

NOISEtte 2023: эволюция в сторону...



ВГД выходные 2023

Код NOISEtte:

- CFD & САА
- Вихреразрешающее моделирование
- Схемы повышенной точности
- Неструктурированные сетки
- MPI + OpenMP + OpenCL
- FAS-MG ускоритель

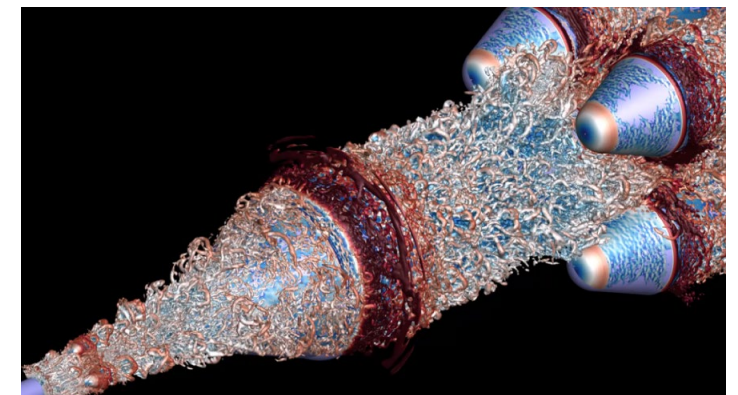
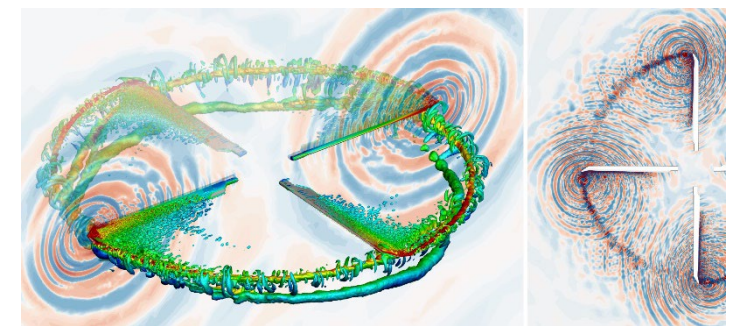
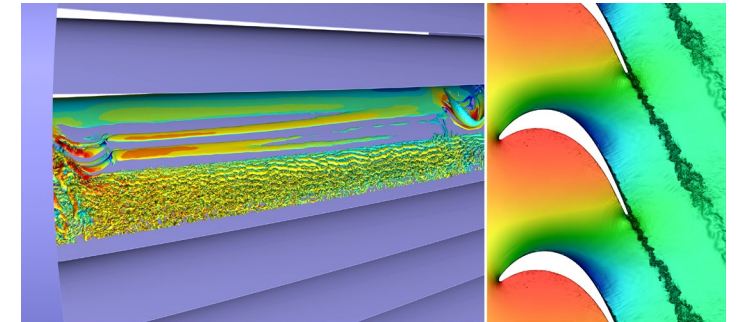
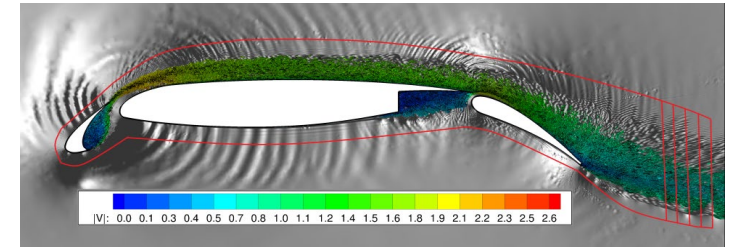
<http://caa.imamod.ru/noisette>



Сектор вычислительной аэродинамики и аэроакустики
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН
<http://caa.imamod.ru>

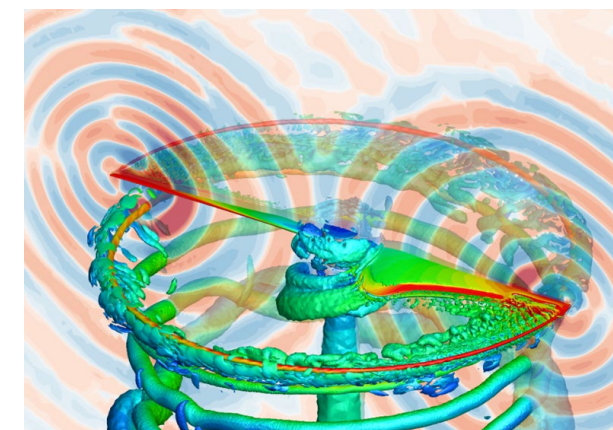
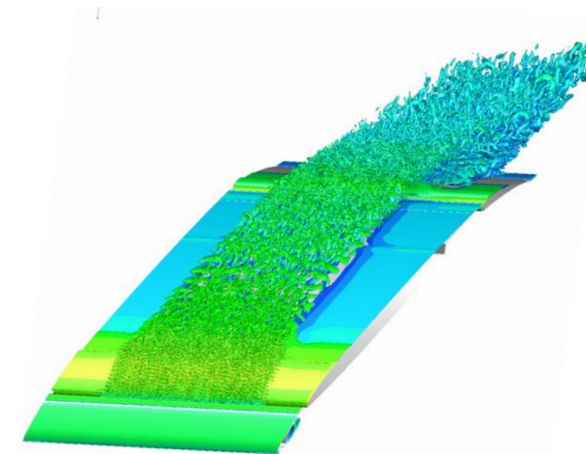
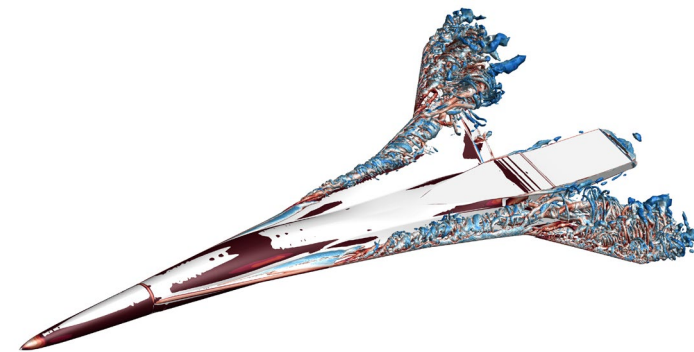
NOISEtte – CFD код для исследований и для приложений

- C++; MPI, OpenMP, OpenCL; Linux, Windows, ...
- Параллельные гетерогенные вычисления CPU+GPU
- Схемы повышенной точности
- Неструктурированные смешанные сетки
- Турбулентность: RANS, LES, DES, STG, Sponge, ...
- Ротор-статор интерфейсы Sliding, Mixing Plane
- Акустика в дальнем поле – FW/H
- Multigrid FAS-MG



Отличительные особенности

- **Специализация: ресурсоемкие вихреразрешающие расчеты**
- **Платформа для разработки численных методов и моделей**
Vertex- и Cell-Centered, схемы EBR, DG, SD, MPS, Poly, FS,... WENO, TVD,...
библиотека точных решений CoESo <https://caa.imamod.ru/coleso>
- **Гибридные подходы DES с GAM свойствами**
Альтернативные модели LES и SGS (S3-PQR, delta LSQ)
- **Неявная схема + FAS MG для ускорения RANS**
- **HPC всеядность**
CPU Intel, AMD, IBM, ARM, Эльбрус, ...
GPU NVIDIA, AMD, Intel, ...
- **Параллельный акустический постпроцессор FW/H**



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

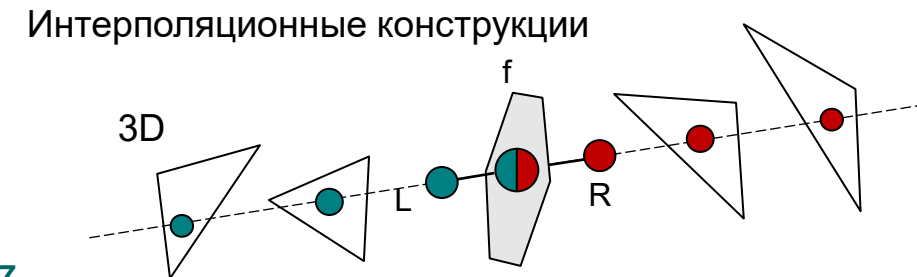
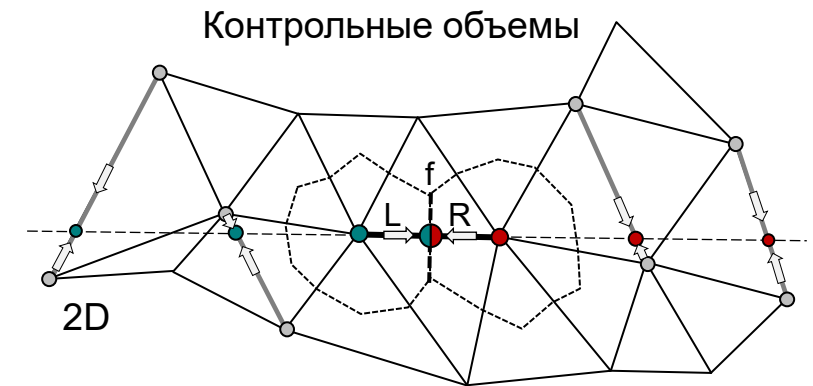
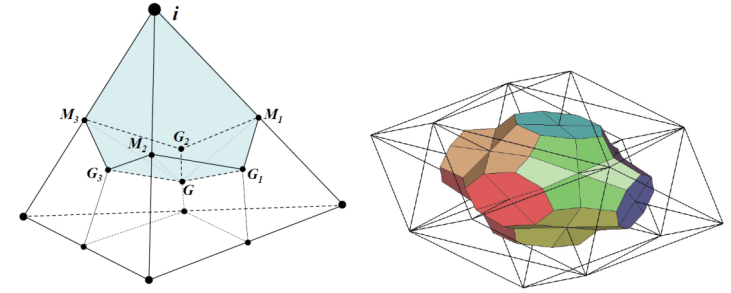
Bakhvalov P., Abalakin I., Kozubskaya T. IJNMF 81(6), 331–356, 2016.
<https://doi.org/10.1002/flid.4187>

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 вместо 27
- важно для GPU - в якобиане можно держать только смежность по ребрам

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



Математические модели и численные методы

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

- **DES, DDES, IDDES**

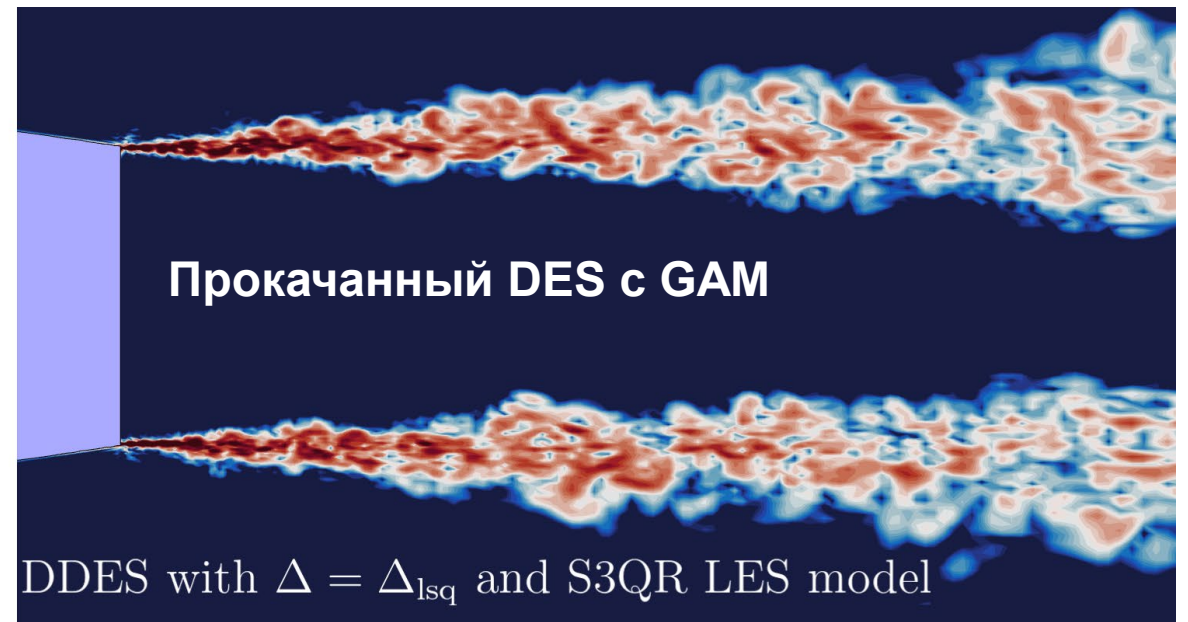
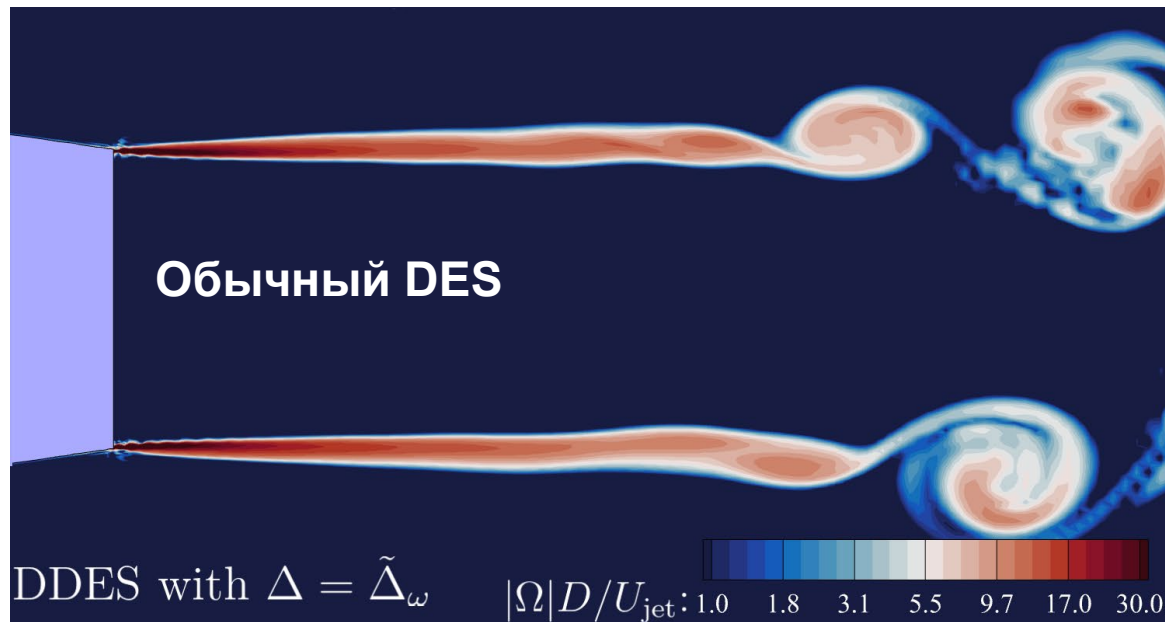
M. Shur, P. Spalart, M. Strelets, A. Travin. FTAC. 95 (2015) 709 – 737. <https://doi.org/10.1007/s10494-015-9618-0>

