

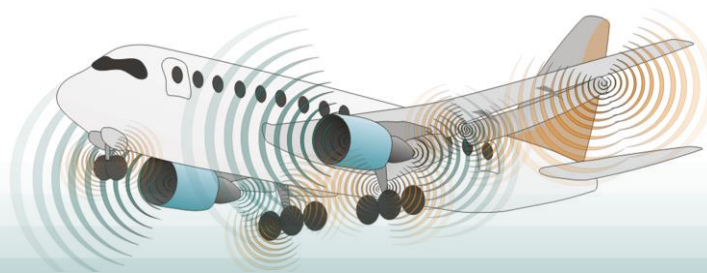
Программный комплекс NOISETTE: жаөс бардақ прогресс за 2019 год

Вихреразрешающее моделирование турбулентных течений

Вычислительная аэродинамика и аэроакустика

Алгоритмы повышенной точности

Неструктурированные сетки



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

<http://caa.imamod.ru>

- **Базовая система уравнений для сжимаемого газа**

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{Q})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{Q})}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{Q})}{\partial z} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \mathbf{F}_\nu(\mathbf{Q})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}_\nu(\mathbf{Q})}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}_\nu(\mathbf{Q})}{\partial z} \right)$$

\mathbf{Q} – вектор полных или линеаризованных консервативных переменных,
 \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{H} – вектора полных или линеаризованных консервативных потоков
 \mathbf{F}_ν , \mathbf{G}_ν , \mathbf{H}_ν – диссипативных, Re – число Рейнольдса.

- **Семейство моделей Эйлера**

- EE – полные уравнения Эйлера
- NSE – полные уравнения Навье-Стокса
- LEE – линеаризованные уравнения Эйлера

- **Модели турбулентности**

- RANS, URANS (SA, KE, KO, SST)
- LES (Смагоринский, S3PQ, S3QR, S3PR, WALE, Sigma, Vreman, Verstappen)
- DES, DDES, IDDES, PANS

- **Погруженные граничные условия – IBC**

- **Метод расчета акустики в дальнем поле FW/H**

Абалакин И.В., Бахвалов П.А., Горобец А.В., Дубень А.П., Козубская Т.К. Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // Вычислительные методы и программирование, т.13 (2012), стр. 110-125.

- **Неструктурированные сетки**

Гибридные сетки (элементы до 6 граней)

- **Схемы повышенной точности**

EBR схемы с квазиодномерной реконструкцией

- **Римановские солверы:**

Роу, Русанов, HLLC, HLLD, Годунов

- **Маломаховые течения**

Предобуславливатель Туркеля

- **Разрывные решения**

• WENO-EBR, MUSCL-TVD EBR

- **Интегрирование по времени**

• Явная схема (Рунге-Кутта 1 – 4-го порядка)

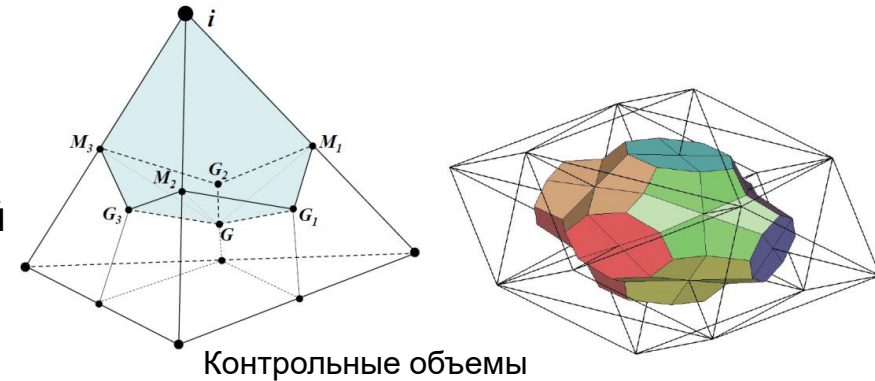
• Неявная схема 1-2 порядка

- **Решатели СЛАУ**

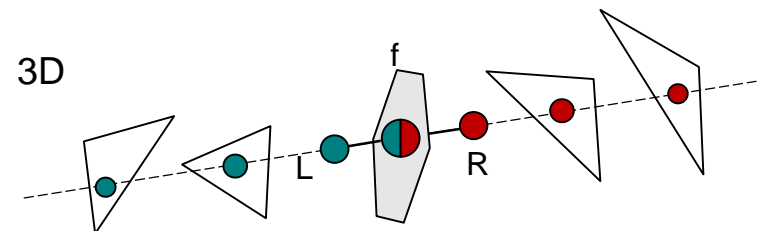
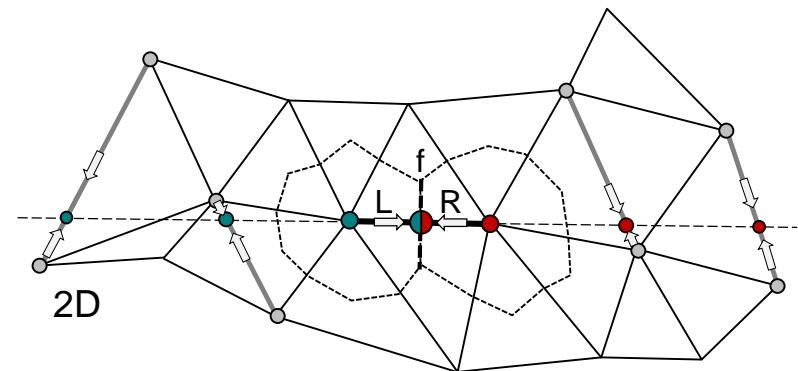
Предобусловленный Bi-CGSTAB

- **Граничные условия**

Твердые стенки, неотражающие, периодические ГУ



Контрольные объемы



Абалакин И.В., Бахвалов П.А., Горобец А.В., Дубень А.П., Козубская Т.К. Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // Вычислительные методы и программирование, т.13 (2012), стр. 110-125.

Базовая схема 1 порядка

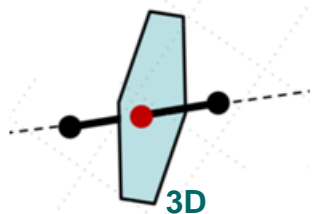
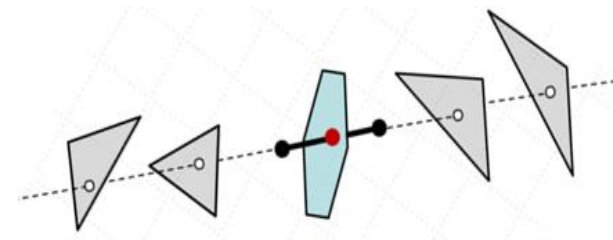
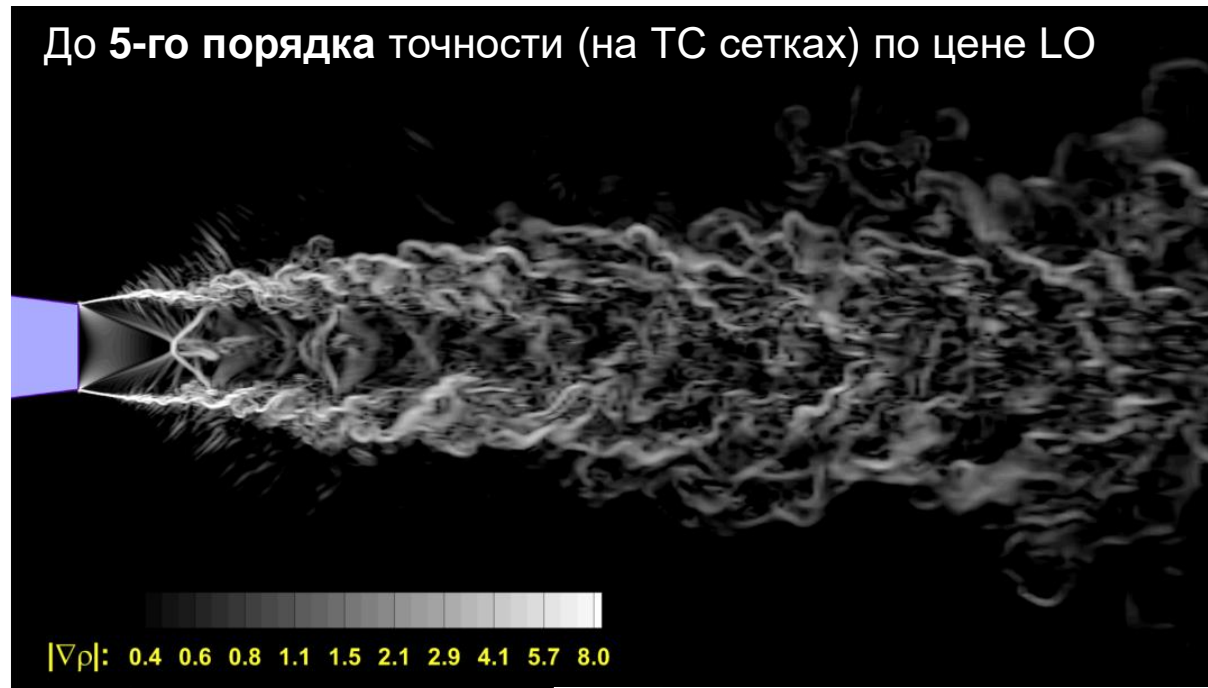
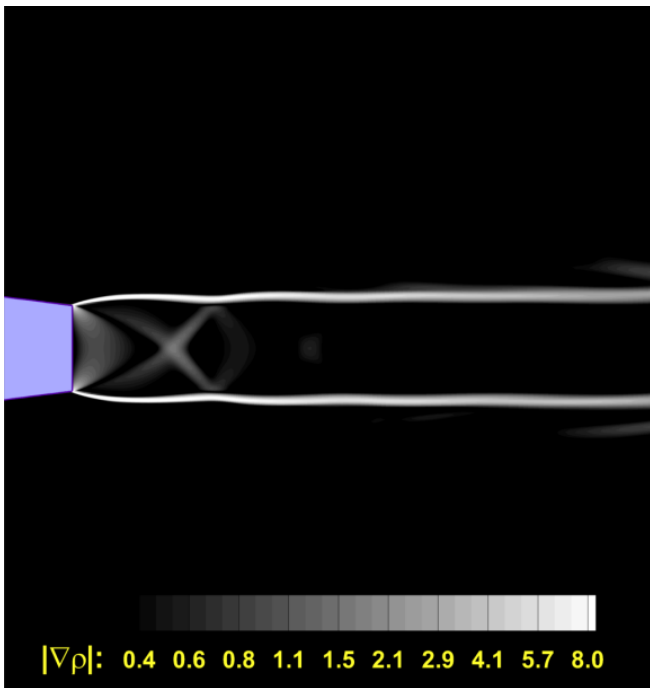


Схема EBR5-HYB



До 5-го порядка точности (на TC сетках) по цене LO



Bakhvalov, P.A. & Kozubskaya, T.K. Comput. Math. and Math. Phys. (2017) 57: 680.
<https://www.doi.org/10.1134/S0965542517040030>

Экономичные EBR схемы повышенной точности

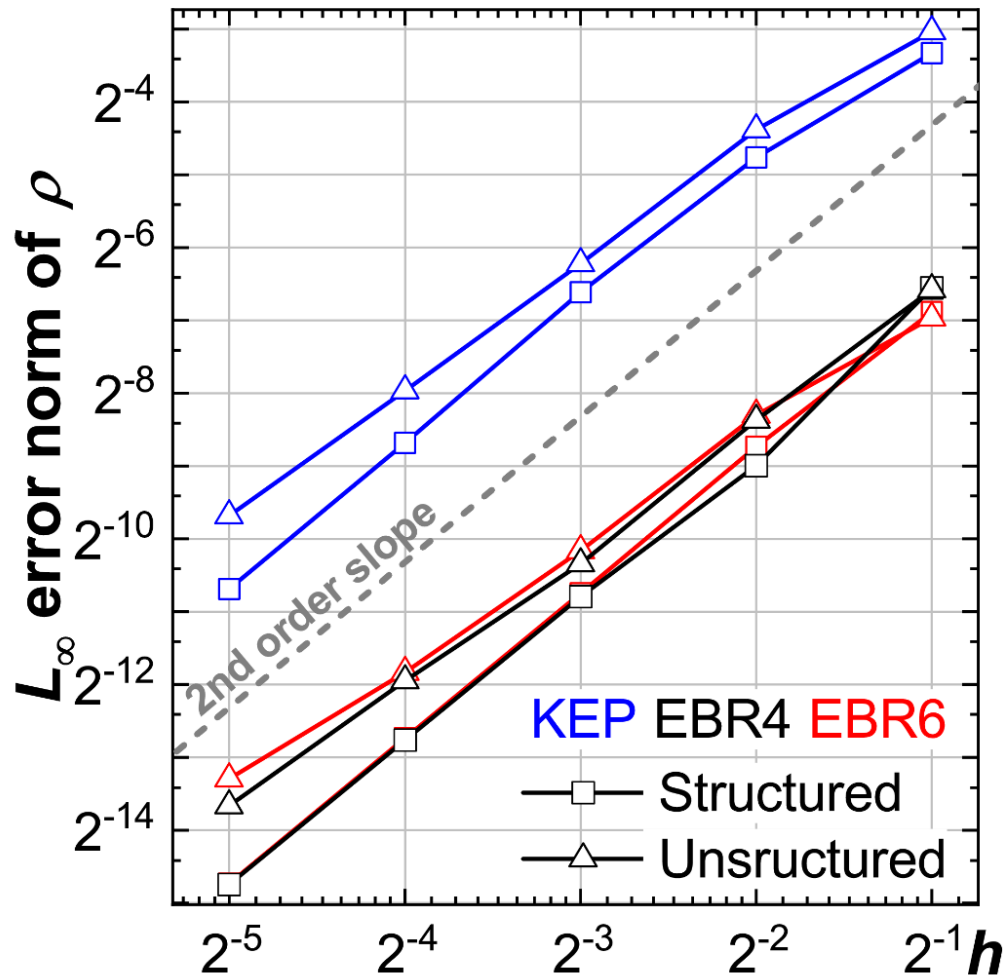
$$u_\phi = \begin{cases} M [r(2a-r)]^n, & r < 2a \\ 0, & r \geq 2a \end{cases}$$

