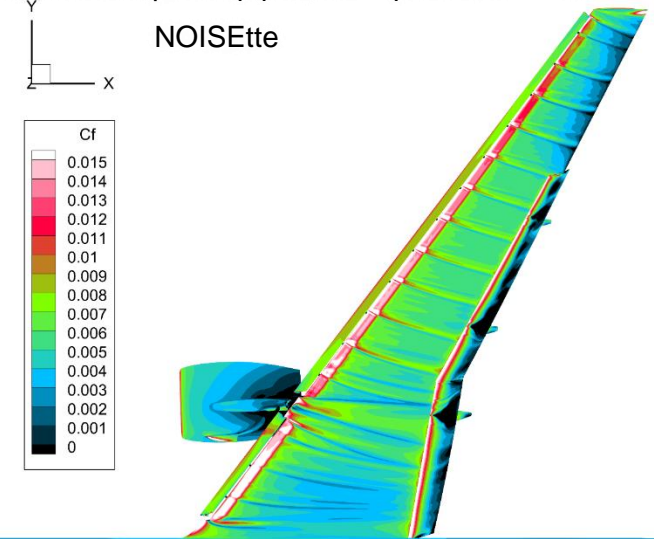


AIAA HL Workshop



Сравнение с численным решением AIAA
HL Workshop, коэффициент трения, $\alpha = 7.05^\circ$

NOISEtte



Приложения 2021: аэродинамика прототипа сверхзвукового пассажирского самолета

Начальный этап исследований, нацеленных на оценку шума планера проектируемого СПС на посадке