- **LES модели Smag, Wale, Sigma, ..., S3**

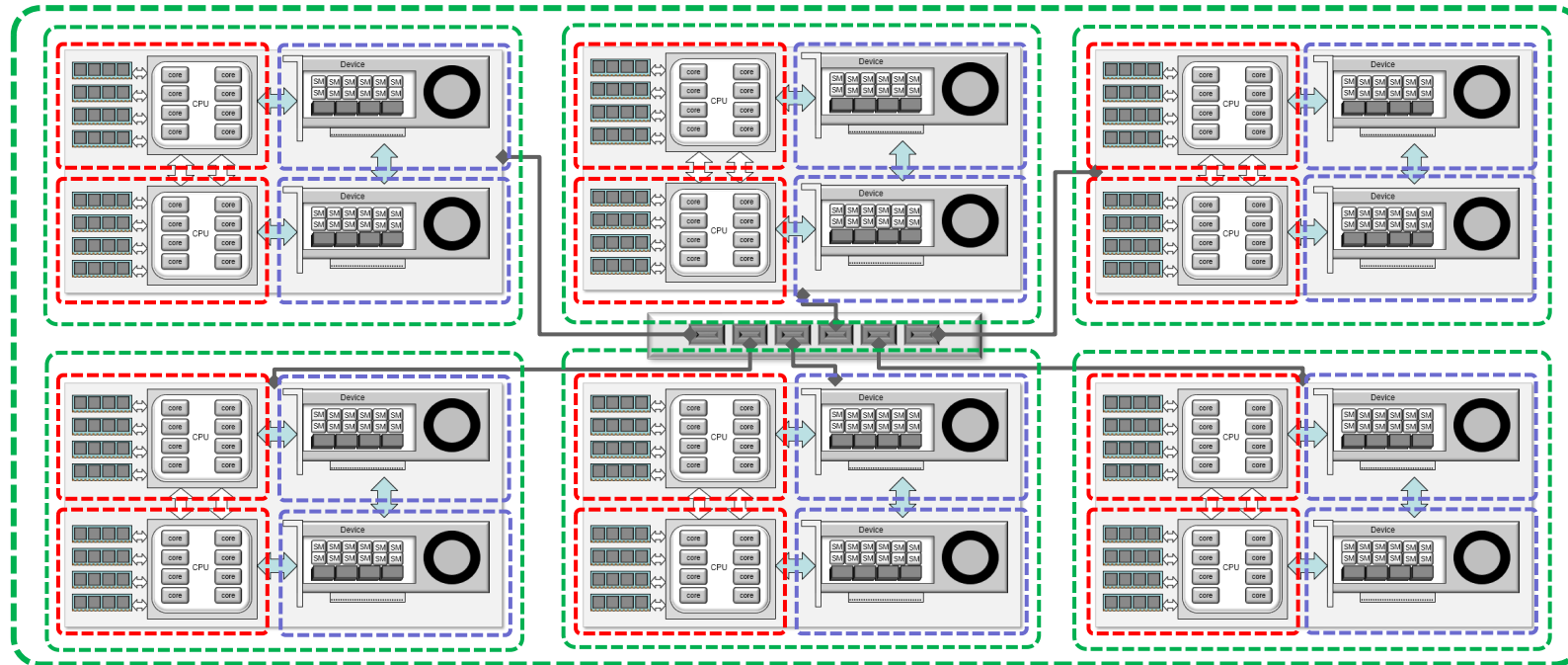
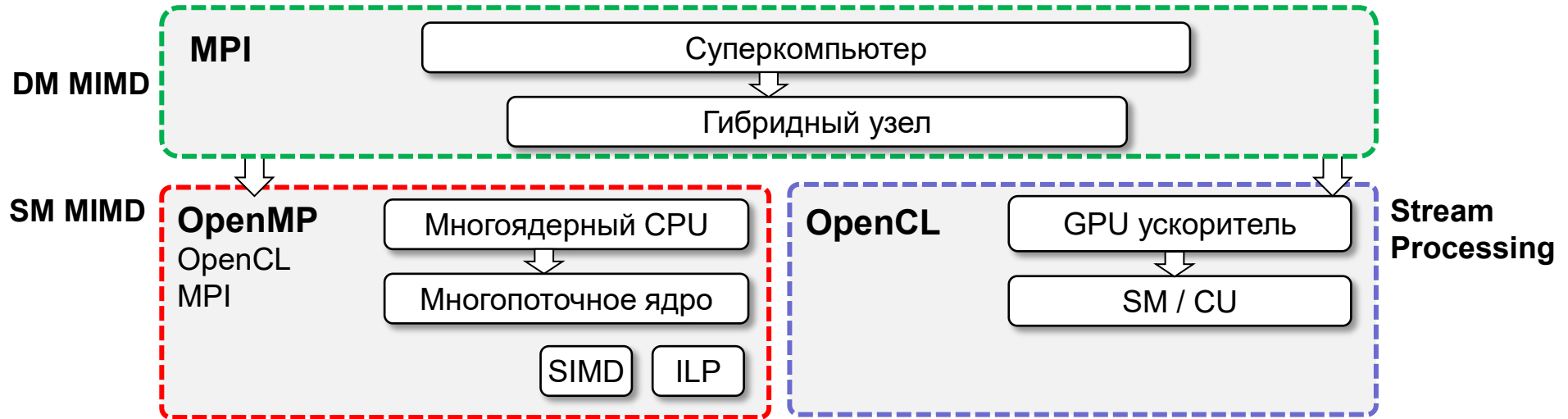
F. X. Trias, D. Folch, A. Gorobets, A. Oliva. Physics of Fluids 27 (2015) 065103. <https://doi.org/10.1063/1.4921817>

- **Подсеточный масштаб Delta SLA, Omega, ..., LSQ**

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



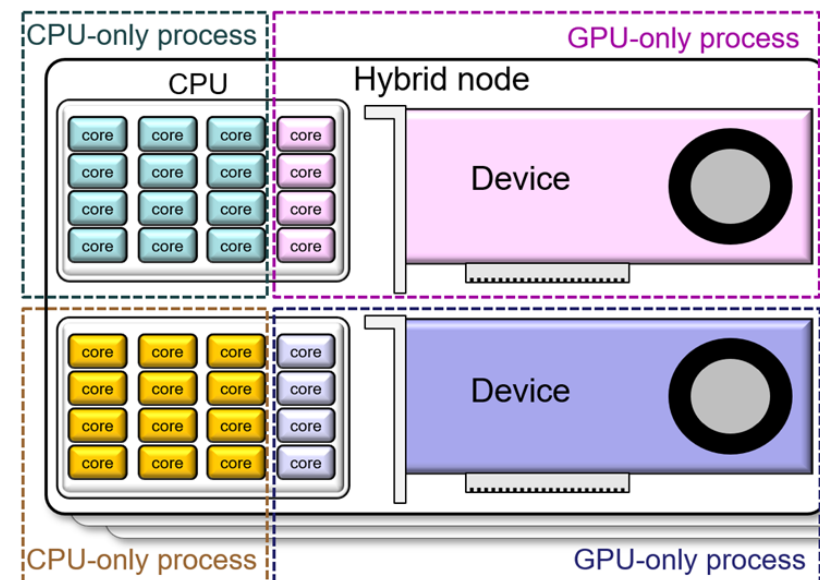
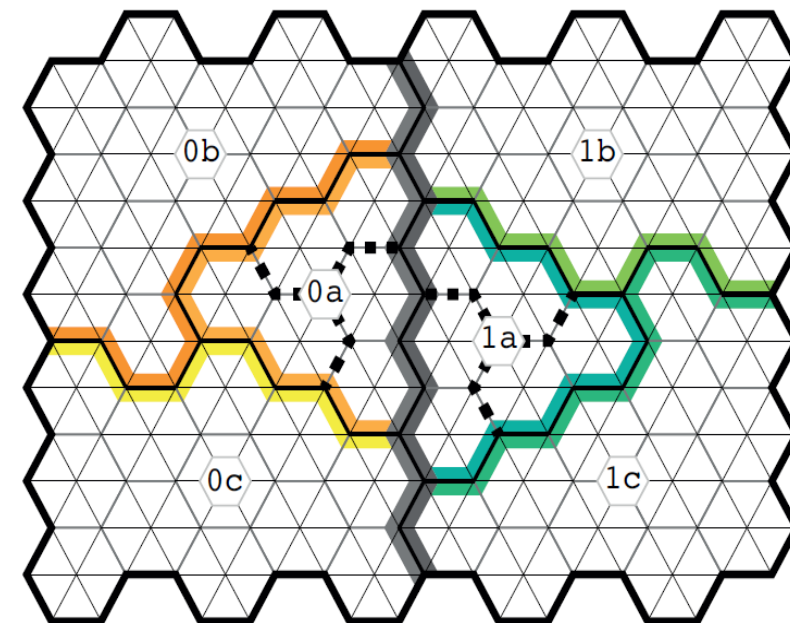
Уровни параллелизма и средства разработки