$$a = 5, n = 4$$

$$u_0 = 1$$

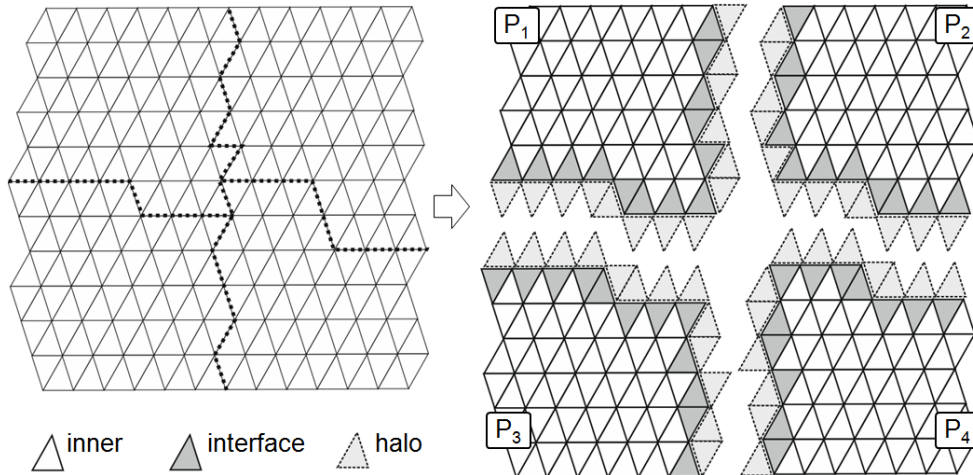
$$T_{\max} = 100$$

Computational domain: 25×25

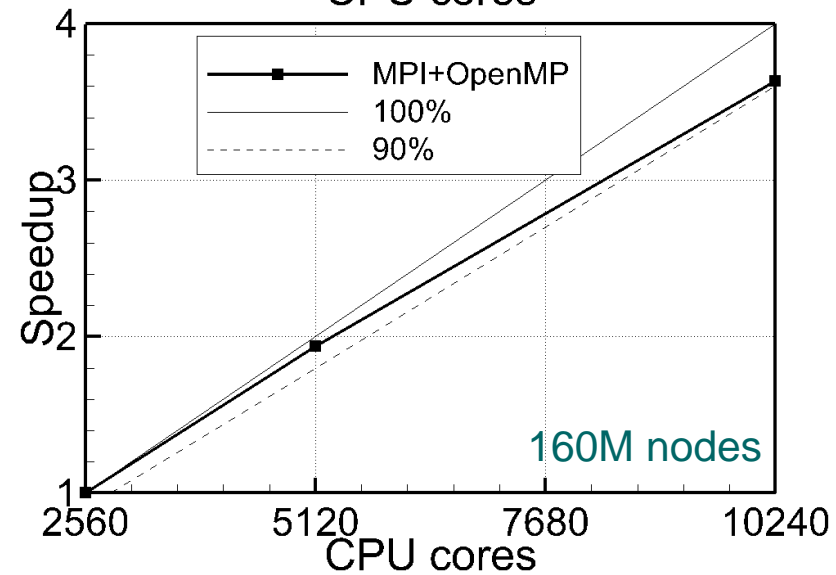
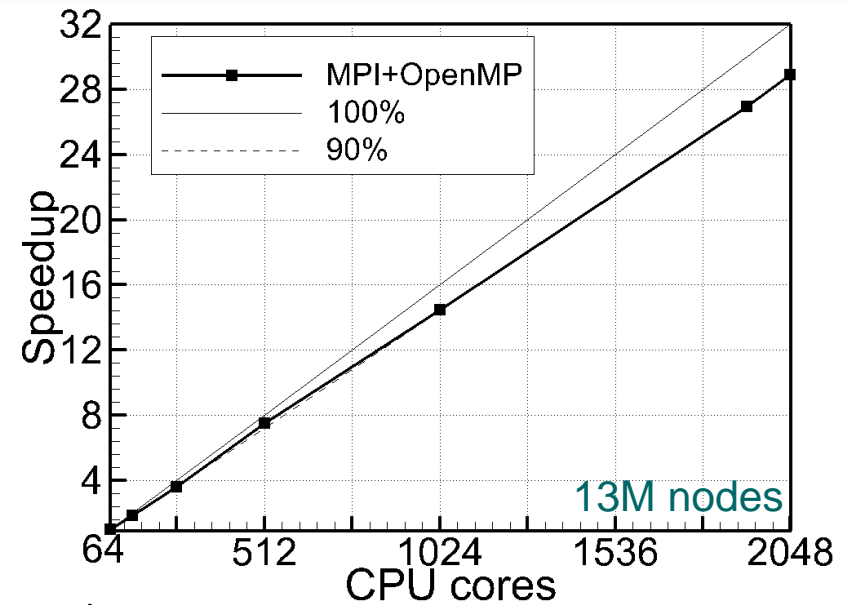
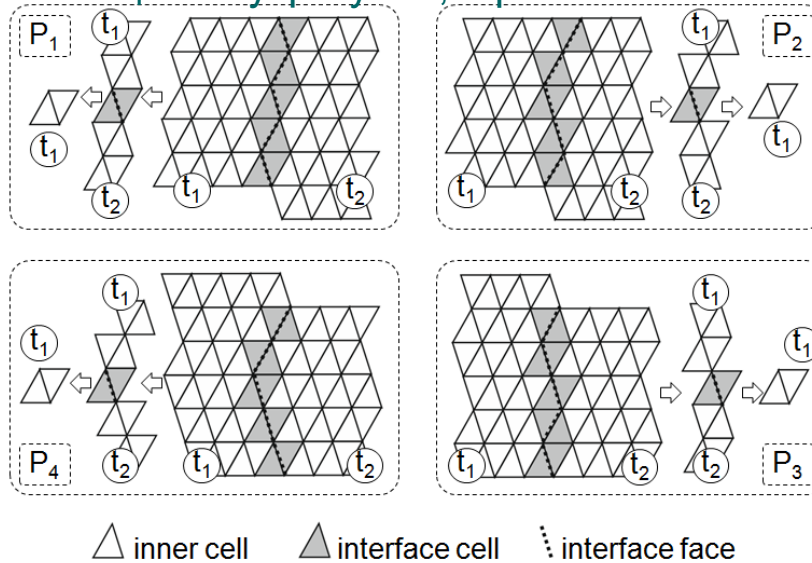


Многоуровневое MPI+OpenMP+OpenCL распараллеливание

Декомпозиция верхнего уровня, MPI



Декомпозиция внутри узла, OpenMP



A. Gorobets. Parallel Algorithm of the NOISEtte Code for CFD and CAA Simulations. Lobachevskii J Math (2018) 39: 524. <https://doi.org/10.1134/S1995080218040078>

- Ревизия по производительности вычислений
- Разработка элементов новой программной архитектуры
- OpenCL реализация для вычислений на ускорителях GPU

- Библиотека точных решений – ColESo
- Шайбы в прикладных задачах
- Численный beamforming

- Вычислительные эксперименты

- Прочистка высокочастотных ветвлений и лишних флопов
- Playground и Safemode конфигурации
- Слияние конвекции и вязкости
- Mixed accuracy – FP64 и FP32
- Упрощенная реализация расчета вязкости
- Простыня-реализация вместо отдельных подпрограмм

DES, SA, SMAG, EBR5

Ускорение **2.02X**

Сокращение потребления памяти **2.1X**

Channel	N calls	Time, s
MainTimeStep	50	25.412
Newton fluxes	50	16.141
Newton solver	50	7.555



Channel	N calls	Time, s
MainTimeStep	50	12.597
Newton fluxes	50	8.103
Newton solver	50	3.457

Что сделать со старым го-хламом?

- убрать на балкон, вывезти на дачу, запихать в **сарай...**

NOISETTE



NOISETTE – сарай

Сарай – исследовательская версия с полным набором схем, моделей, режимов, спецрежимов, заплаток, хлама, который жалко выкинуть



NOISETTE – бизнес-ланч

Бизнес-ланч – ограниченный фиксированный набор компонентов, использующихся на практике для серийных расчетов

- **Снижение потерь на нижнем уровне* на свичах, ветвлениях**

Уборка высокочастотных ветвлений под #ifdef

```
#define PLAYGROUND_MODE // Playground mode - special regimes enabled
```

- **Комплексные обеды из трех блюд и компота –**

снижение от потерь на высокочастотные вызовы подпрограмм

Развертка подпрограмм нижнего уровня в одну большую простыню
(реконструкция, распадник, вязкость, якобиан)

EBR[3,5] - ROE-VISC-TURB-IMPL

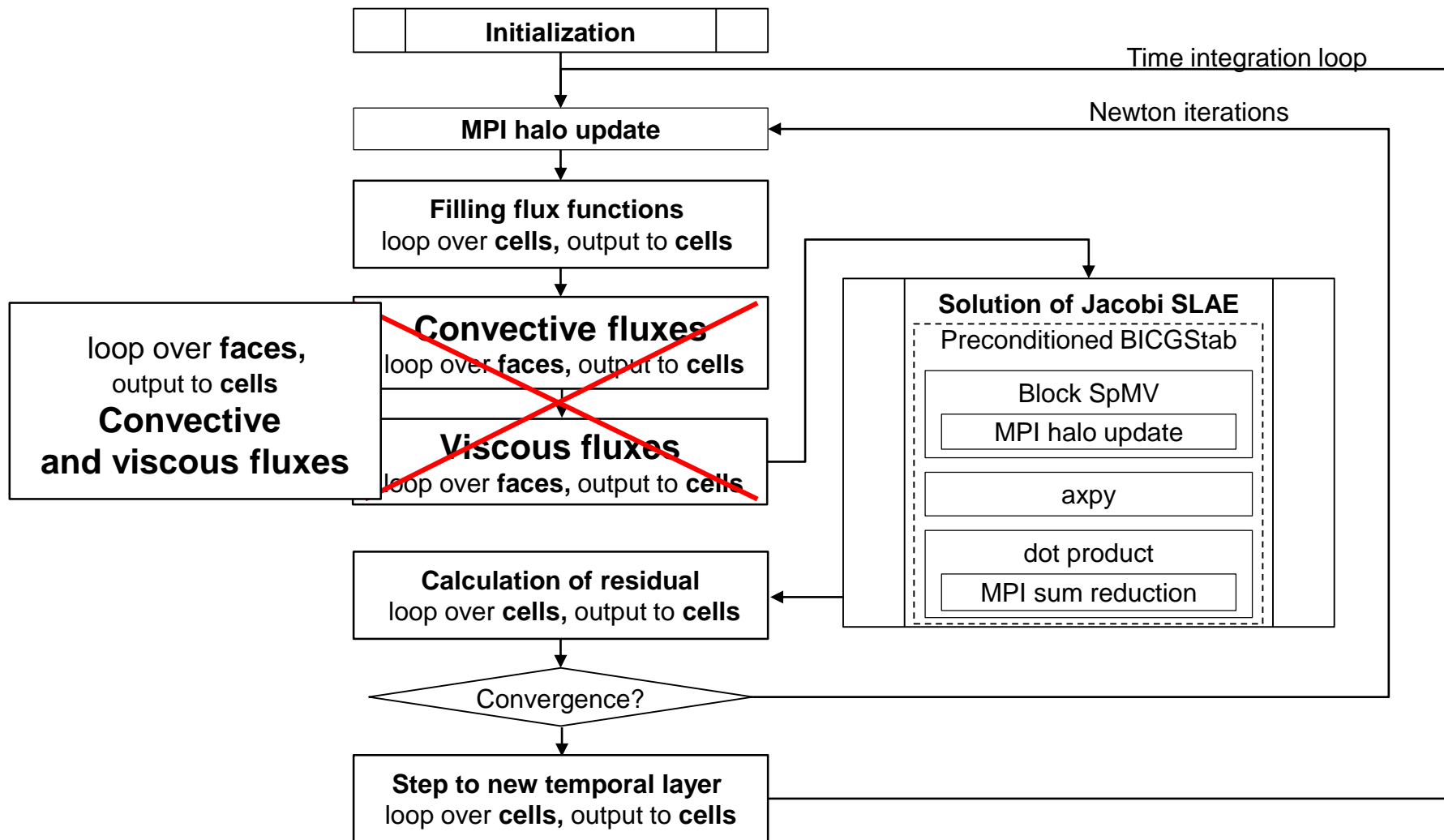
EBRWENO[3,5] - ROE-VISC-TURB-IMPL

- **Совмещение конвекции и вязкости в одну подпрограмму нижнего уровня**

Устранение потерь на повторное чтение и запись
самой большой структуры данных – якобиана