Длина фюзеляжа: 45 м

Размах крыла: 20 м

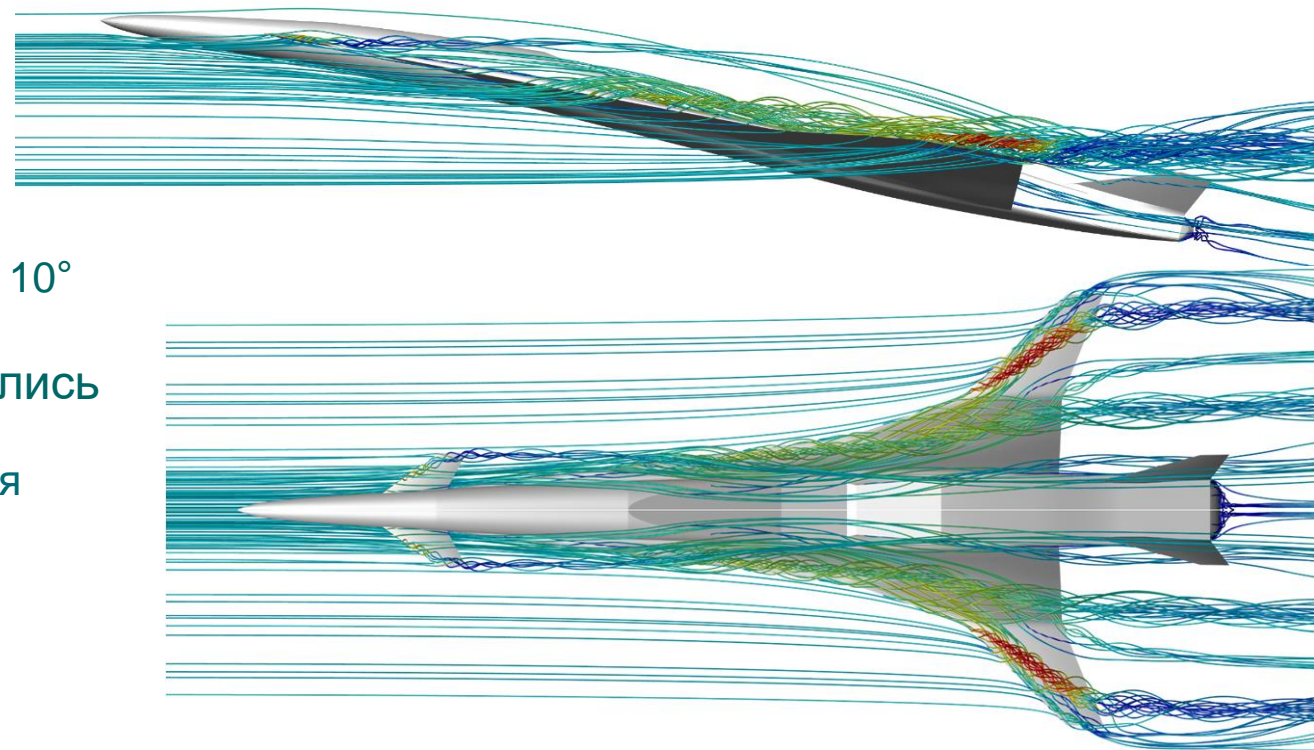
Площадь крыла: 159 м²

Параметры задачи: $M = 0.196$, $Re = 4.2 \times 10^6$ ($L_{ref} = 1$ м), $\alpha = 10^\circ$

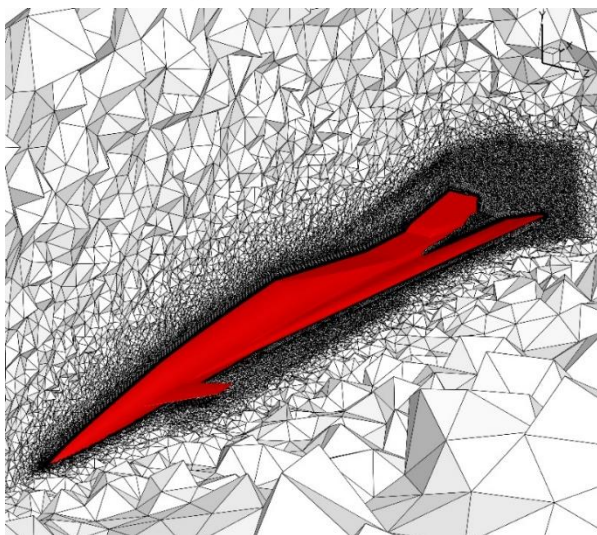
Метод: RANS SA, схема EBR5 PL

Механизация крыла и влияние двигателя не учитывались

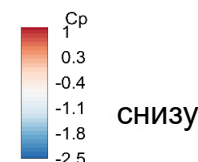
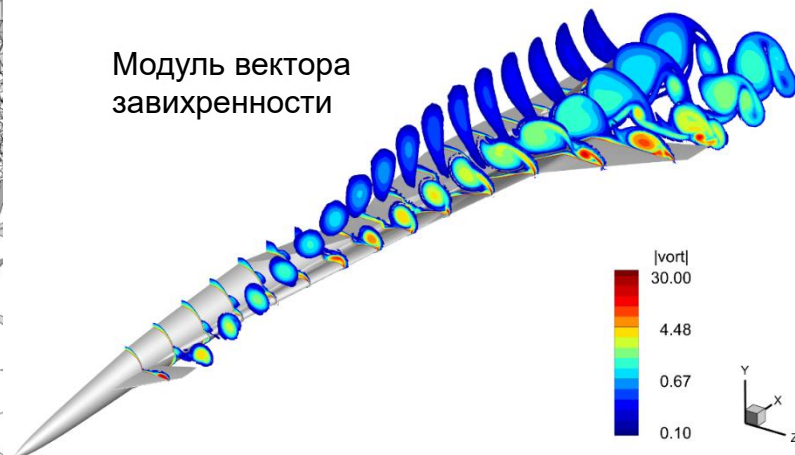
Работа проведена в рамках Программы создания и развития
НЦМУ «Сверхзвук» на 2020—2025 годы
при финансовой поддержке Минобрнауки России
(Соглашение от 8 декабря 2020 г. № 075-11-2020-023).



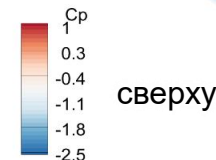
Сеточная модель



Модуль вектора
завихренности



снизу



сверху

Коэффициент давления
на поверхности



Код NOISEtte в 2021 году почти не развивался:

(как всегда) отложена разработка документации,
отложен глобальный рефакторинг,
отложено внедрение модульной архитектуры,
отложен выпуск сокращенной учебной версии, ...

Развивать коды в науке вообще становится затруднительно

Зато мы вносим вклад в укрепление России в рейтингах мировой научной макулатуры