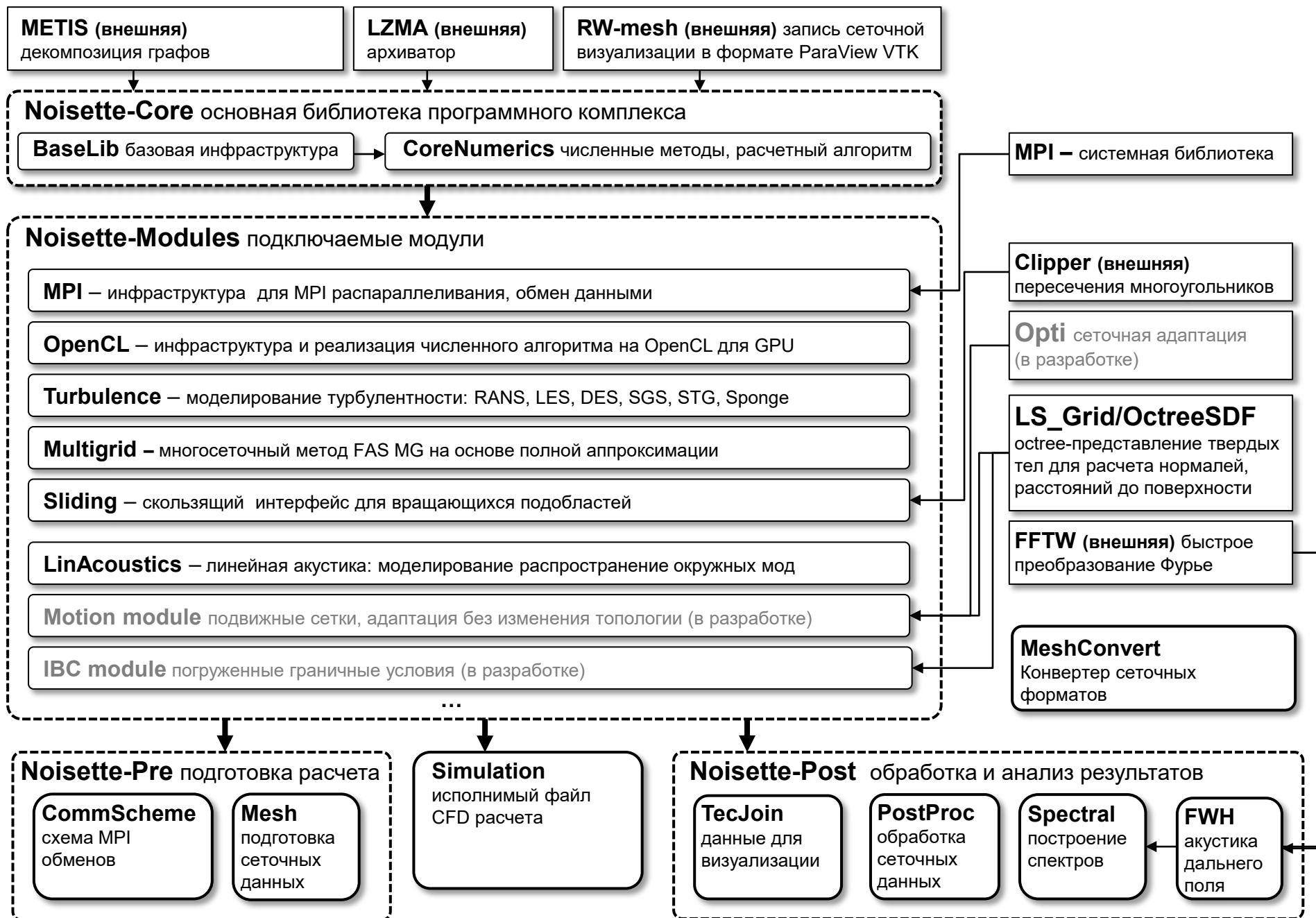
Гетерогенные вычисления CPU+GPU

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

A. Gorobets, P. 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>

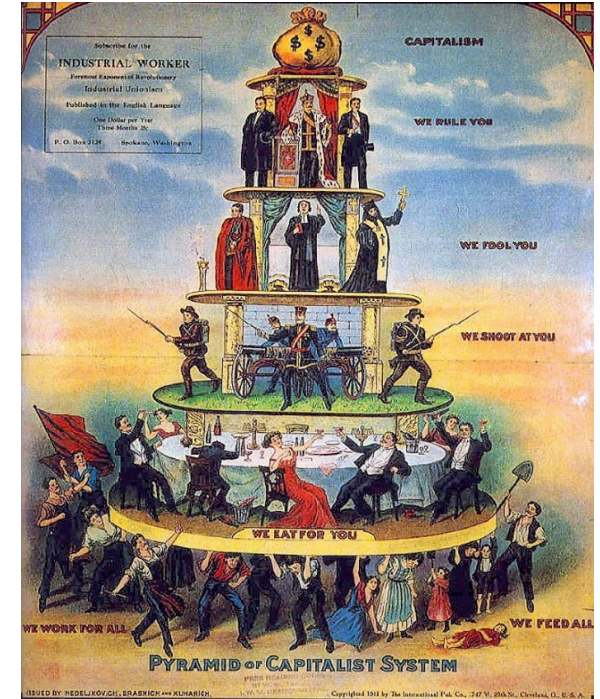


Модульная архитектура



Повышение социальной ответственности кода

- Классовая иерархия! Нет фортранизменным “коммон-блокам”!
- Множественные расчетные области со своим конфигом
- В мемчке Валгринда, наконец, чистота
- Модульность, конфигурируемый состав сборки
- Улучшенные no-slip ГУ во вращающихся областях
- Размерная постановка
- Документация по матчасти и UI – pdf, html (sphinx)
- GUI пытается отчуждаться в тестирование



https://ru.wikipedia.org/wiki/Социальный_класс

NOISEtte 0.1 documentation » Numerical methods » Convective fluxes

previous | next | index

Table of Contents

Convective fluxes

- General form of a finite-volume scheme
- Scheme flags
- Edge-based reconstruction (EBR) schemes
 - Interpolation step
 - Interpolation step on a structured mesh
 - Interpolation on an unstructured mesh
- Reconstruction step
 - Unlimited EBR schemes (EBR3, EBR5)
 - Limited EBR schemes (EBR-TVD, EBR-WENO)
 - Physical correction of the pre-decay values

Convective fluxes

Below the [geometry notation](#) is used.

In this section we consider the discretization of the Euler equations. The discretizations of the linearized Euler equations and scalar equations are generally the same. The differences will be noted unless they are obvious.

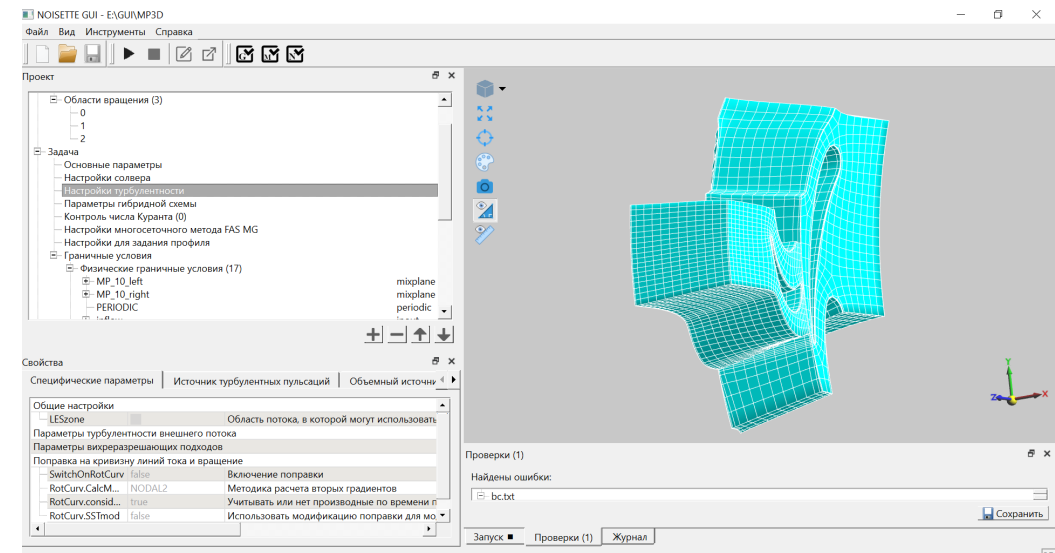
General form of a finite-volume scheme

Let \mathbf{Q}_j be the point values of conservative variables defined at mesh vertex j . For $j \in \mathcal{N}$, \mathcal{U}_j is the set of physical variables at mesh nodes. They are computed based on the conservative variables \mathbf{Q}_j .

Edge-based schemes can be written in semi-discrete form as

$$V_j \frac{d\mathbf{Q}_j}{dt} + \sum_{k \in \mathcal{N}_i(j)} \mathbf{F}_{jk} |\mathbf{s}_{jk}| + \sum_{k \in \mathcal{B}(j)} \mathbf{F}_{jk}^b = 0,$$

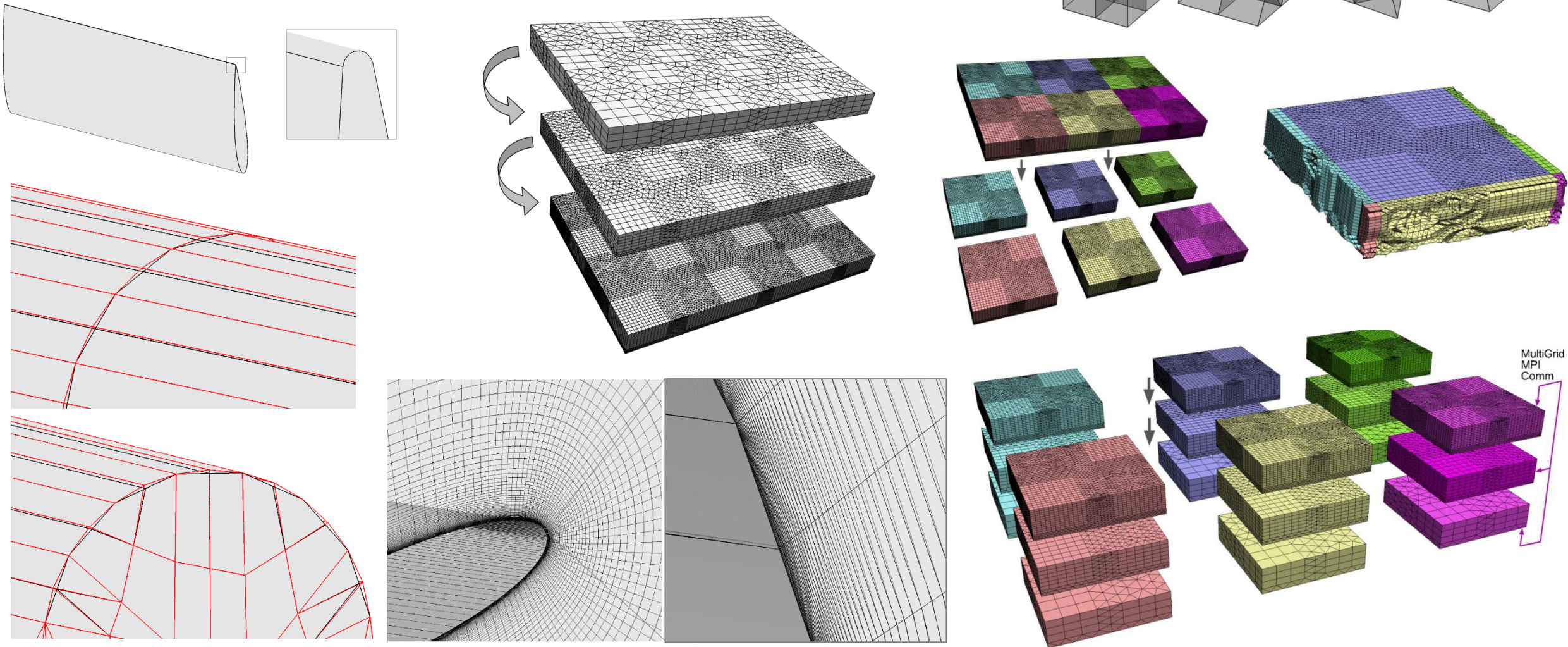
where $\mathbf{F}_{jk} = -\mathbf{F}_{kj}$ is the numerical flux across $\partial C_j \cap \partial C_k$ (which is also an approximation of the flux $\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}_{jk}$ at the midpoint of the edge jk), $\mathcal{B}(j)$ is the set of the boundary faces incident to node j and \mathbf{F}_{jk}^b is an approximation of the flux through the intersection of ∂C_j with boundary face k .