** То, внутри чего цикл по сеточным объектам – верхний уровень
То, что внутри такого цикла – нижний уровень*

Совмещение конвекции и вязкости в одну подпрограмму нижнего уровня устранение потерь на повторное чтение и запись якобиана



- **FP32** – емкие массивы геометрических коэффициентов;
– якобиан и внутренние массивы решателя СЛАУ
- **FP64** – все остальное

Конфигурация со смешанной точностью

```
#define LINAL_FLOAT // FP32 in solver

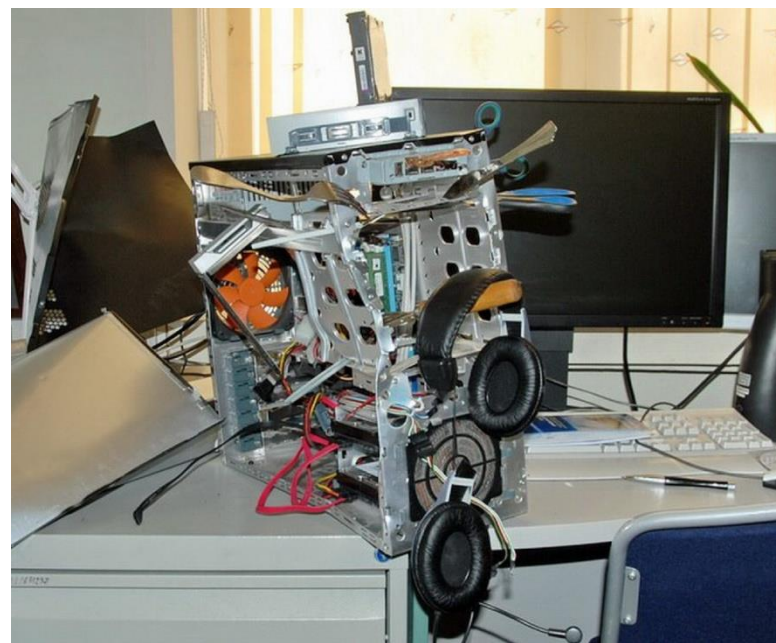
#ifdef LINAL_FLOAT
typedef double linal_real; // Solver data
typedef double dif_real;   // Geometry coefficients
#else
typedef float linal_real;
typedef float dif_real;
#endif
```

x1.5 к скорости

- **Дополнительная защита от ошибок в доступе к данным**
- **Снижение потерь производительности на проверках корректности на нижнем уровне**

Уборка высокочастотных проверок под `#ifdef`
`#define SAFE_MODE`

```
// Low-level checks
#ifdef SAFE_MODE
#define SAFE_ASSERT(X,...) if(!(X)) exit(Crash( __VA_ARGS__));
#else
#define SAFE_ASSERT(X,...) // disabled
#endif
// High-level checks – always enabled
#define ASSERT(X,...) if(!(X)) exit(Crash( __VA_ARGS__));
```



Ущерб матчасти, сопутствующий отладке параллельного кода

Новые extra safe... контейнеры для сеточных данных

для хранения векторов, блочных векторов и топологий определенного вида

E – элементы, **N** – узлы, **S** – ребра, **F** – грани,

топология: **EN**, **EF**, **FN**, **SN**, **NN**, **EE**, **NE**, **NS**, **FE**, **NF**, **SF**, **SE**...

- Индекс определенного вида

```
typedef int tInt; // Integer index value (to switch 32/64 bit if needed)
enum IdxKind{IDX_N=0, IDX_E=1, IDX_S=2, IDX_F=3};
template<tIdxKind I> class tIdx;
```

- Вектор сеточных данных по набору объектов определенного вида

```
template <tIdxKind I, typename T> class Array;
```

- Блок блочного вектора

```
template <typename T> class Block;
```

- Блочный вектор (operator[] на сейфмоде дает блок, на релизе – plain pointer)

```
template <tIdxKind I, typename T> class BlockArray;
inline BLOCK(T) operator[](tIdx<I> i);
```

- Блочный вектор с переменным размером блока (для топологии)

```
template <tIdxKind I, typename T> class VBlockArray;
```

```

tIdx<IDX_N> n_beg, n_end; // Range for nodes
tIdx<IDX_E> e_beg, e_end; // Range for elements
// ...
tBlockArray<IDX_N, double> BAN; // Some block array over nodes
tVBlockArray<IDX_E, tIdx<IDX_N> > EN_topo; // Elements-Nodes mesh topology
// ...
void DoSomething1(tIdx<IDX_N> in, BLOCK(double) v);
void DoSomething2(tIdx<IDX_N> in, tIdx<IDX_E> ie, BLOCK(double) v);
// ...
//for(tIdx<IDX_N> in=e_beg; in<n_end; ++ie) // Compile-time error
for(tIdx<IDX_N> in=n_beg; in<n_end; ++in) // Loop over nodes
    DoSomething1(in, BAN[in]);
// ...
for(tIdx<IDX_E> ie=e_beg; ie<e_end; ++ie){ // Loop over elements
    tIdx<IDX_N> in;
    BLOCK(tIdx<IDX_N>) nodes = EN_topo[ie]; // The nodes of the element
//BLOCK(tIdx<IDX_N>) nodes = EN_topo[in]; // Compile-time error
    for(int j=0; j<EN_topo.BlockSize(ie); ++j){
//for(int j=0; j<=EN_topo.BlockSize(ie); ++j){ // Runtime error at block access check
        in = nodes[j];
//in = ie; // Compile-time error
//DoSomething2(ie, in, BAN[in]); // Compile-time error
        DoSomething2(in, ie, BAN[in]);
    }
}
}

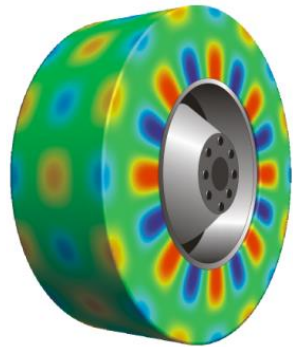
```

- **Контейнеры знают свои имена для диагностики на релизе**
- **Защита на runtime от ошибок по доступу к данным с проверкой по двум индексам блочного вектора**
- **Защита на compile-time от ошибок по виду объектов**
нельзя будет полезть в массив по узлам с индексом от элементов
- **Совмещение cell- и vertex-centred схем**
с защитой на link-time и runtime
- **Полное отсутствие оверхеда на релизе**

A. Gorobets, P. Bakhvalov. Improving Reliability of Supercomputer CFD Codes on Unstructured Meshes. Supercomputing Frontiers and Innovations. (2020 ??)

OpenCL реализация вычислительного ядра NOISETTE

- Бизнес-ланч на GPU
- Готовность: явные схемы LO, EBR3, EBR5, вязкость
- В процессе: турбулентность, неявная схема
- Упрощенный режим 1 процесс – один девайс
- Режим обменов overlap – только в решателе СЛАУ
- Пока только наивная реализация. 1 GPU \approx 2 CPU