Многосеточный ускоритель

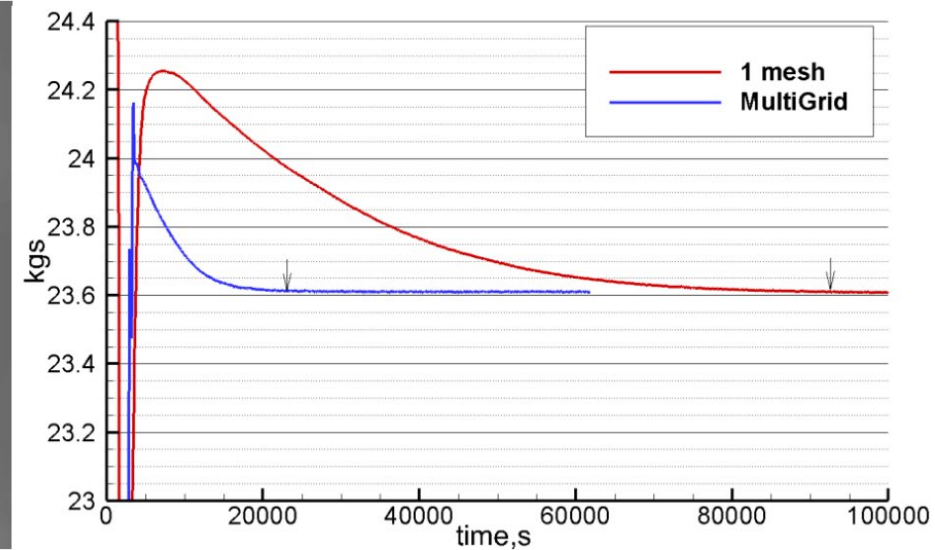
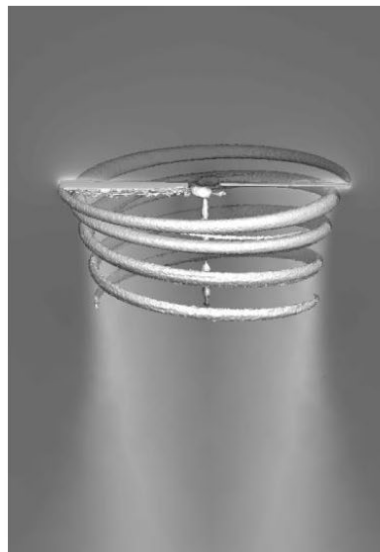
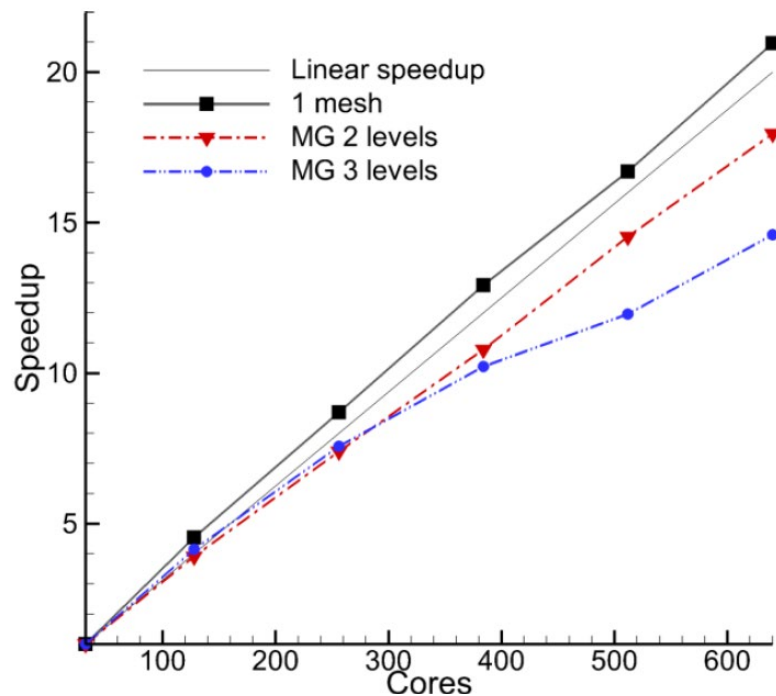
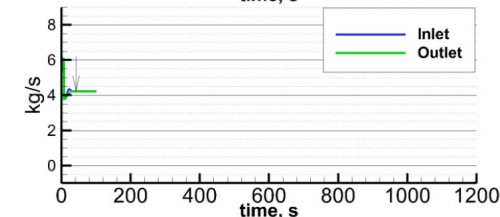
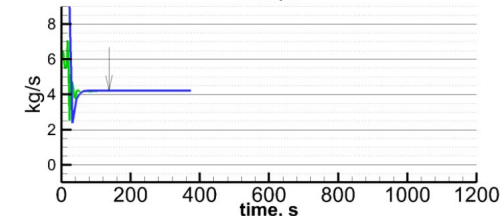
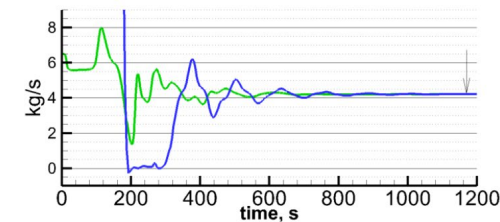
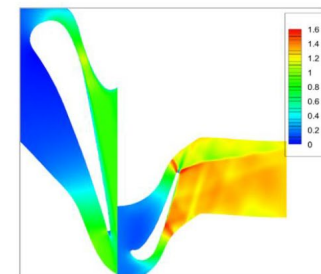
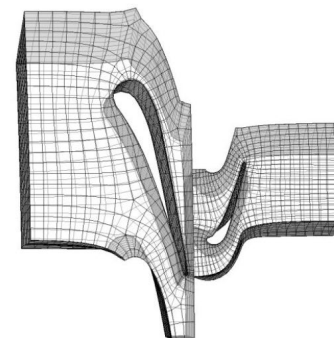
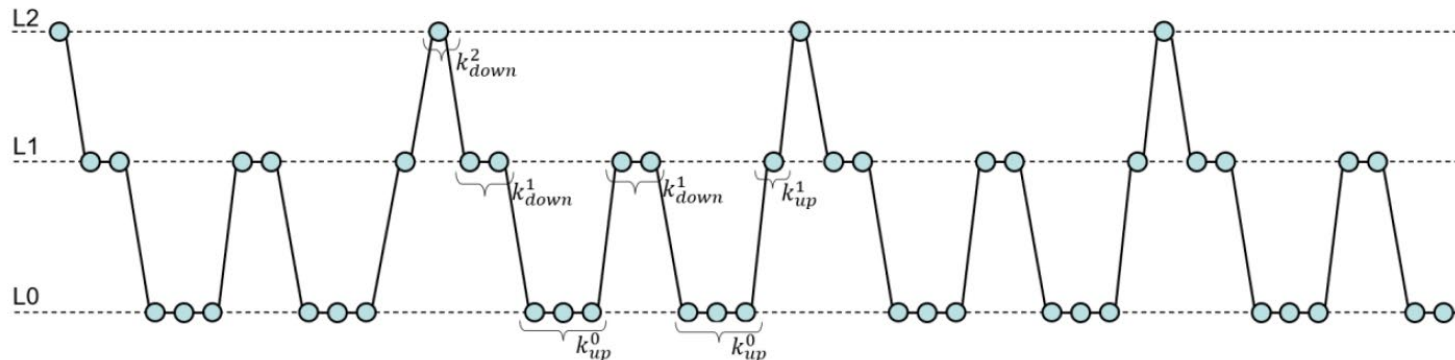
- Многосеточник с полной аппроксимацией – FAS MG

неявная схема, уровни с равномерным измельчением, технология “сглаживания” сетки



Многосеточный ускоритель

- Многосеточник с полной аппроксимацией – FAS MG неявная схема, уровни с равномерным измельчением, опробована технология “сглаживания” сетки при измельчении



Многосеточный ускоритель

- **FAS MG** – ускорение стационарных расчетов

Сравнение NOISEtte vs NUMECA

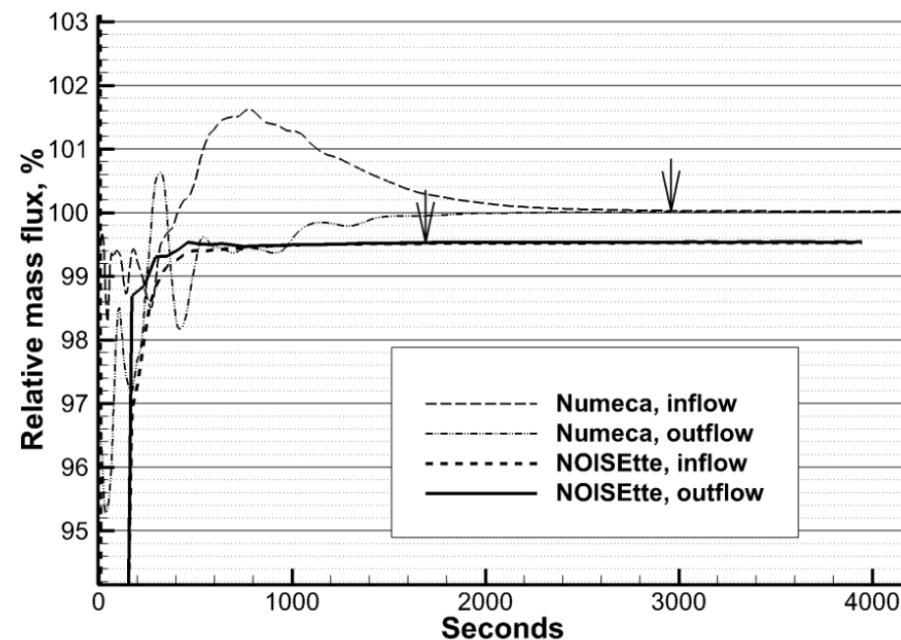
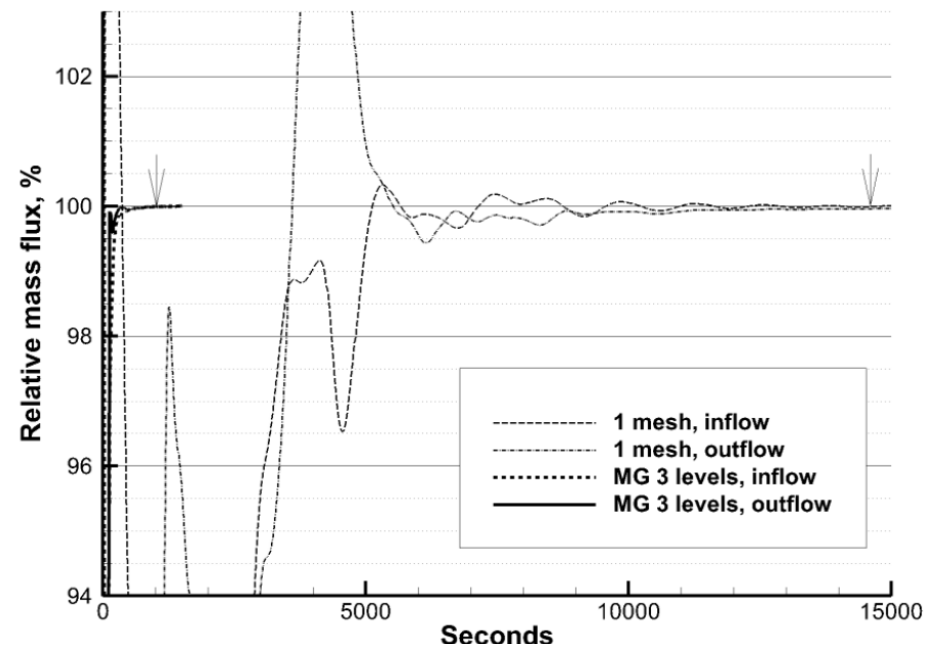
5 ступ. компрессор, 20 млн узлов,
периодика, поверхность смешения (слабоотражающие ГУ)

Совместно с Инженерным центром численных исследований

<https://rescent.ru/>

Устройство	Число устройств	MPI процессов	OpenMP потоков	Время, с
CPU Intel Core i9, 18 ядер, память 4xDDR4-2666 85 ГБ/с	1	1	36	1680
CPU Intel Xeon Gold 5218, 16 ядер, память 6xDDR4-2666 128 ГБ/с	1	1	1	18960
	1	1	32	1580
	2	2	32	868
	1	1	1	18400
CPU AMD EPYC 7542, 32 ядра, память 8xDDR4-3200 205 ГБ/с	1	2	32	932
	2	4	32	488
GPU NVIDIA A5000, 768 ГБ/с	4	4	-	129
GPU NVIDIA V100, 900 ГБ/с	4	4	-	115

А. В. Горобец, С. А. Суков, А. Р. Магомедов. Гетерогенная параллельная реализация многосеточного метода с полной аппроксимацией в программном комплексе Noisette Математическое моделирование (2024 г.)



Отчуждаемость ПО и третьи (грустные) лица

- **Прототип ПО инженерного анализа SIMULTEC, T1, Москва**
Высокоточное вихреразрешающее моделирование, CFD&CAA
<https://t1.ru/>
- **Код TRD-Solver, ИЦЧИссл, Санкт-Петербург**
Задачи турбомашиностроения, импортозамещение ПО NUMECA Fine/Turbo
<https://rescent.ru/>
- **Код MCFL – отдел 8 ИПМ им. М. В. Келдыша РАН**
Сопряженный теплообмен, многокомпонентные течения, ...



Разработка и реализация методик пристеночного моделирования

Реализация

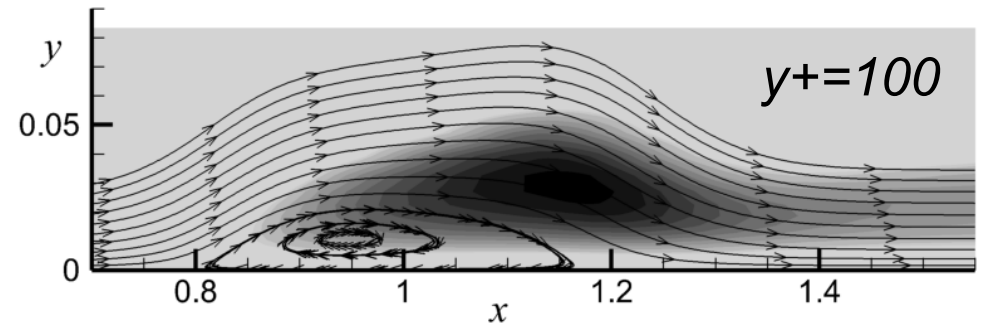
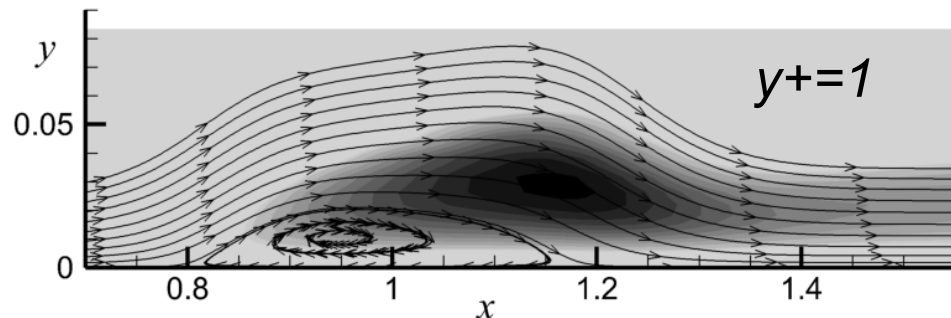
- “Стандартная” формулировка с применением аналитических законов стенки (закон Райхарда, Спалдинга и др.).
- Численные пристеночные функции.

Разработка и верификация

- **Метод пенализированных пристеночных функций (ППФ)**
 - Дифференциальная формулировка условия сшивки, не требующая интерполяции.
 - Обобщение на задачи моделирования течений с отрывами.
 - Применение в методиках с погруженными граничными условиями.