Collection of Exact Solutions

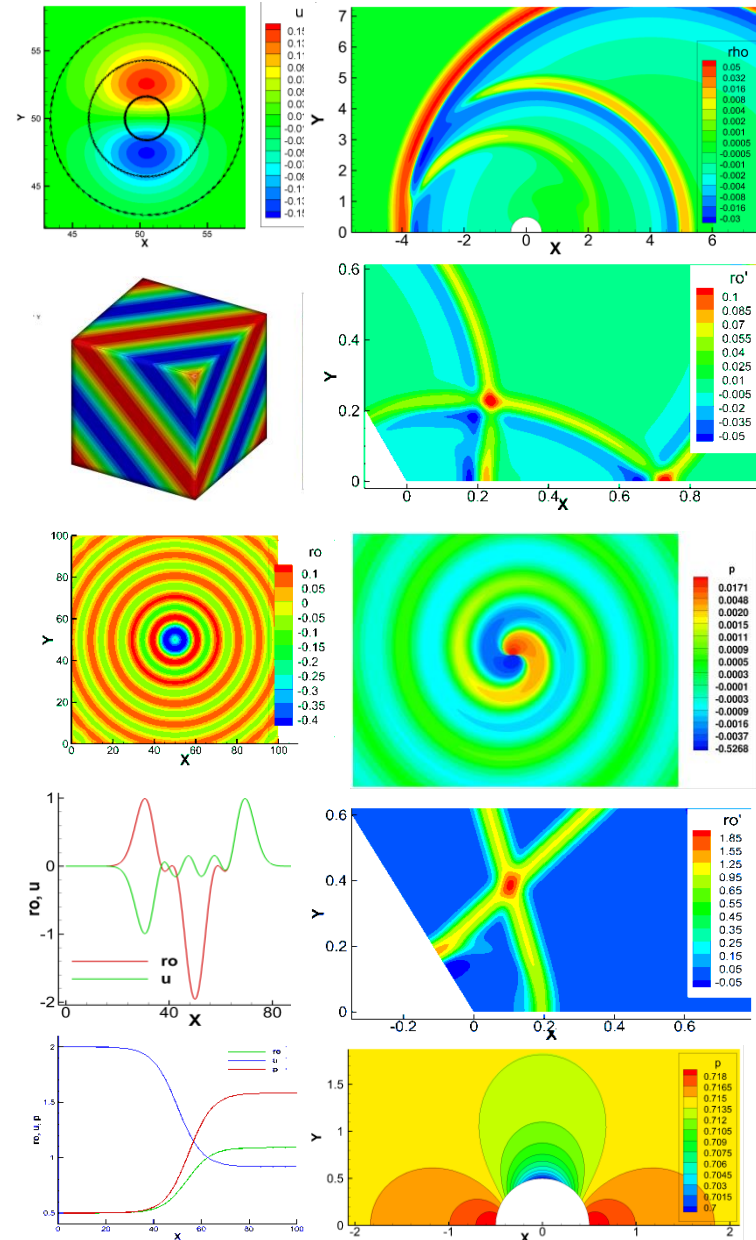
П. А. Бахвалов

ES->PointValue(Time, Coor, Vars);
время, координаты, блок переменных

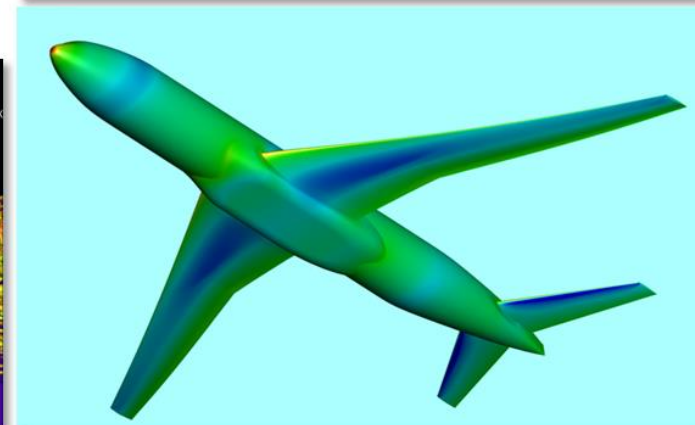
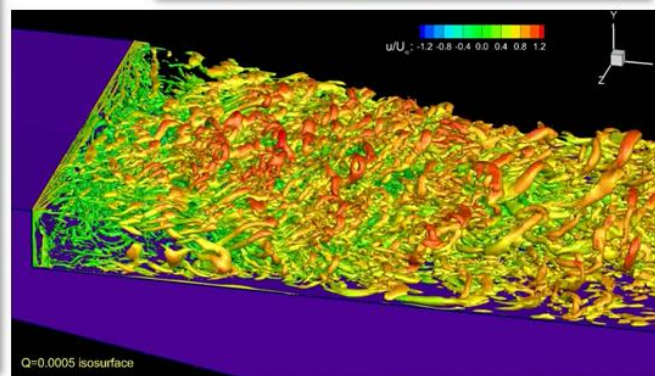
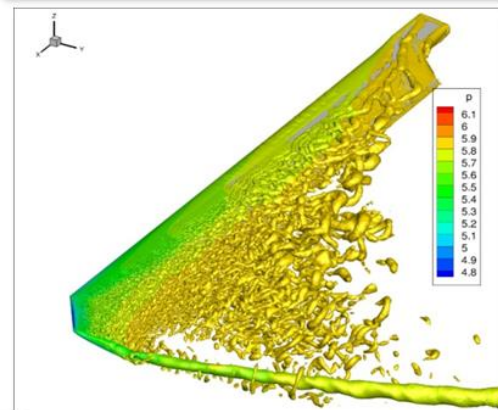
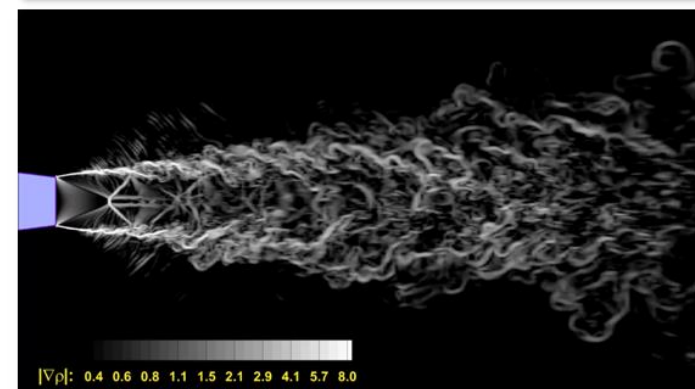
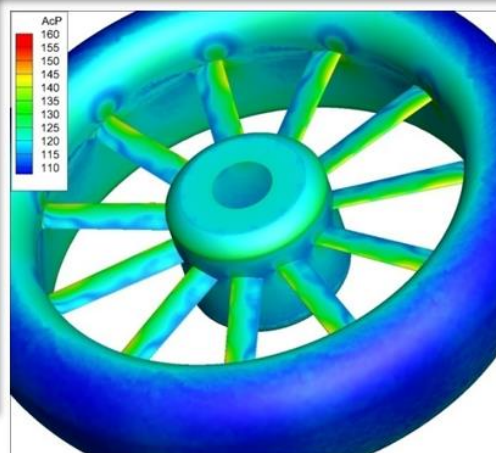
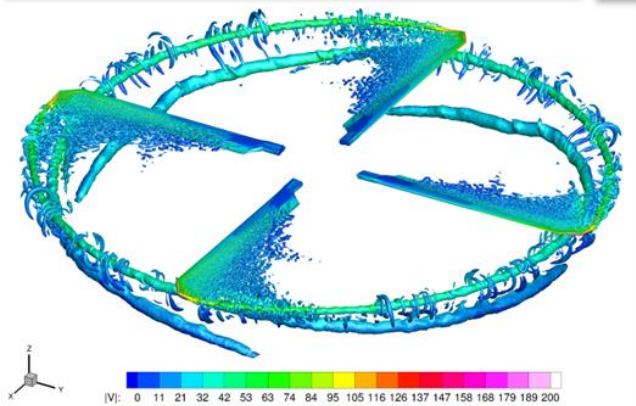
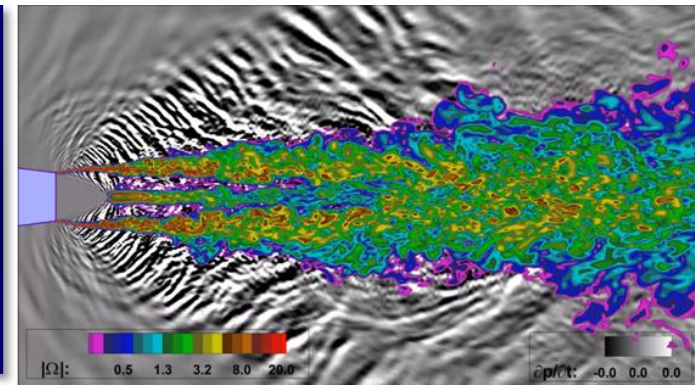
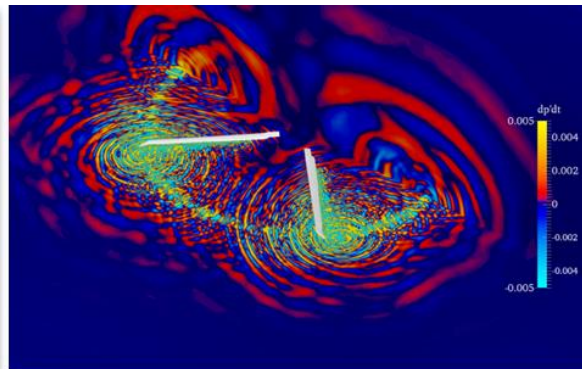
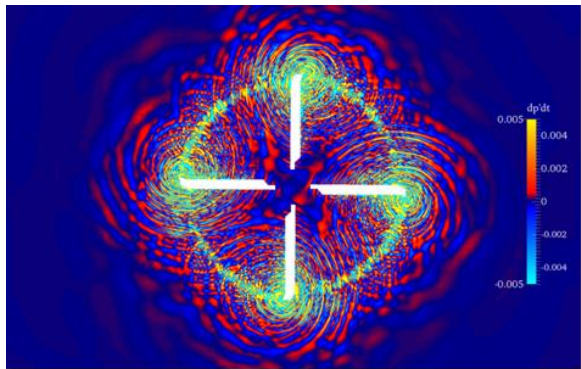
O(30) точных решений

- Акустика в свободном пространстве
- Акустика в канале при наличии вязкости
- Задачи дифракции
- Низкорейнольдсовы задачи (структура УВ, течение Куэтта, ...)
- Плоские вихри
- Одномерные ударно-волновые задачи

Если кому нужна – обращайтесь



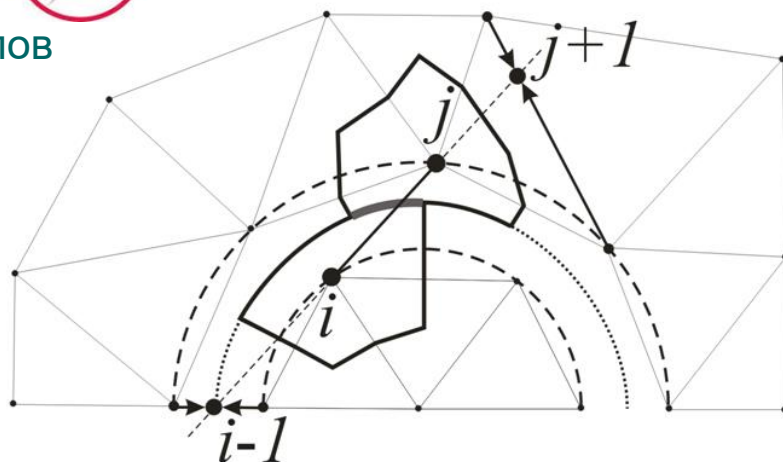
CFD и САА приложения



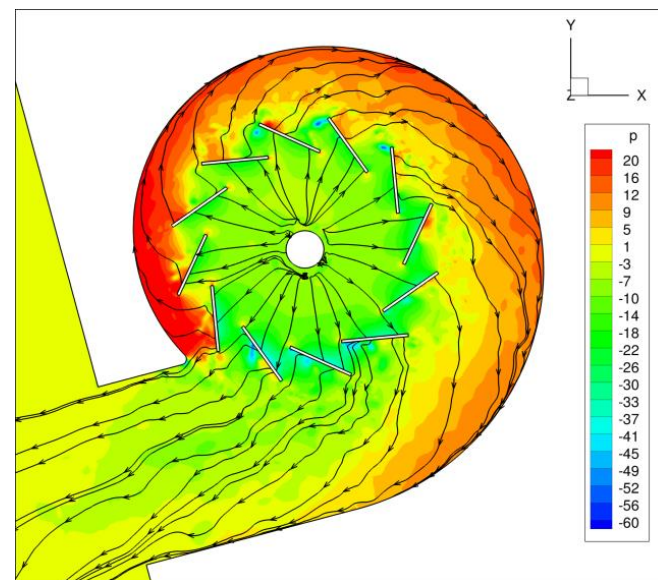
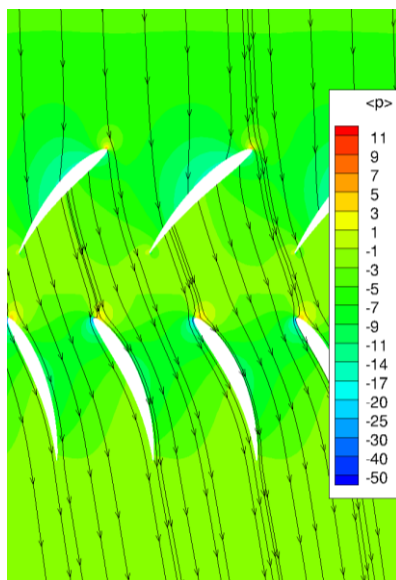
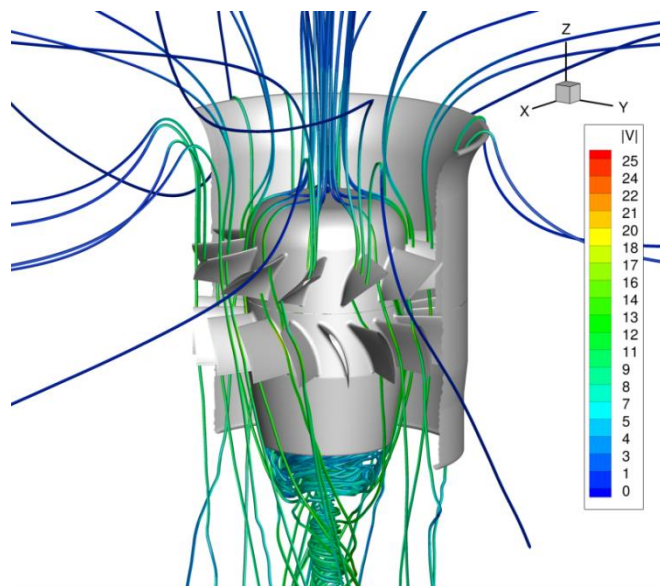
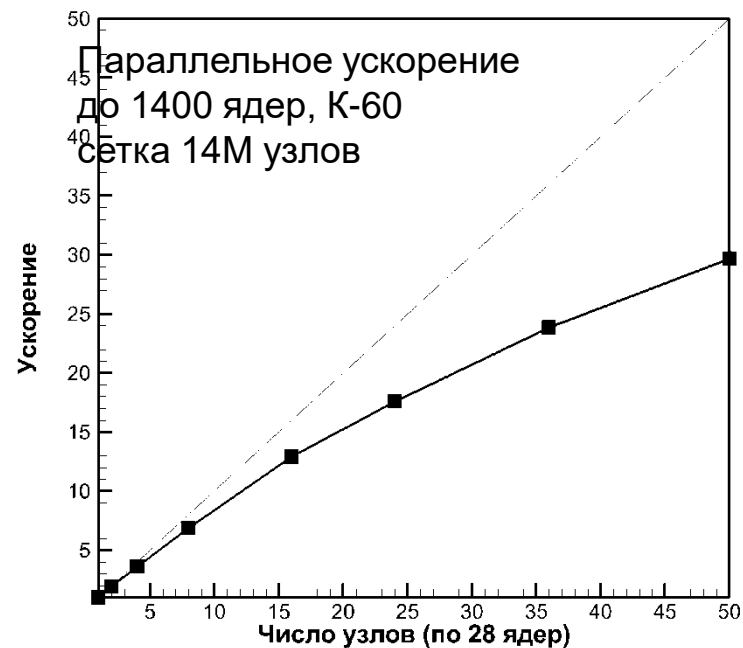
Шайба – скользящий интерфейс