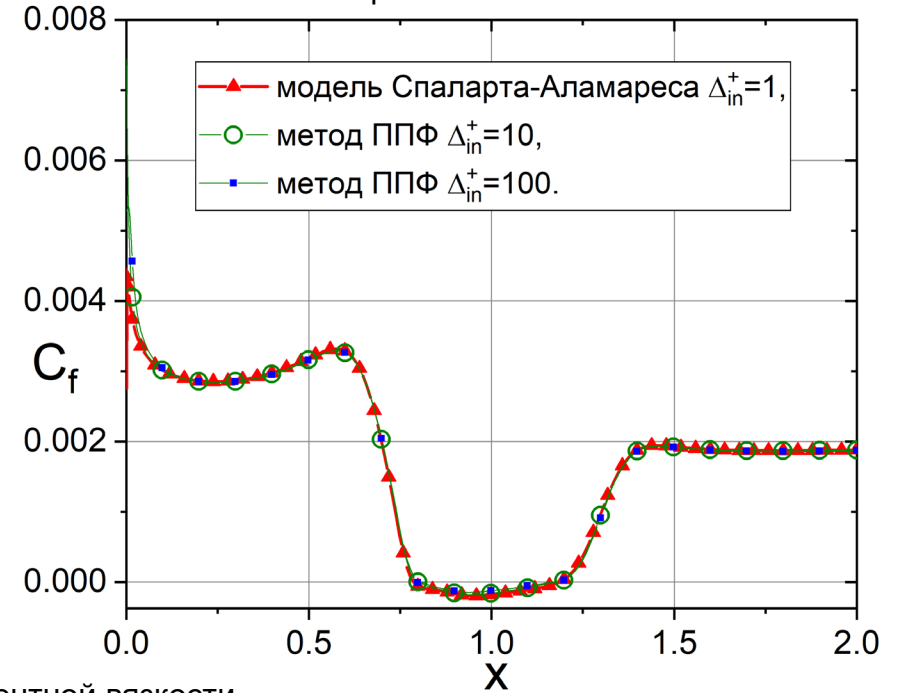
O.V. Vasilyev, N.S. Zhdanova. Generalisation of the Penalised Wall Function Method for the Simulation of Turbulent Flows With Unfavourable Pressure Gradients // Comput. Math. and Math. Physics, 63:12 (2023), 2095

Линии тока и поле относительной турбулентной вязкости



Обтекание пластины с неблагоприятным градиентом давления

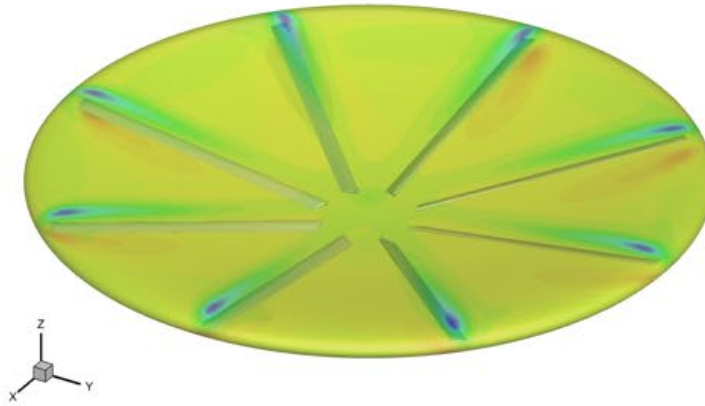
Распределение коэффициента трения вдоль поверхности пластины



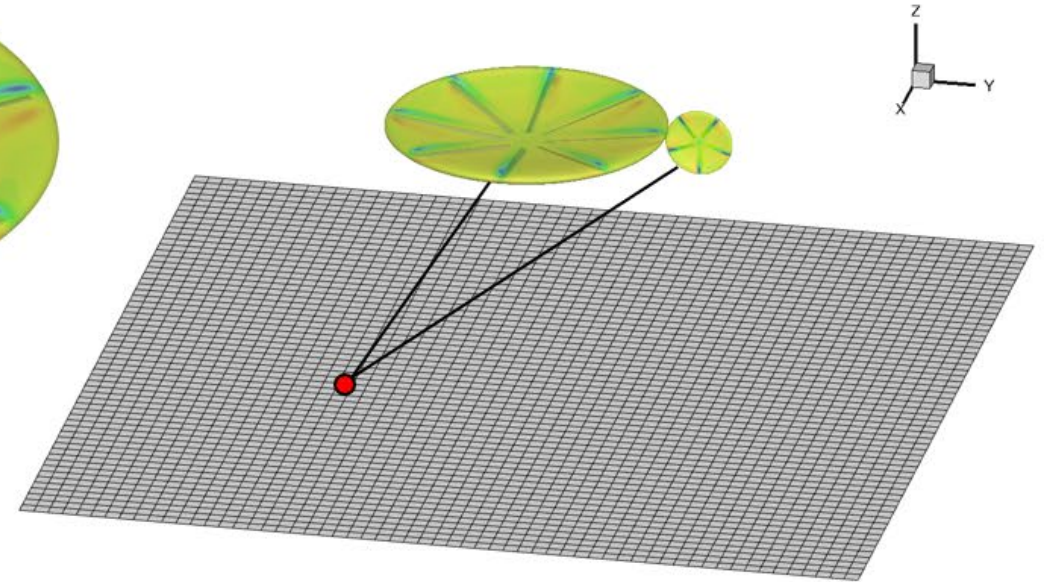
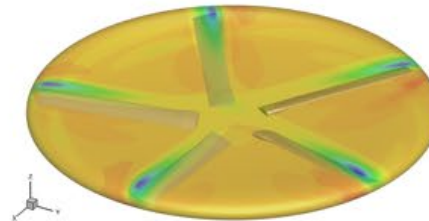
Экономичная технология расчета шума вертолета

- URANS расчеты, шум суммируется от двух изолированных винтов, НВ и РВ
- Sliding для совместного расчета двух винтов
- Модифицирован FW/H постпроцессор

URANS
моделирование
обтекания НВ

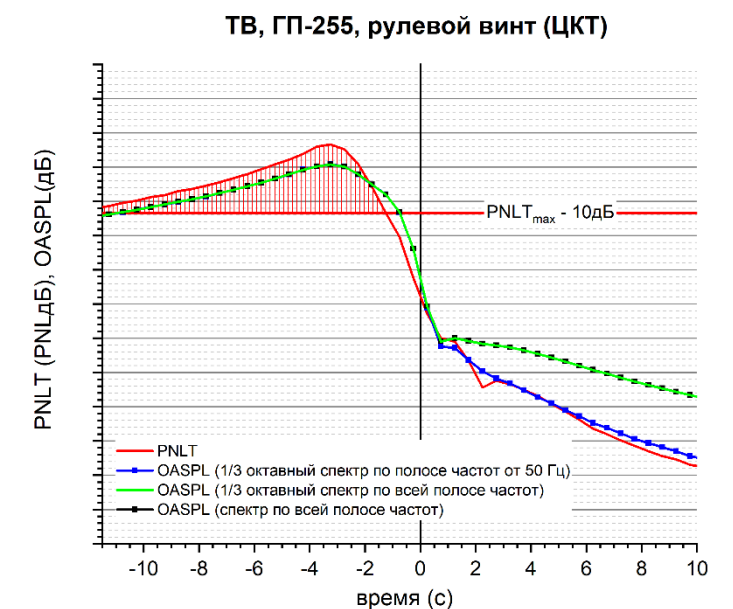
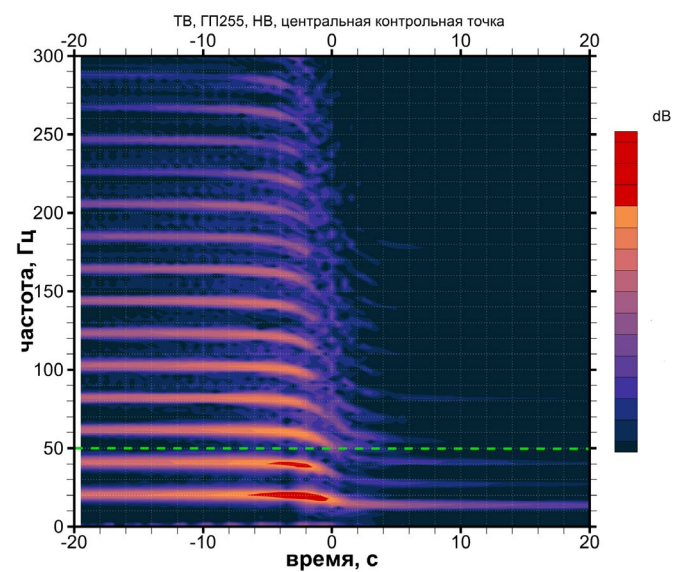
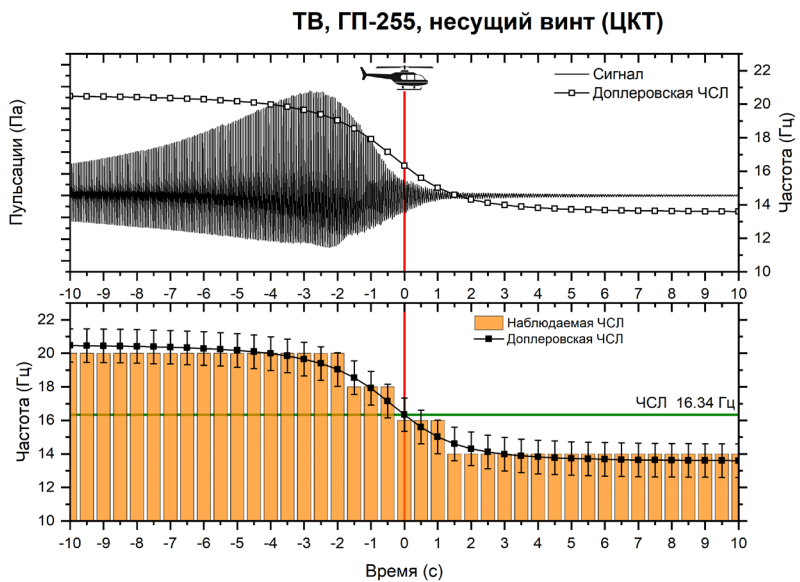
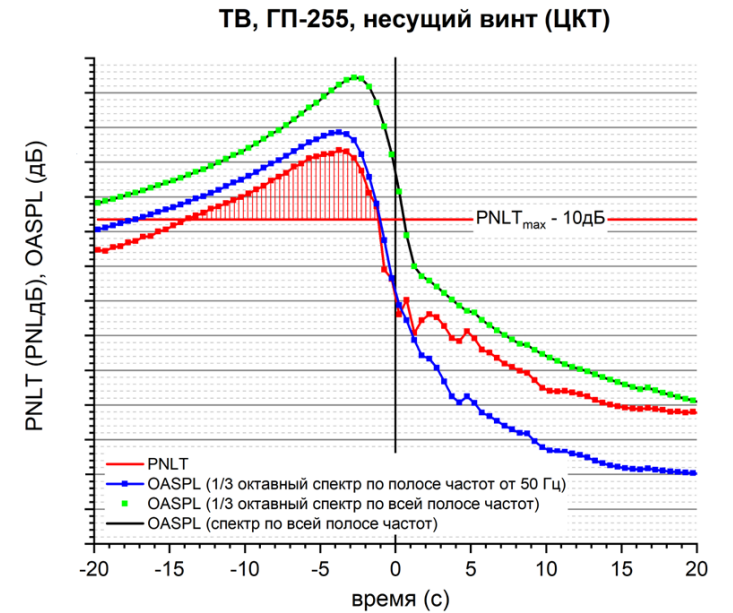
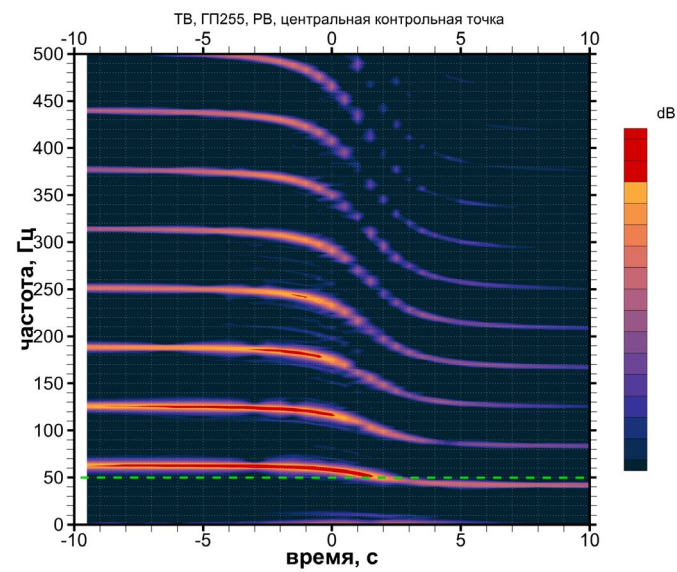
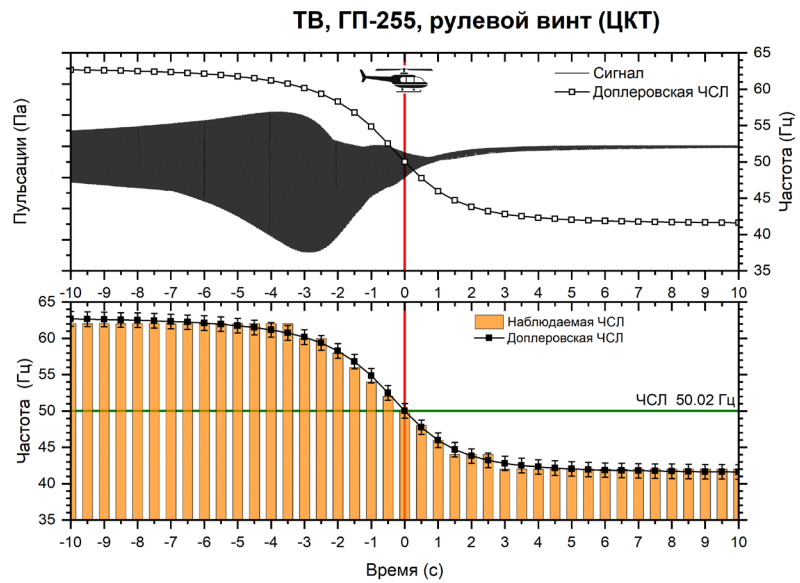