Павел Бахвалов

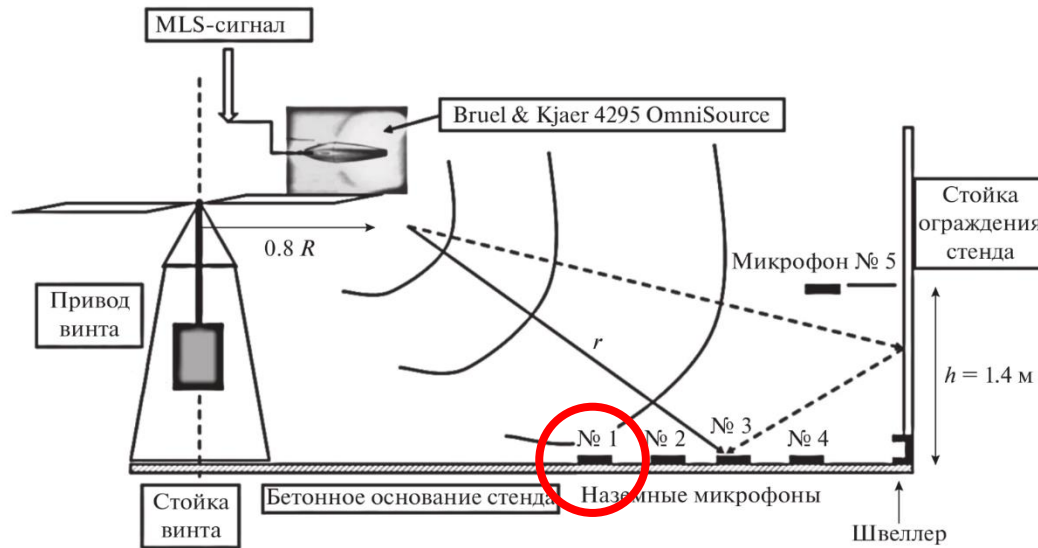


Контрольные объемы в зазоре

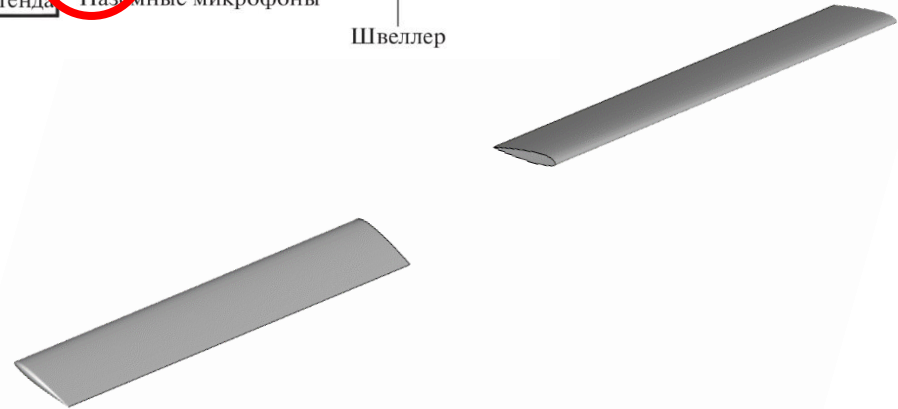


Моделирование акустики жесткого винта

Владимир Бобков



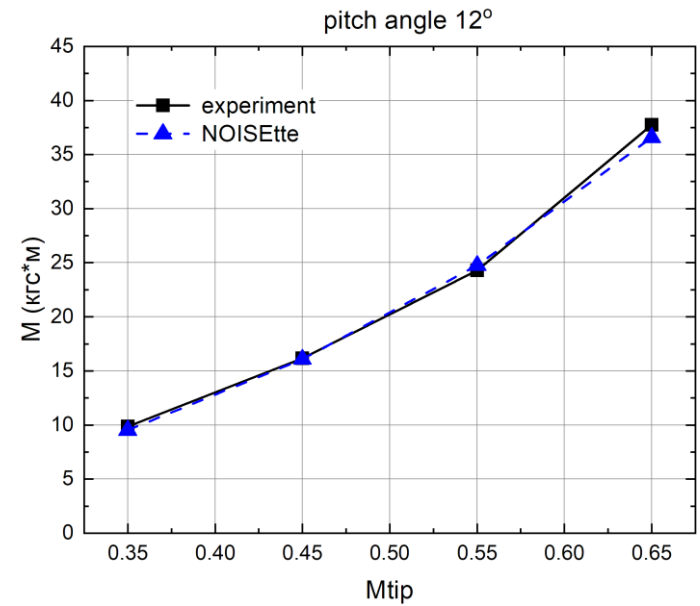
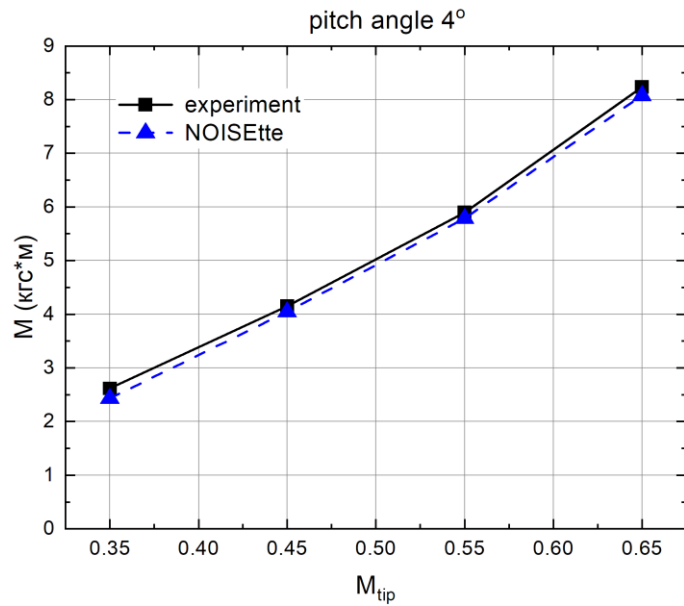
**$R=1.38\text{м}$, хорда 0.13м ,
профиль лопасти - **NACA23015, 23012**
830 - 1541 об/мин (120 - 222 м/с)
 M_{tip} 0.35, 0.45, 0.55, 0.65
угол установки лопастей $4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$
URANS, FWH**



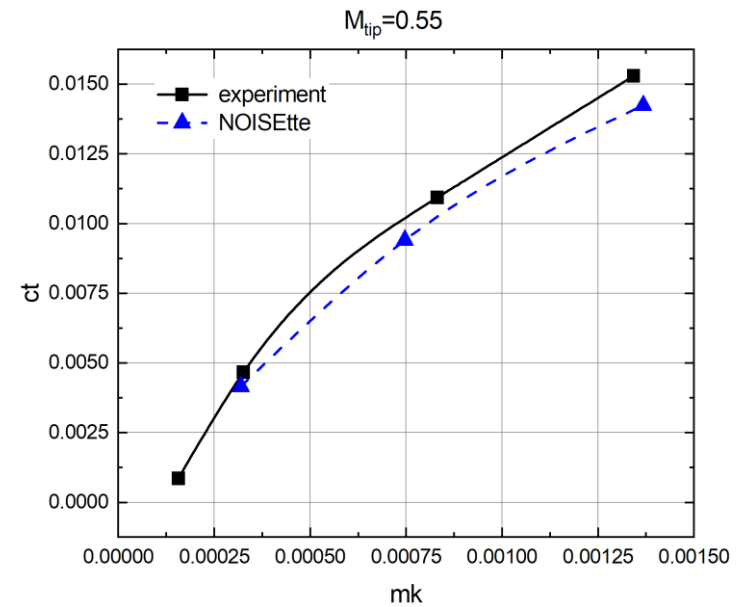
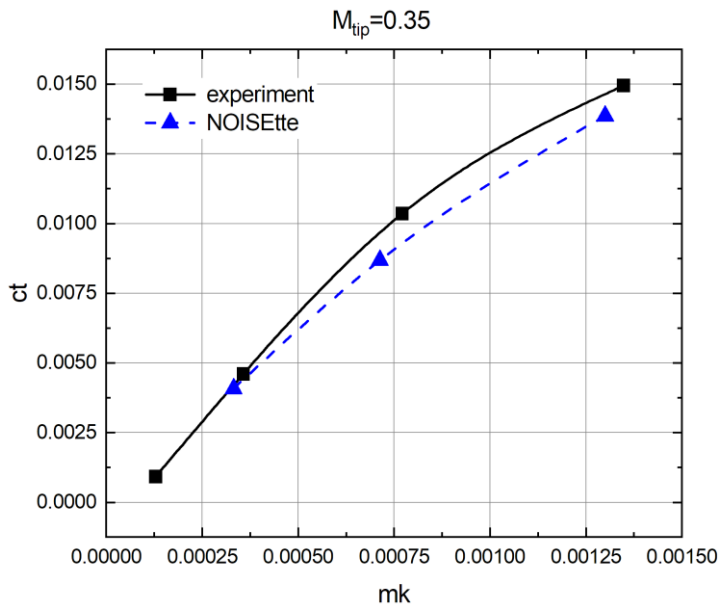
Копьев В.Ф. и др. Об определении акустических характеристик моделей несущих вертолетных винтов на открытом стенде // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 6. С. 725–730. DOI: 10.7868/s032079191605004x

Копьев В.Ф. и др. Расчет шума несущего винта вертолета и его экспериментальная проверка на режиме висения, «Акустический журнал» // Акустический журнал. 2017. № 6. С. 651–664. DOI: 10.7868/s0320791917060077

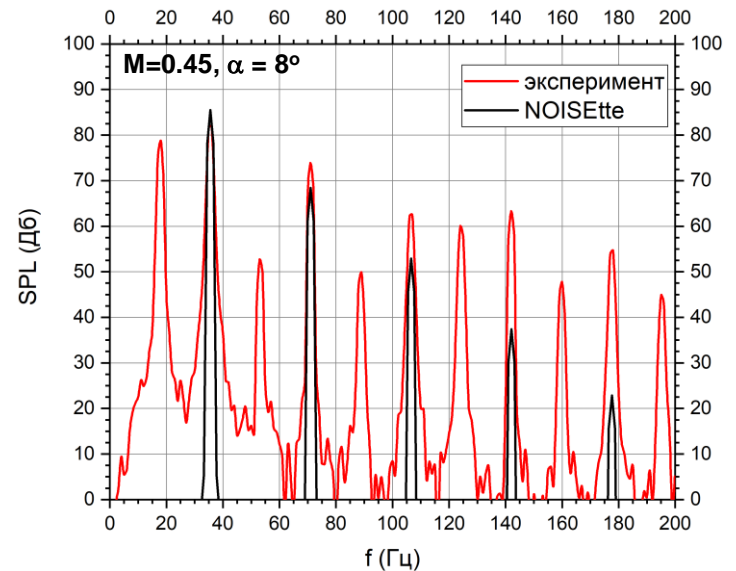
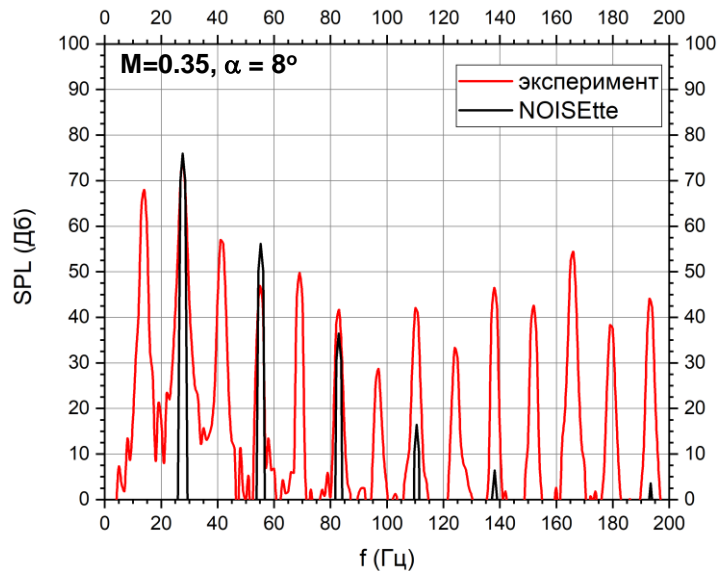
Моделирование акустики жесткого винта



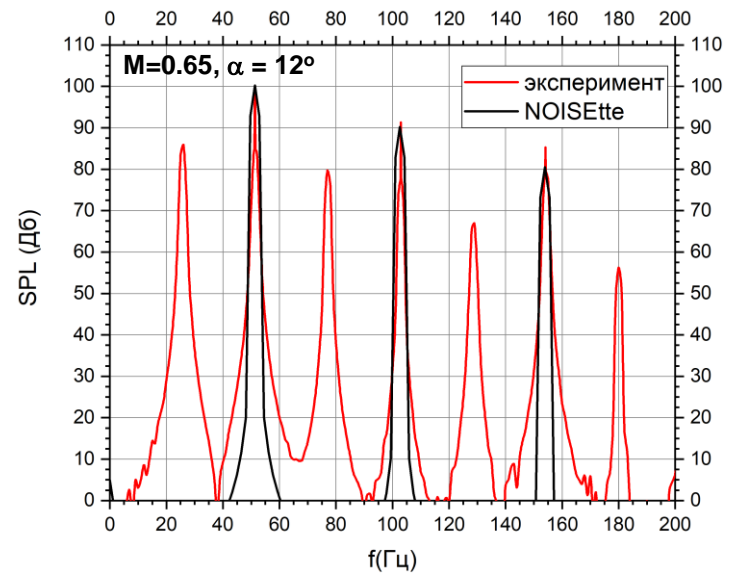
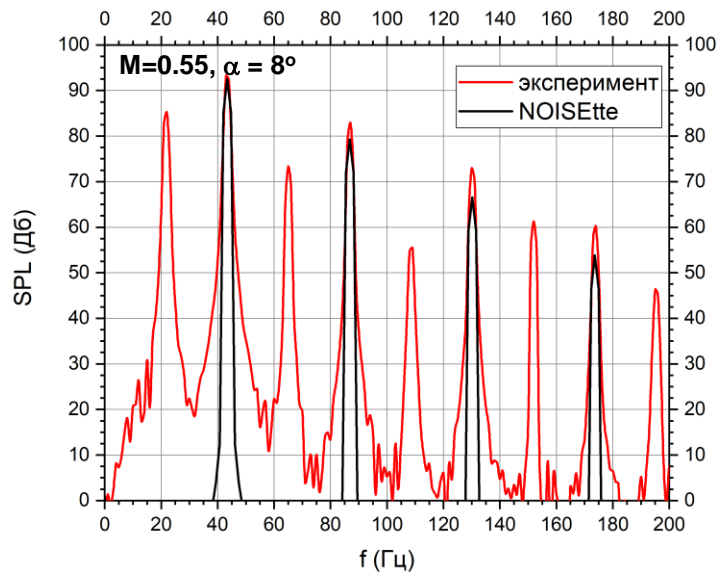
Аэродинамика