URANS
моделирование
обтекания РВ



Моделирование акустики винтов тяжелого вертолета

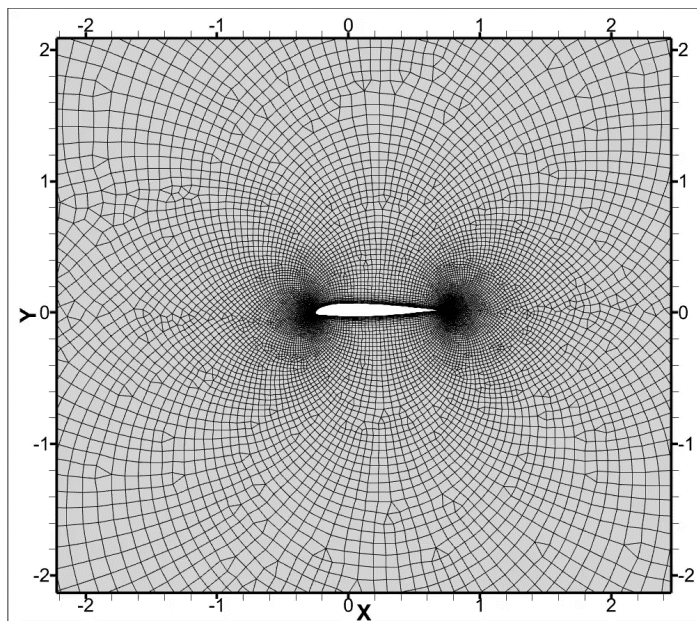
- Технология для перевода в единицы (EPNL), используемые в нормах ИКАО



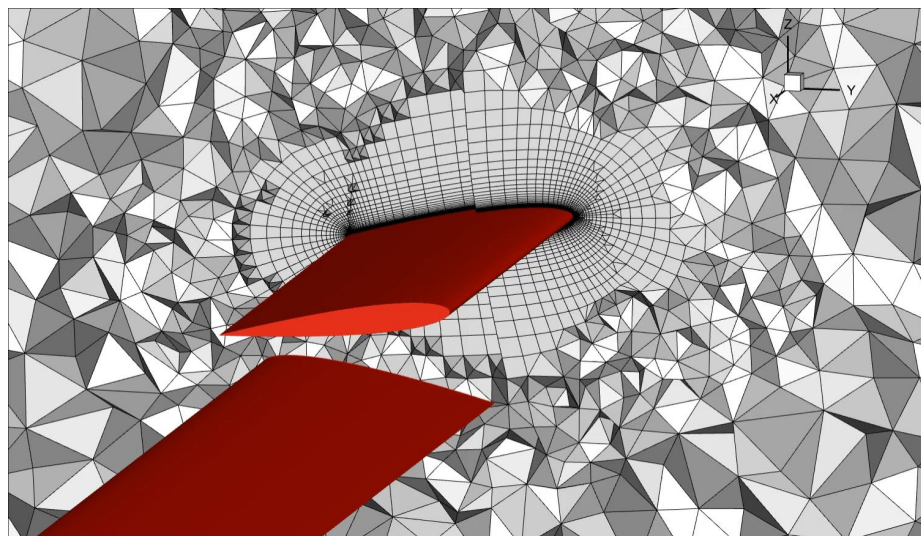
Движение лопасти вертолета

Движение тела – деформация сетки (strand-сетки)

2D



3D



Модель кинематики лопасти шарнирного винта + внешние АД силы

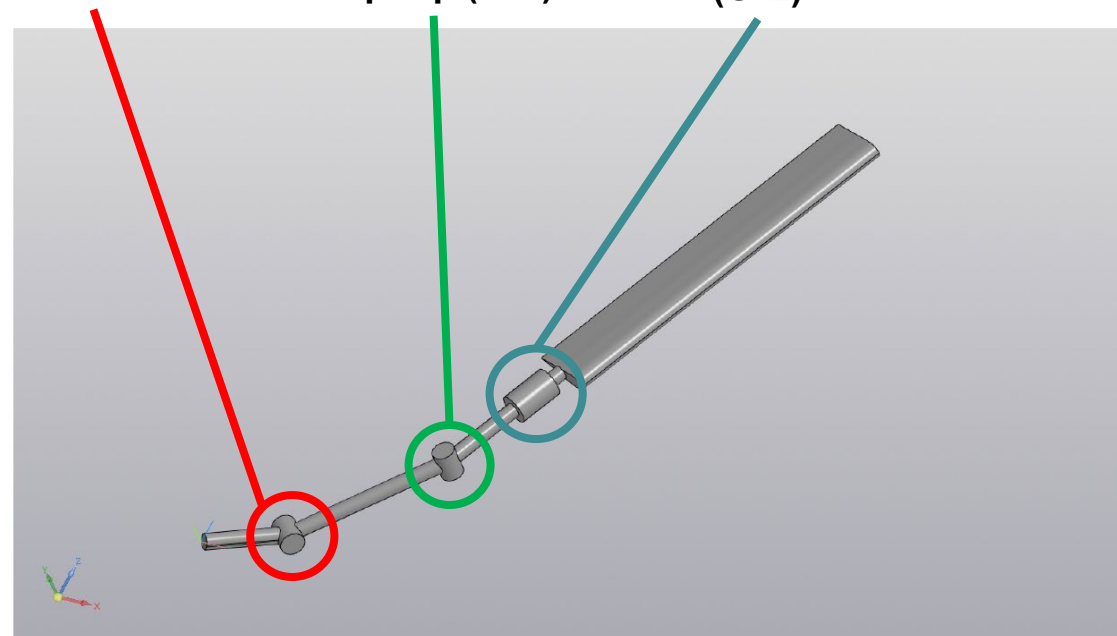
Уравнение сохранения кинетического момента

$$\frac{dK_l}{dt} = \sum_{i=1}^n M_l, \quad K_l = J_l \omega$$

Горизонтальный шарнир (ГШ)

Вертикальный шарнир (ВШ)

Осевой шарнир (ОШ)



Моделирование обтекания треугольного крыла

- Геометрия: NASA 65° delta wing
- URANS с поправками на кривизну линий тока и вращение
- DDES с подсеточным масштабом $\Delta = \tilde{\Delta}_\omega$ и подсеточной LES моделью σ
- Сетка: 10 млн. узлов

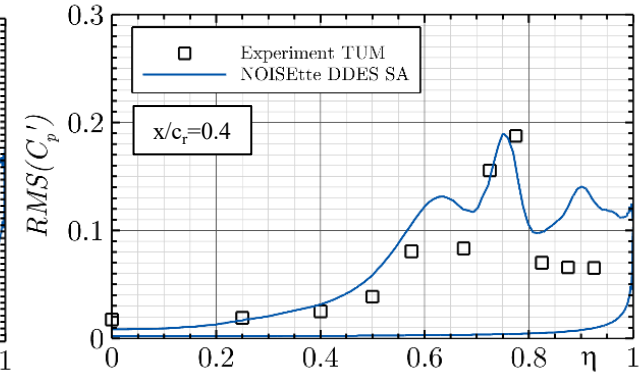
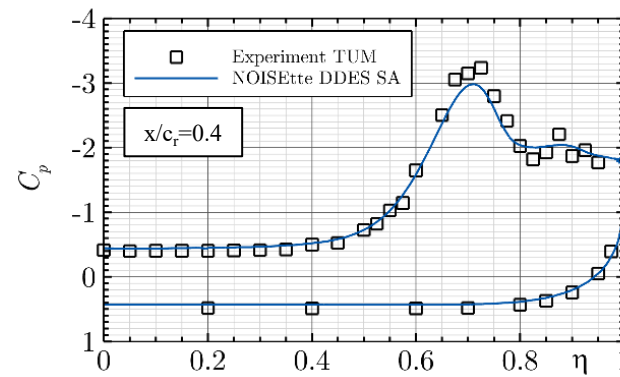
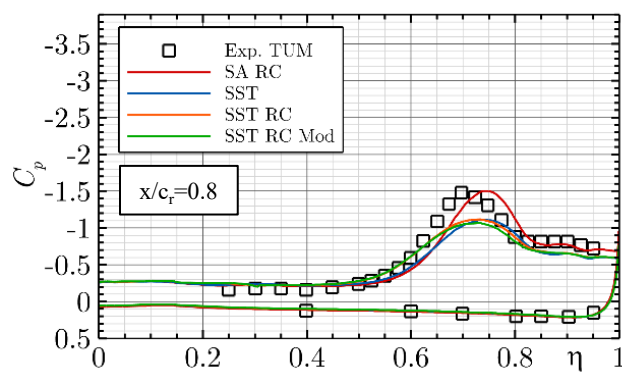
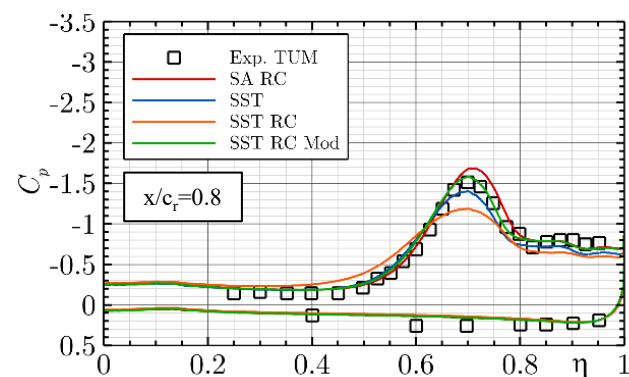
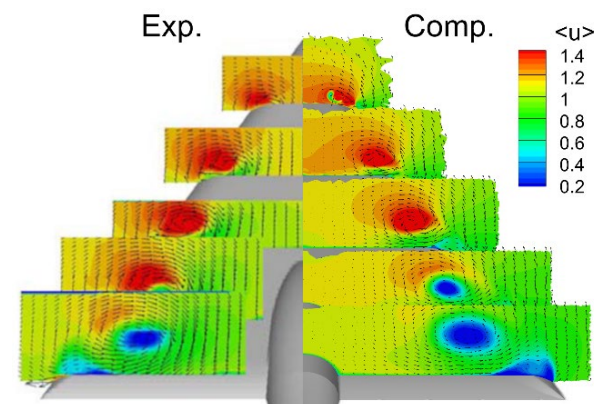
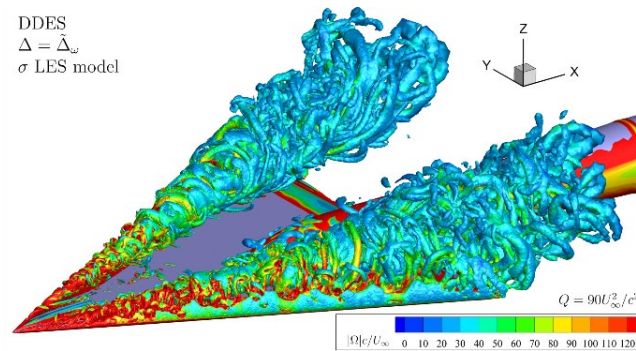
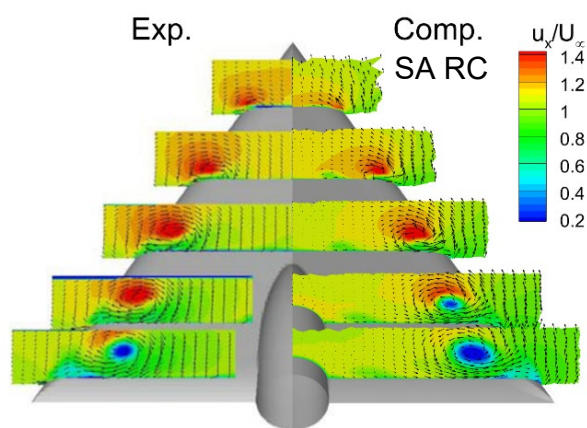
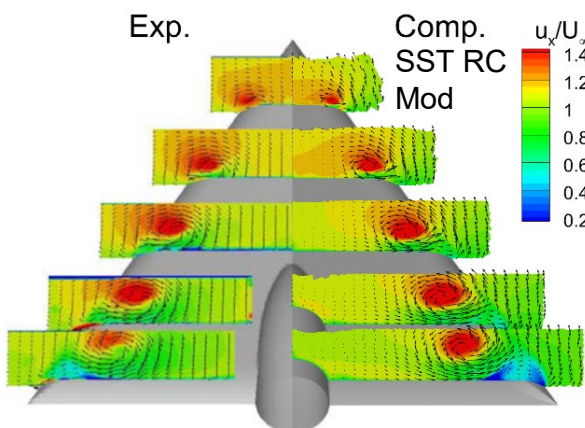
$M = 0.14, Re_{\text{mac}} = 2 \times 10^6, \alpha = 18^\circ$