Моделирование акустики жесткого винта



Акустика



Струя из двухконтурного сопла

Алексей Дубень

Эксперимент В.И. Запрягаева
ИТПМ СО РАН



$Re_D = 3 \cdot 10^6$

Подход: σ -DDES + Δ_ω

Схема: гибридная EBR-WENO CD+Urw+WENO

Сетка: 26.6 млн. узлов, 200 по азимуту

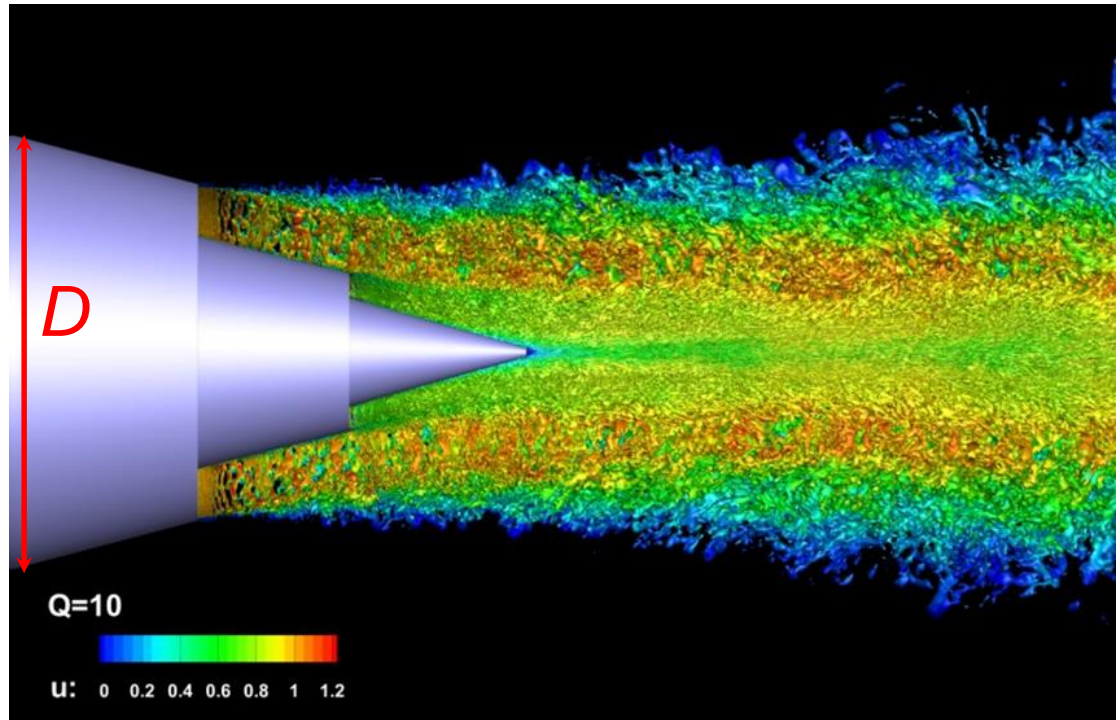
Контур	NPR	M_{jet}
Внешний	1.72	0.915
Внутренний	2.25	1.141

Вычислительная стоимость

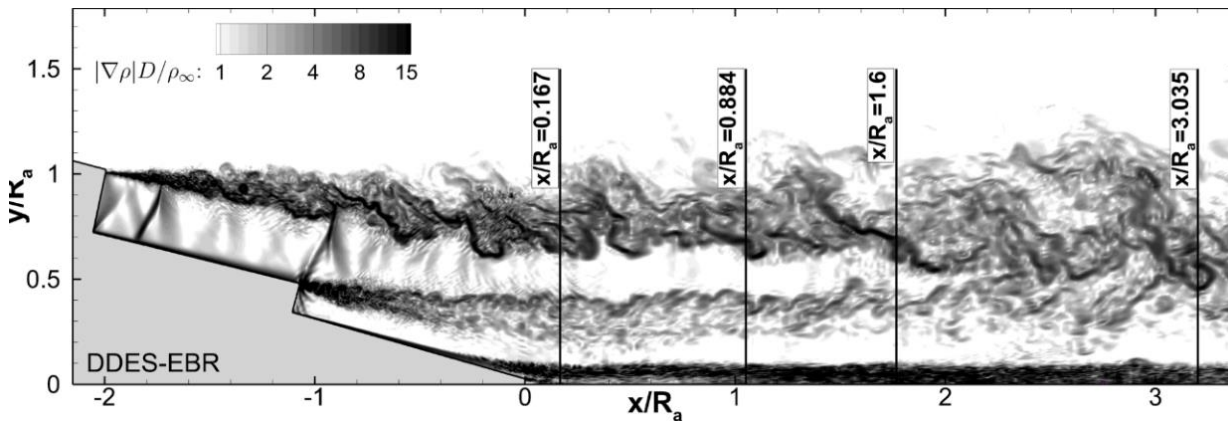
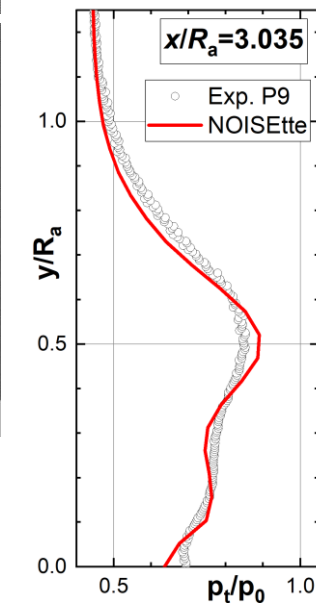
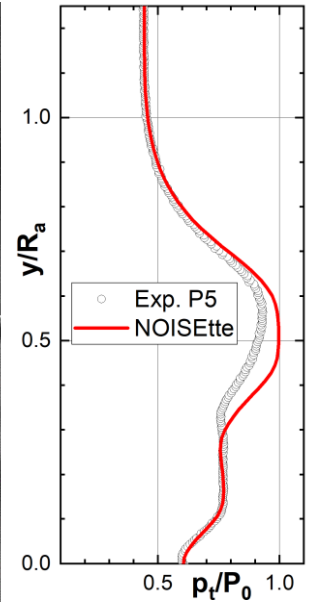
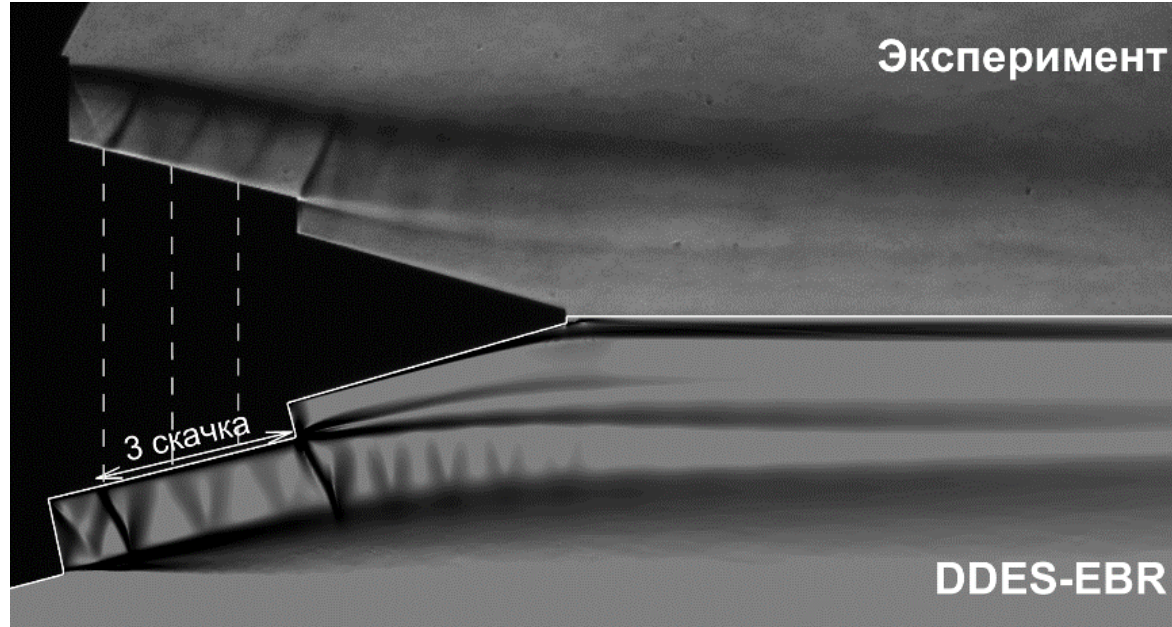
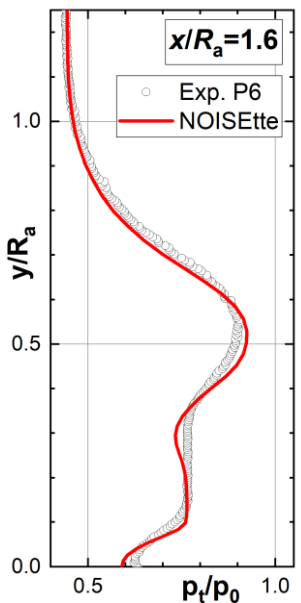
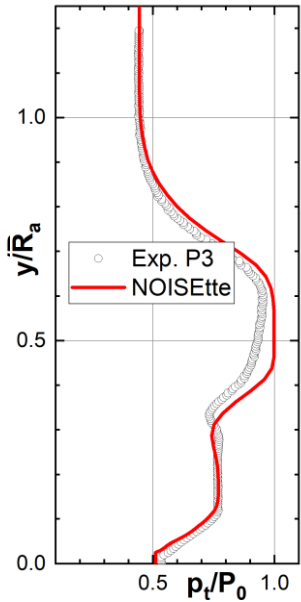
10 D/c $_\infty$

80MPI \times 12 OpenMP = 960 CPU (ЦКП КИ)

12 ч, 11K CPUh



Струя из двухконтурного сопла



С.М. Босняков, А.В. Волков, А.П. Дубень, В.И. Запрягаев, Т.К. Козубская,
С.В. Михайлов, А.И. Трошин, В.О. Цветкова.
Матем. моделирование, 31(10) (2019) 130-144

Данные ЦАГИ

Эксперимент А.А. Желтоводова

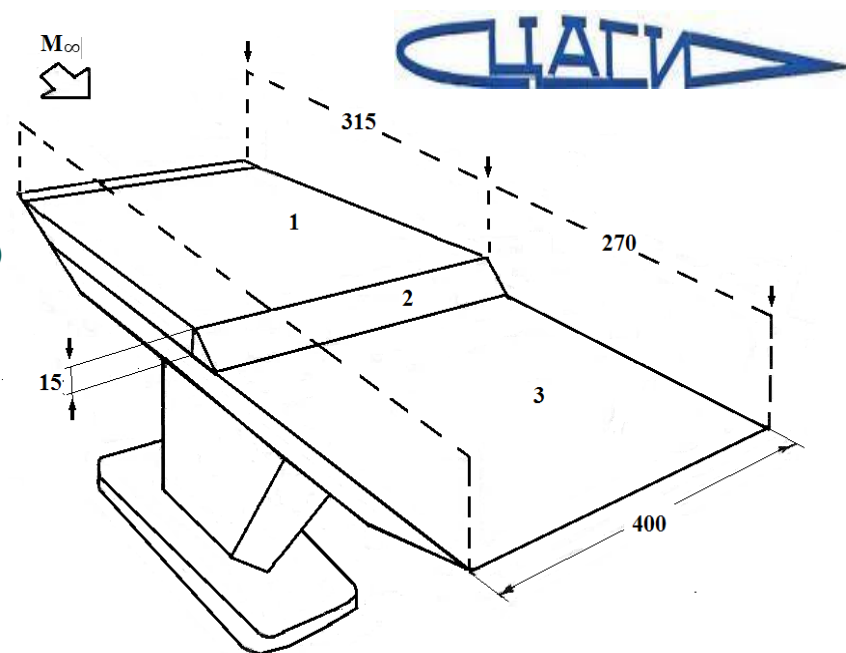
ИТПМ СО РАН

$M_\infty=3$, $Re_h=4.905 \cdot 10^6$

Подход: IDDES + STG*

Схема: гибридная EBR-WENO CD+Upw+WENO

Сетка: 18.6 млн. узлов, 151 по z ($L_z=1.5h$)