$M = 0.07, Re_{\text{mac}} = 1 \times 10^6, \alpha = 23^\circ$

Острая передняя кромка

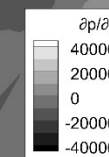
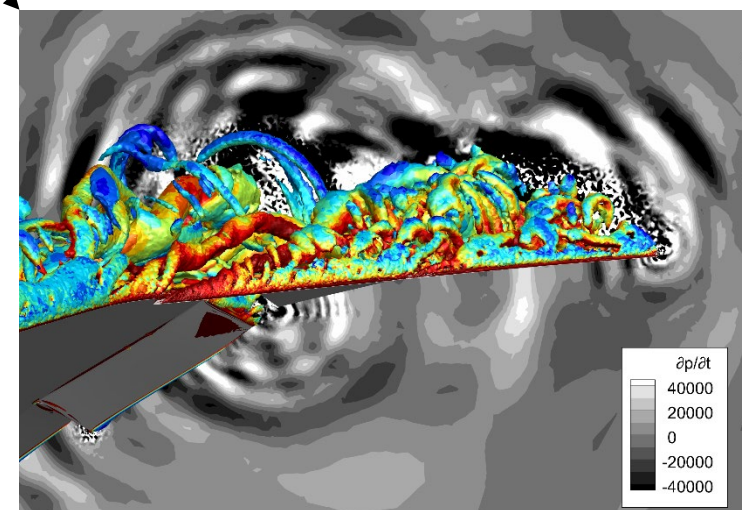
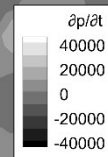
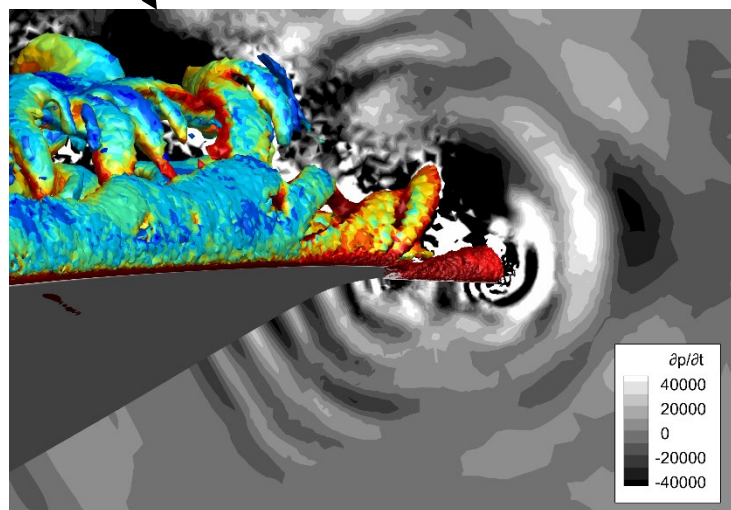
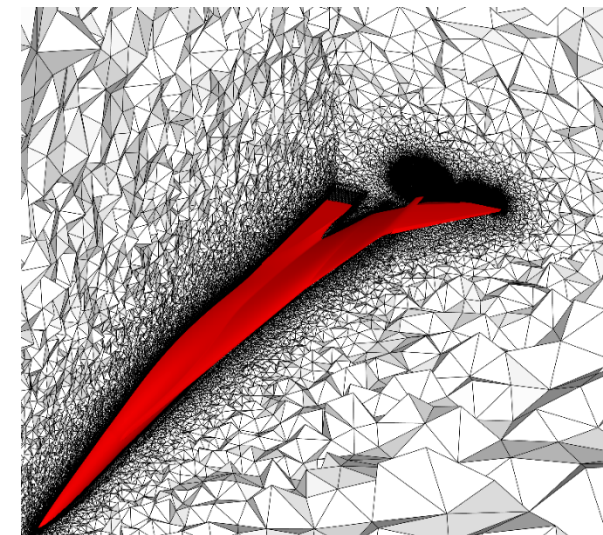
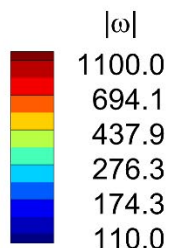
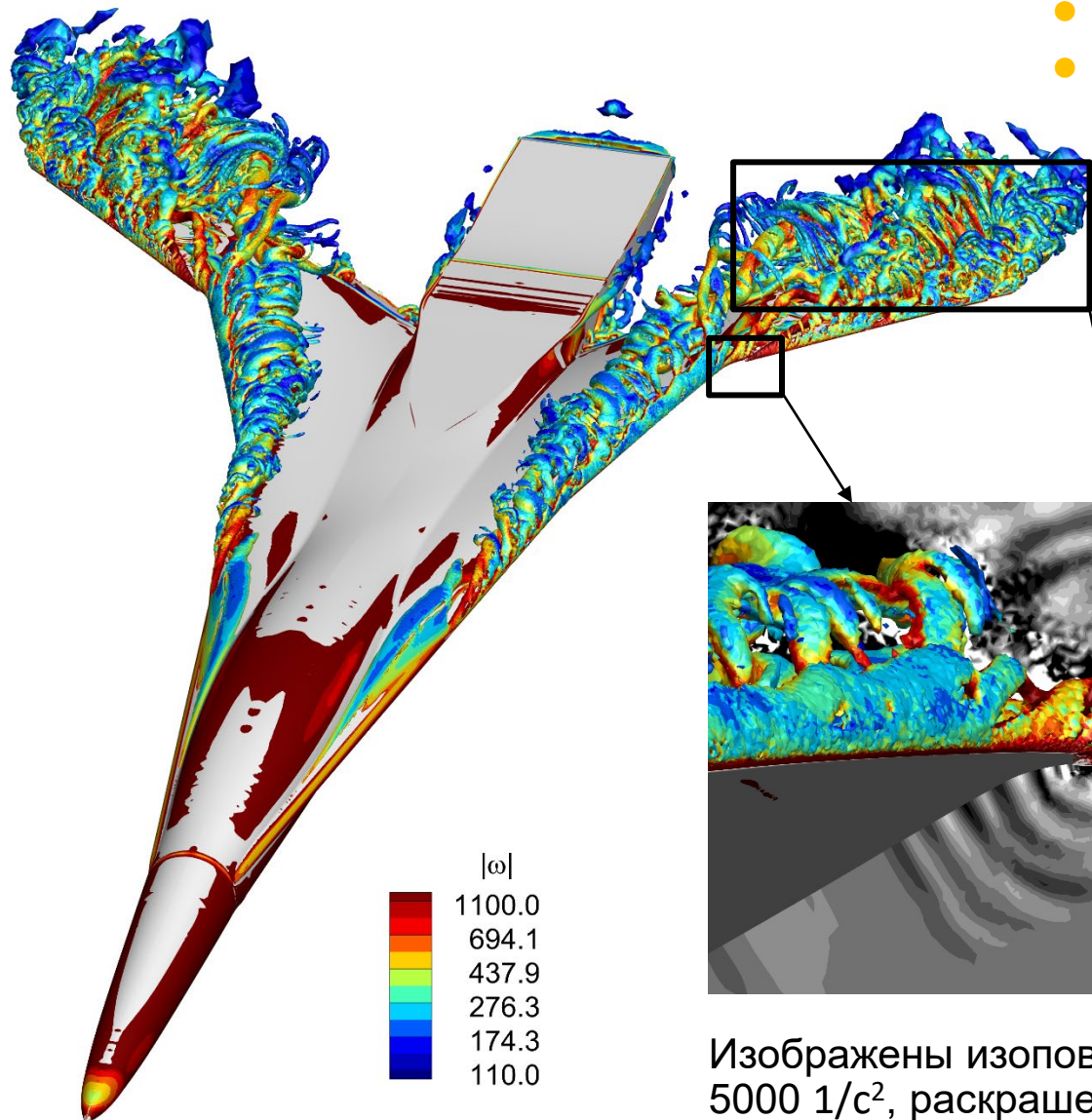
Скругленная передняя кромка

Острая передняя кромка



Моделирование акустики крыла СПС на режиме посадки

- Сетка: 21М узлов,
- DDES с SGS $\tilde{\Delta}_\omega$ и LES σ
- Схема EBR5

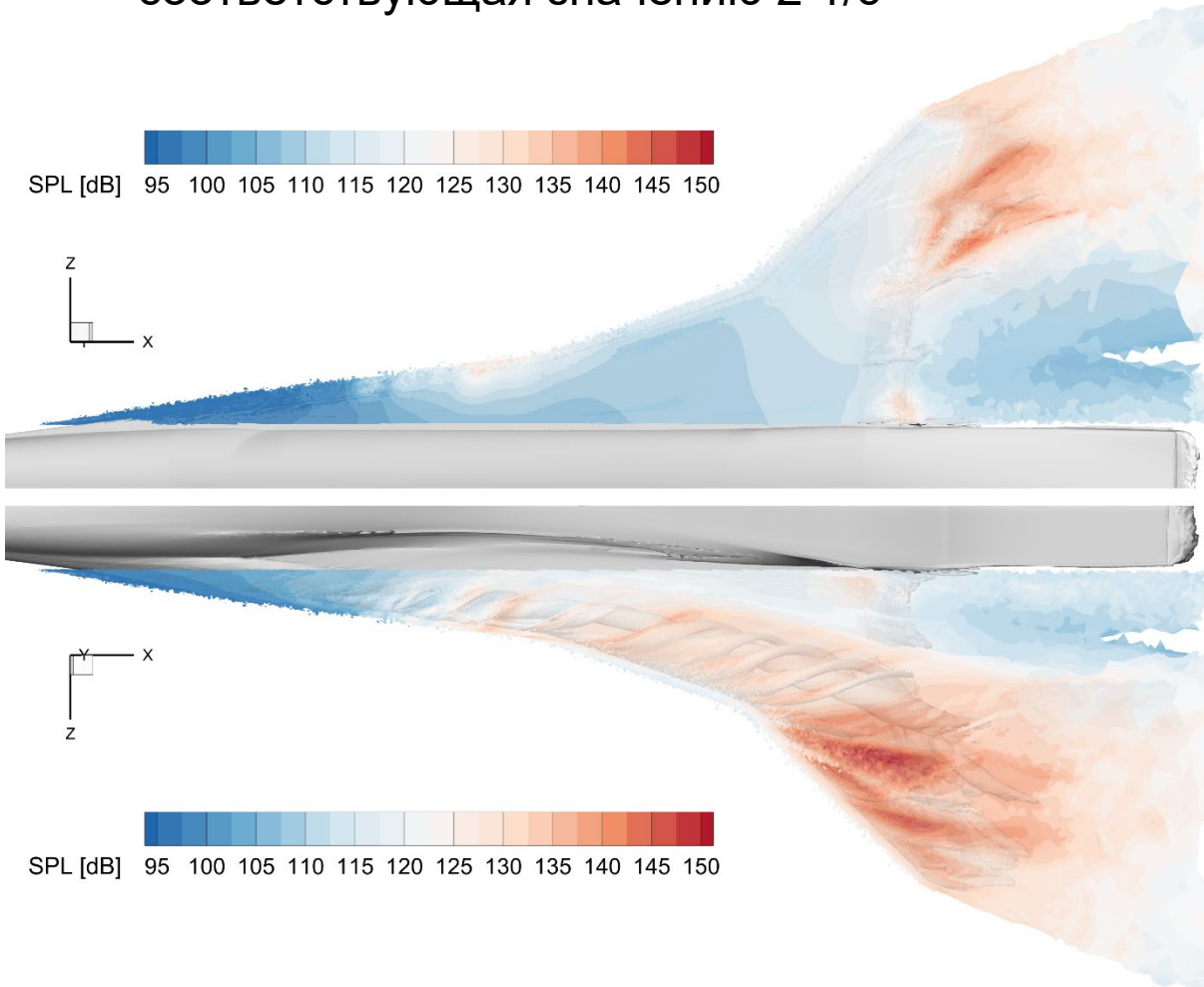


Изображены изоповерхности Q-критерия, соответствующие значению 5000 1/c^2 , раскрашенные по модулю завихренности. Значения производной по времени от давления показаны в сечениях, перпендикулярных оси планера

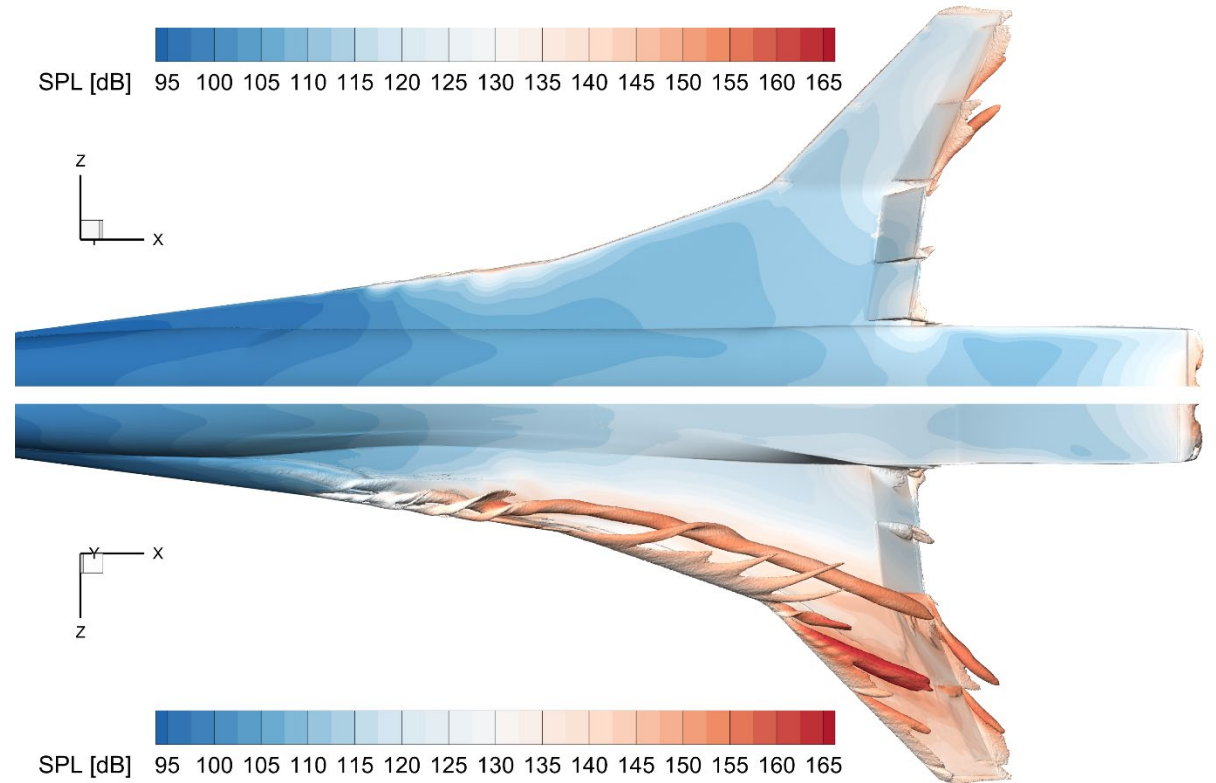
Моделирование акустики крыла СПС на режиме посадки