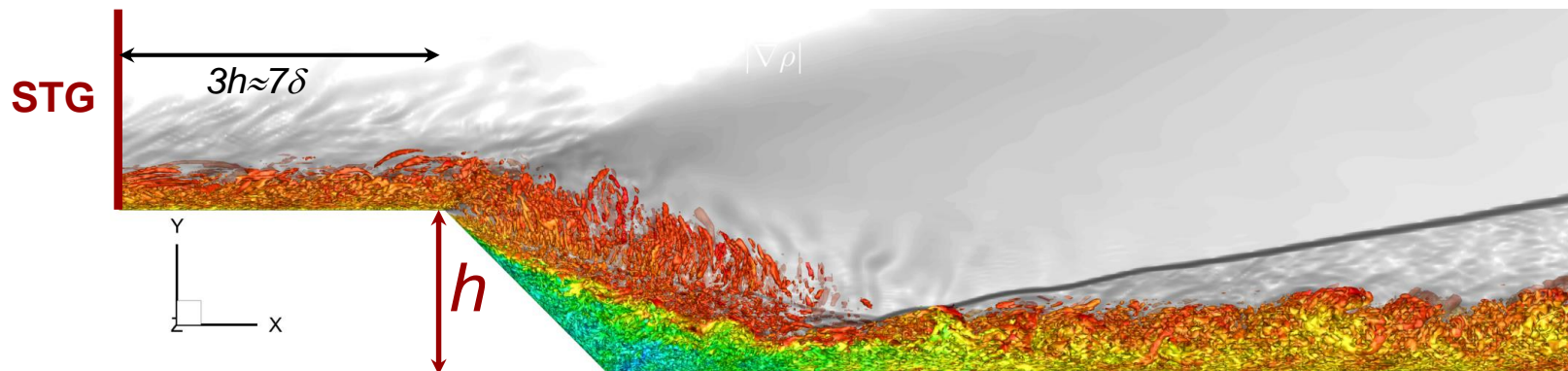


Вычислительная стоимость

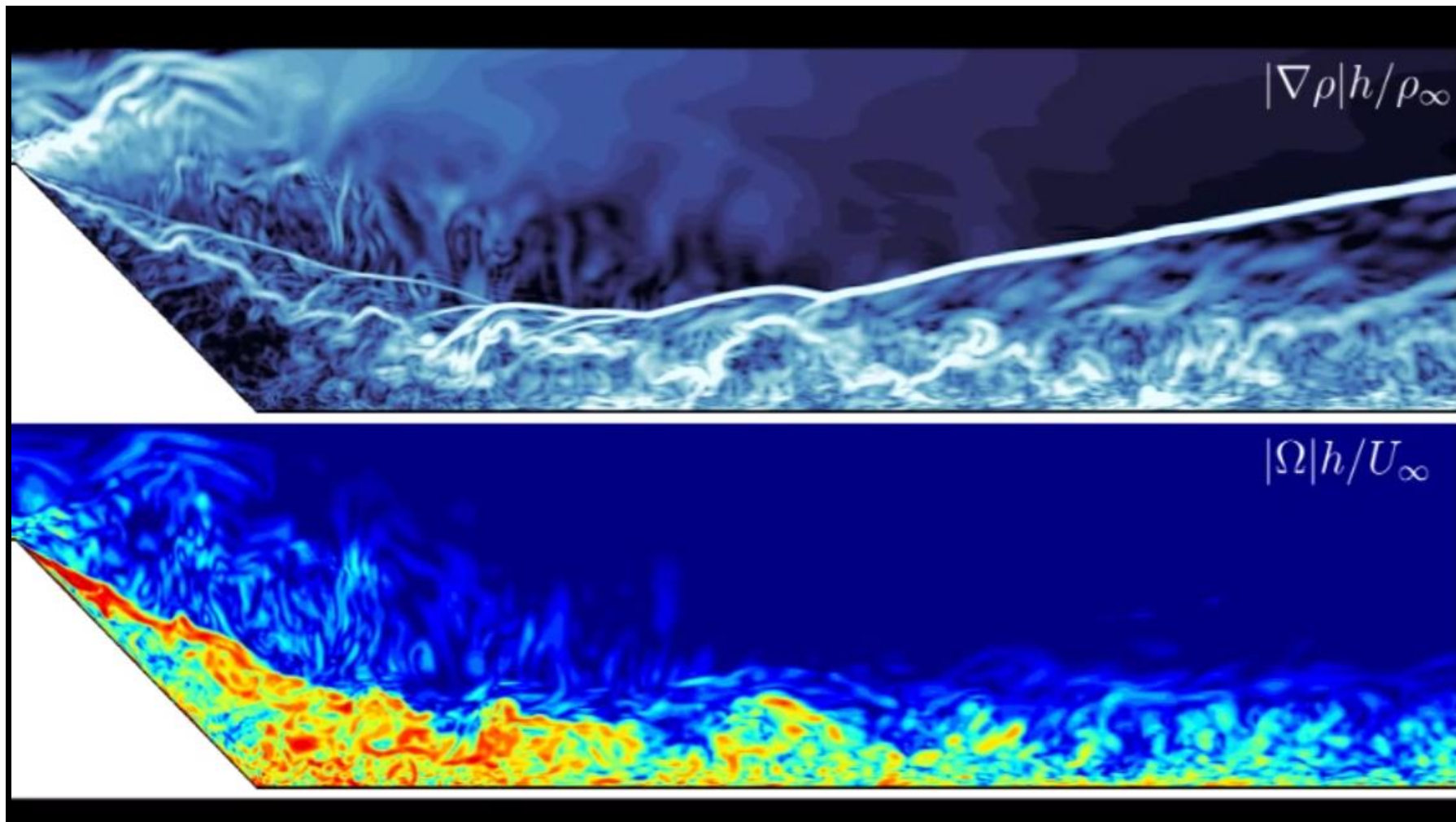
$10 h/U_\infty$

80MPI × 12 OpenMP = 960 CPU (ЦКП КИ)

16 ч, 15K CPUh

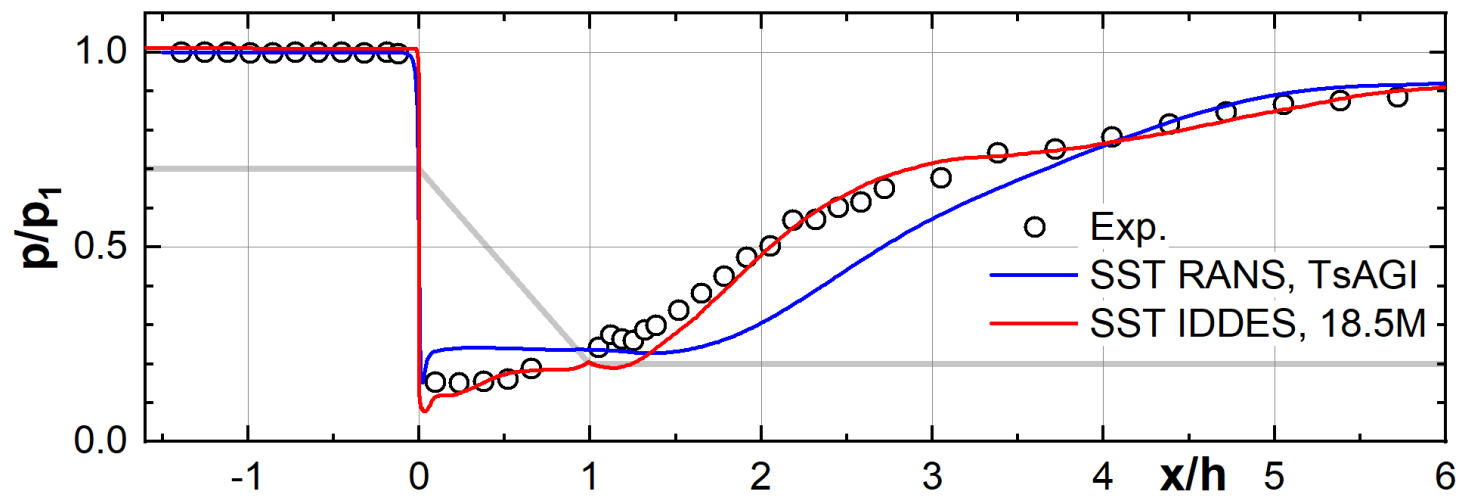
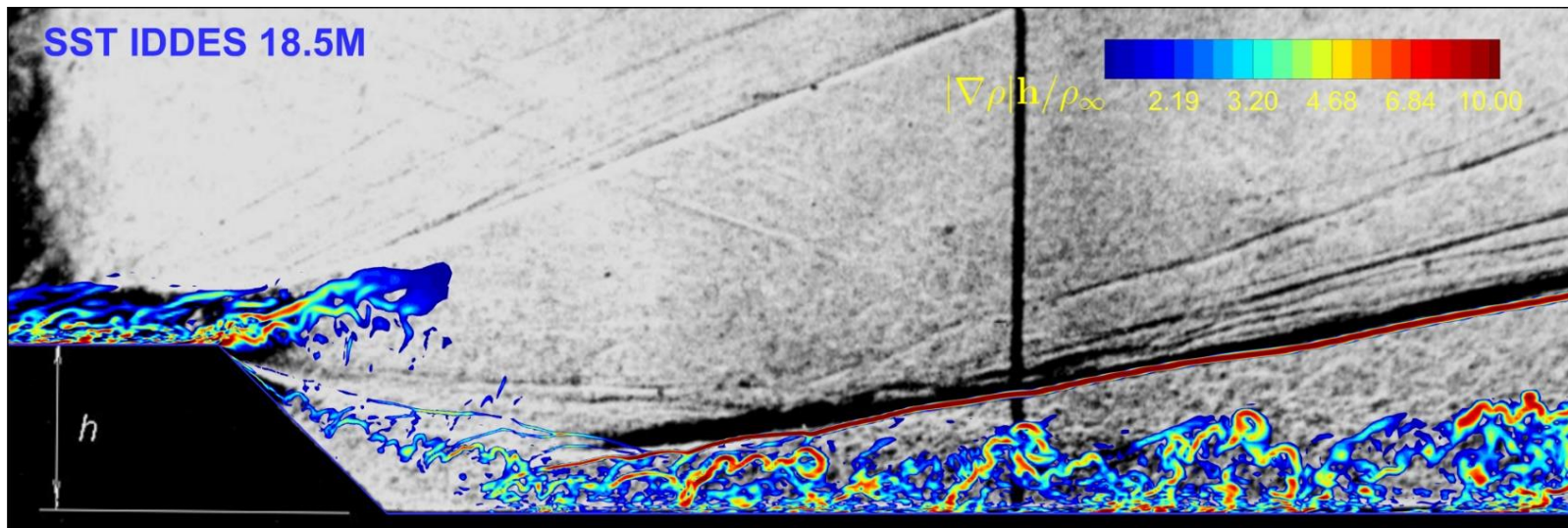


*) Shur M., Spalart P., Strelets M., Travin A. // Flow, Turbul. Combust., 2014, **93**(1), 63-92.



С.М. Босняков, А.П. Дубень, А.А. Желтоводов, Т.К. Козубская, С.В. Матяш, С.В. Михайлов.
Численное моделирование сверхзвукового отрывного обтекания обратного наклонного уступа
методами RANS И LES // Матем. моделирование, 31(11) (2019) 3-20

Сверхзвуковое обтекание наклонного обратного уступа



Пульсации давления возле ракеты космического назначения

Алексей Дубень

$M_\infty=0.85\div 1.3$, $Re\approx 10^7$

Подход: IDDES + VSTG*

Метод: гибридная EBR-WENO CD+Urw+WENO

Сетки: 27-63 млн. узлов, 200-400 по азимуту

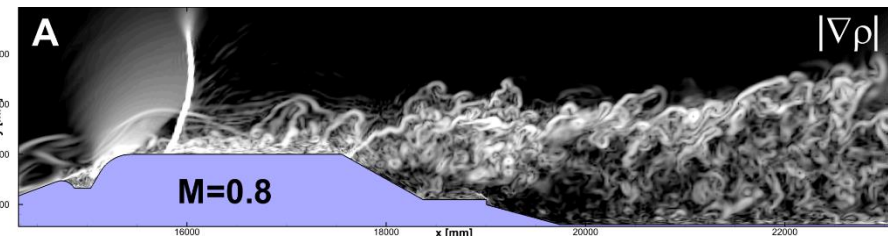
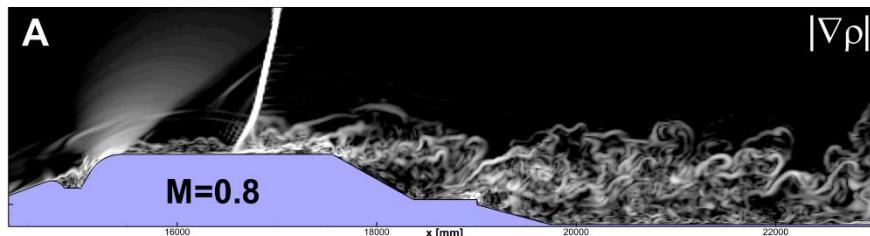
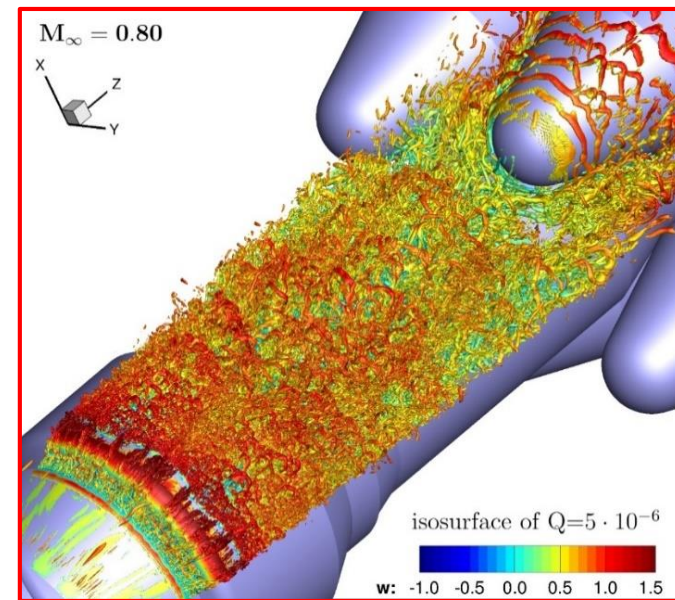
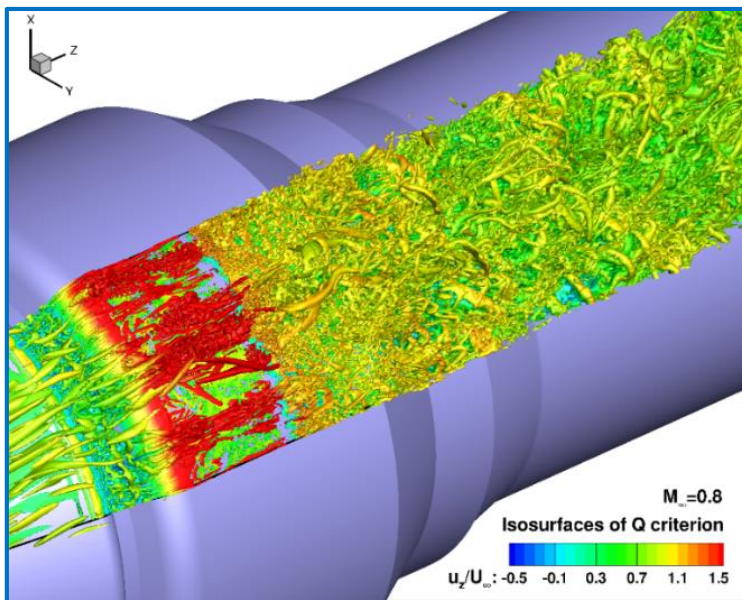