- Общий уровень пульсаций давления вблизи крыла СПС

Изоповерхность модуля завихренности, соответствующая значению 2 1/c

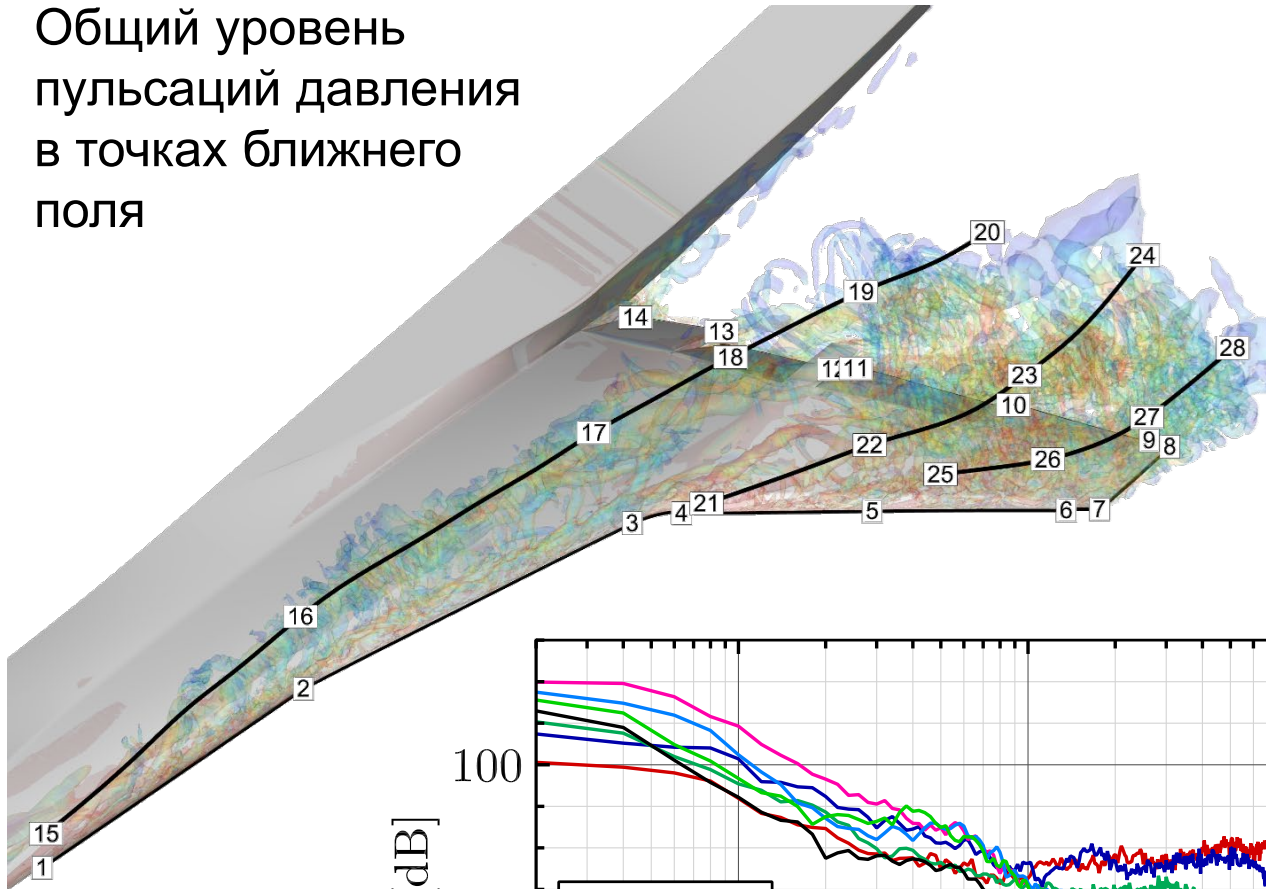


Изоповерхность модуля завихренности, соответствующая значению 400 1/c

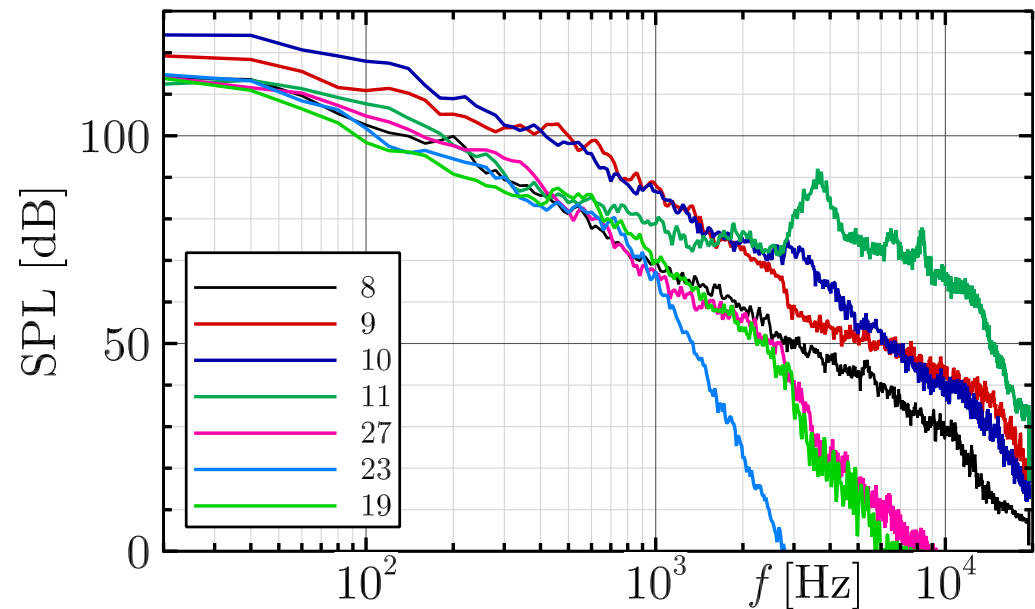
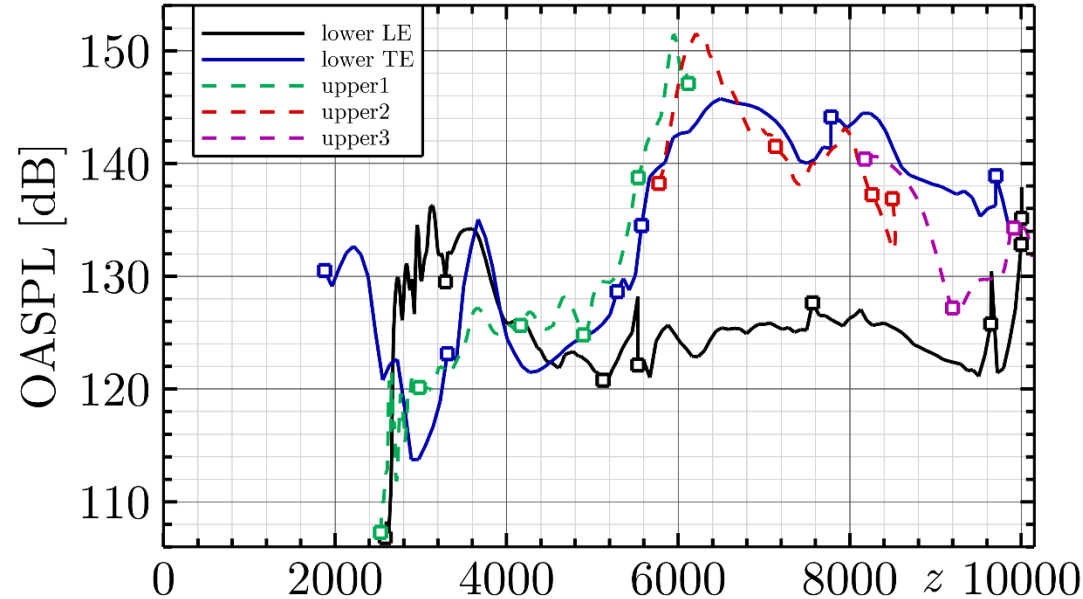
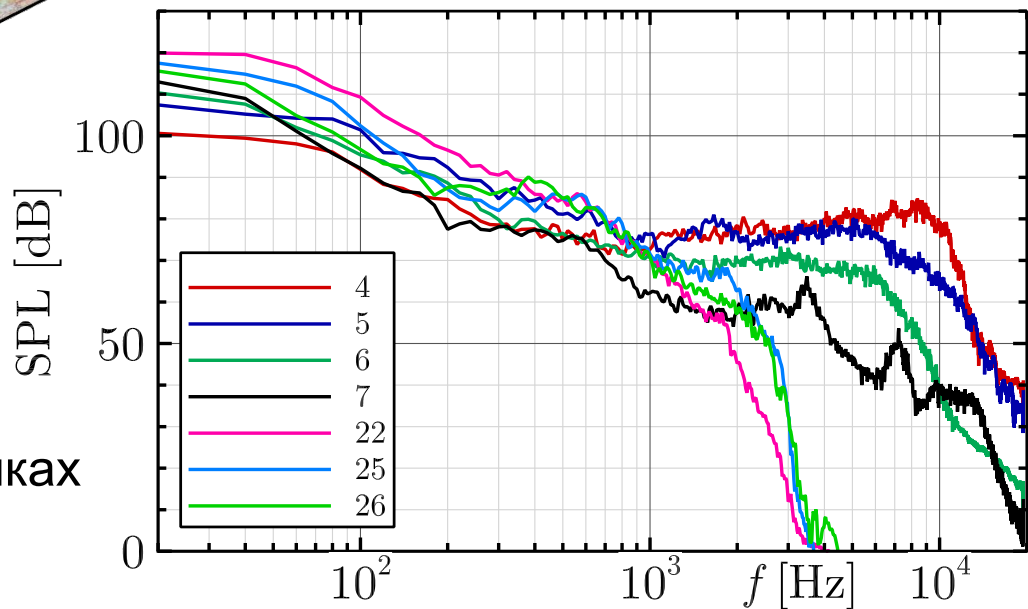


Моделирование акустики крыла СПС на режиме посадки

Общий уровень
пульсаций давления
в точках ближнего
поля



Спектры
пульсаций
давления в точках
ближнего поля



Расширение набора моделей турбулентности

- **RANS модели на базе SST с алгебраическими моделями ламинарно-турбулентного перехода**
 - модель SST-KD¹
 - модель SST- γ -alg LCTM (Local-Correlation based Transition Models)^{2,3}

- **Вихреразрешающие гибридные RANS-LES подходы**
 - DDES-SST-KD подход¹
 - ZDES mode 2 EP (Zonal DES, Enhanced Protection, с улучшенной защитой пограничного слоя)⁴

¹Стабников Андрей Сергеевич. Кандидатская диссертация на тему «Разработка алгебраической модели ламинарно-турбулентного перехода и ее использование совместно с вихреразрешающим подходом к расчету турбулентных течений».

²Матюшенко Алексей Алексеевич. Кандидатская диссертация на тему «Усовершенствованные версии k- ω SST модели турбулентности для расчета аэродинамических характеристик крыльев и турбинных лопаток».

³Menter, F.R., Matyushenko, A., Lechner, R. et al. An Algebraic LCTM Model for Laminar–Turbulent Transition Prediction. Flow Turbulence Combust 109, 841–869 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10494-022-00336-8>

⁴Deck S., Renard N., Towards an enhanced protection of attached boundary layers in hybrid RANS/LES methods // Journal of Computational Physics, 400, art. no. 108970 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.108970>

О проблемах

- **Согласованность кода и документации**
- **Согласованность документации и GUI**
- **DevOps. Бинарная поставка – что делать с MPI?**
- **Обучение, поддержка и гарантийный ремонт**
- **Подкручивание подкручивателей или проблемы LES и схем EBR**
- **CFD кодов полно, но какой от них толк? Сеточника-то нет**
- **Кадровый вопрос**
- **Кадровый парадокс**

О проблемах

Удивительно, поразительно, как легко столько усилий превратить...

Потрачены много человеко-лет.

Специалисты высокой квалификации: профессора, доктора, кандидаты, аспиранты, ...

Написаны диссертации, десятки научных статей.

Многokrратно доложено на CFD WeekEnd.

А вышел weak end. Парадокс!

Поползало, но так и не полетело. Подымилось, но так и не разгорелось. Пошевелилось, но так и не задышало.

Годы прошли, а так и не доделано:

-
-
-
-

Доделать _ нельзя _ отказаться

Выкинуть

Свалить в сарай

Бережно хранить, сдувая пыль

Доделать во что бы то ни стало

Заключение

Код NOISEtte гармонично развивается и идет верным курсом