Вычислительная стоимость

63 млн. узлов, 0.1 сек

160MPI × 12 OpenMP = 1920 CPU (ЦКП КИ)

60 ч, 115K CPUh



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

Аэродинамический шум от стреловидного крыла

Алексей Дубень, Павел Родионов



3-компонентный профиль 30P30N

$$M_\infty=0.17 \quad Re_c=1.7 \cdot 10^6$$

Подход: σ -DDES + Δ_ω

Метод: гибридная EBR CD+Urw

Сетки: 11-39 млн. узлов

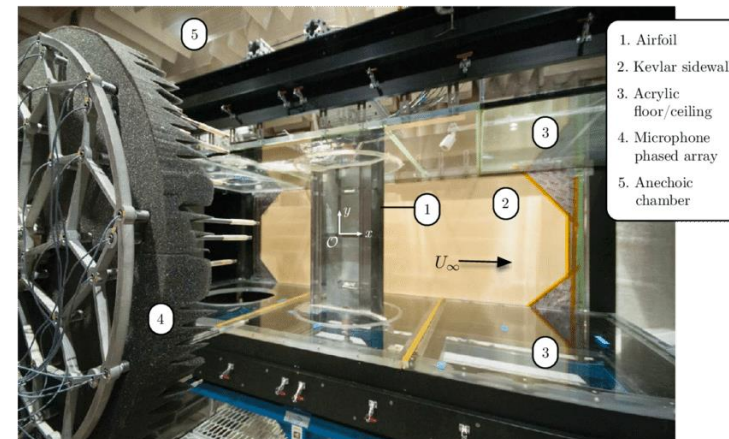
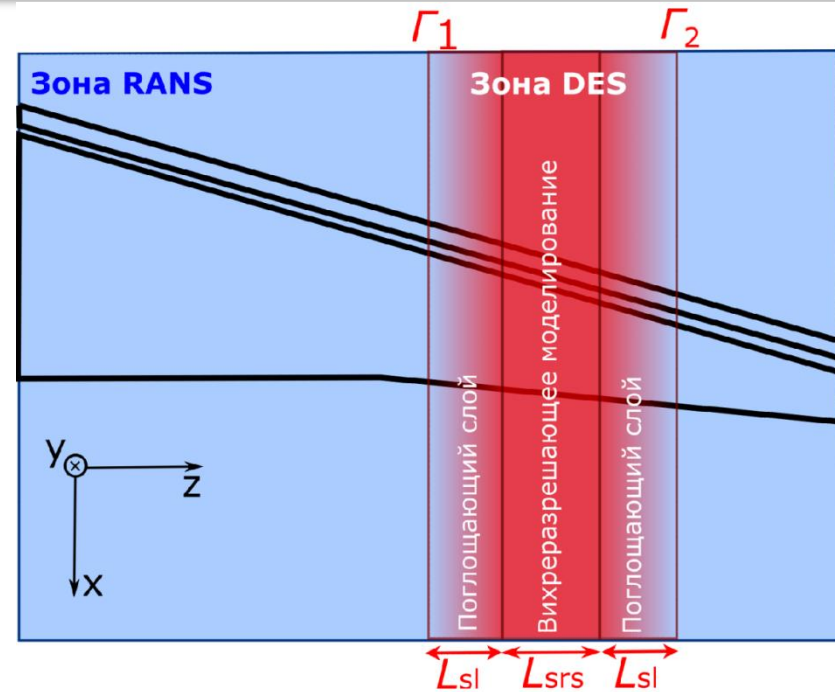
+Технология поглощающего слоя (Sponge layer)

Цель

Отработка технологии расчета шума от сегмента стреловидного крыла

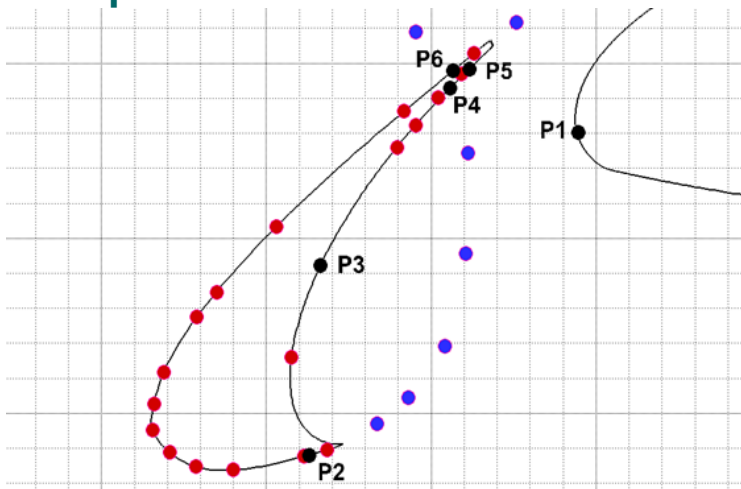
Этапы:

1. RANS стреловидного крыла
2. DES сегмента крыла с буферной зоной до выходных боковых границ

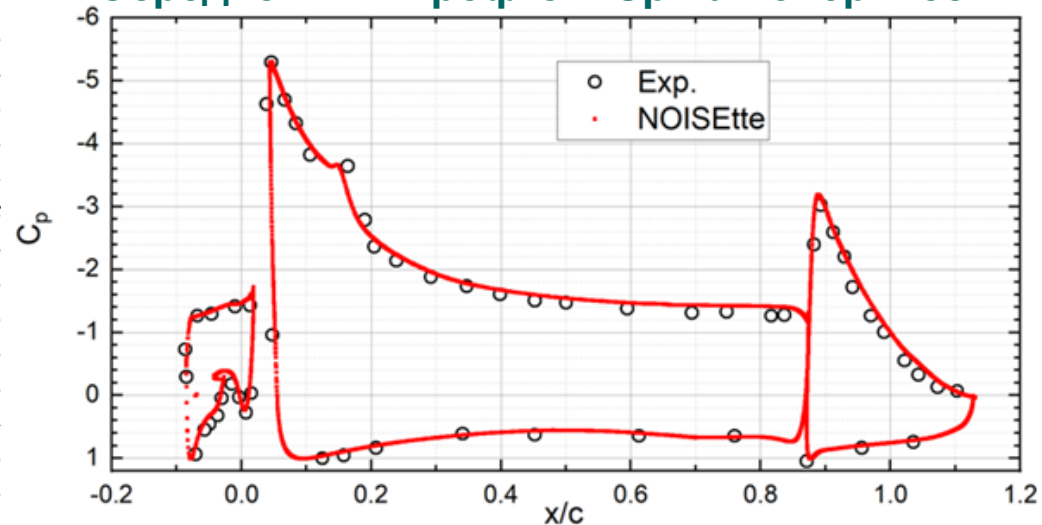


Pascioni, Kyle & Cattafesta, Louis. (2016) Aeroacoustic Measurements of Leading-Edge Slat Noise 22nd AIAA/CEAS. DOI: 10.2514/6.2016-2960

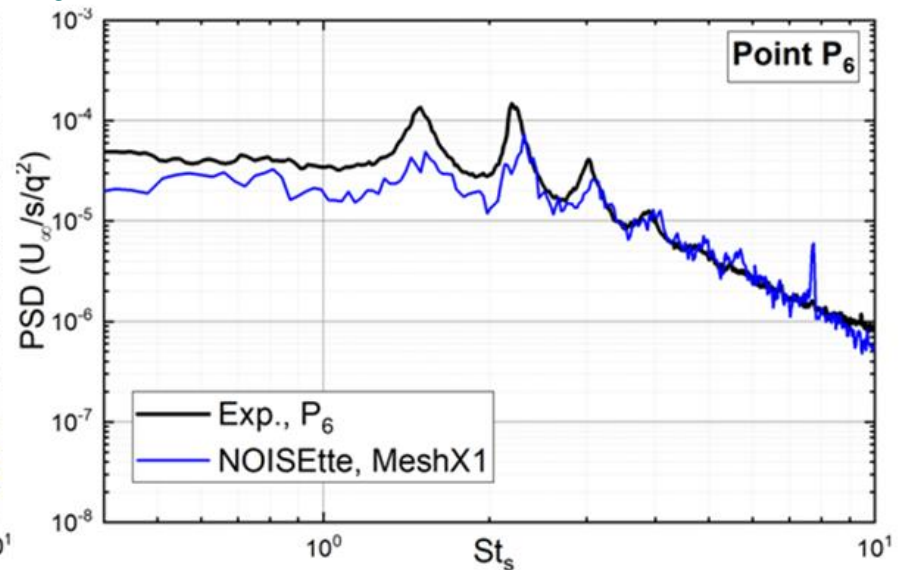
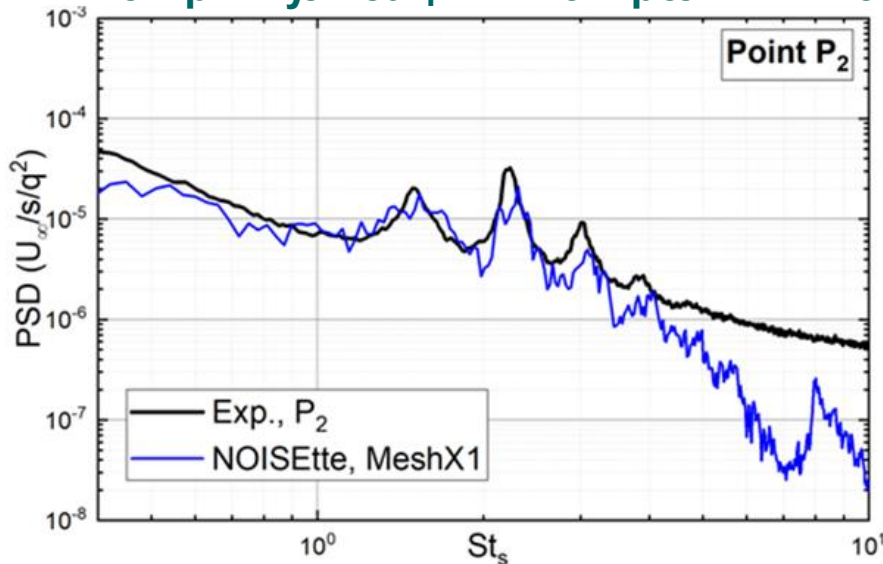
Контрольные точки



Осредненный профиль C_p на поверхности



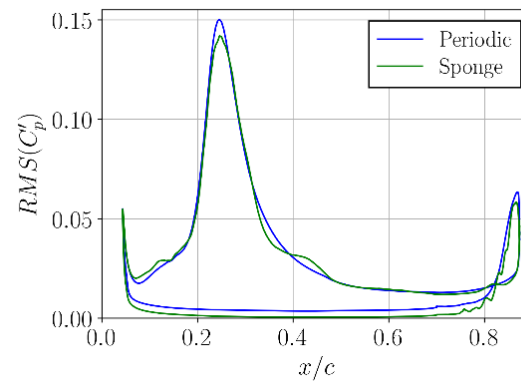
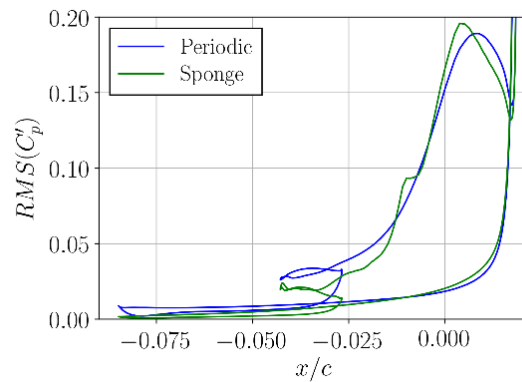
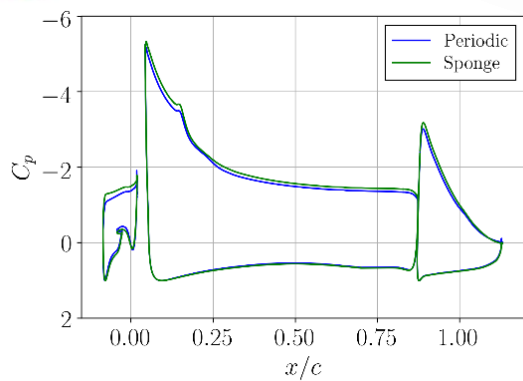
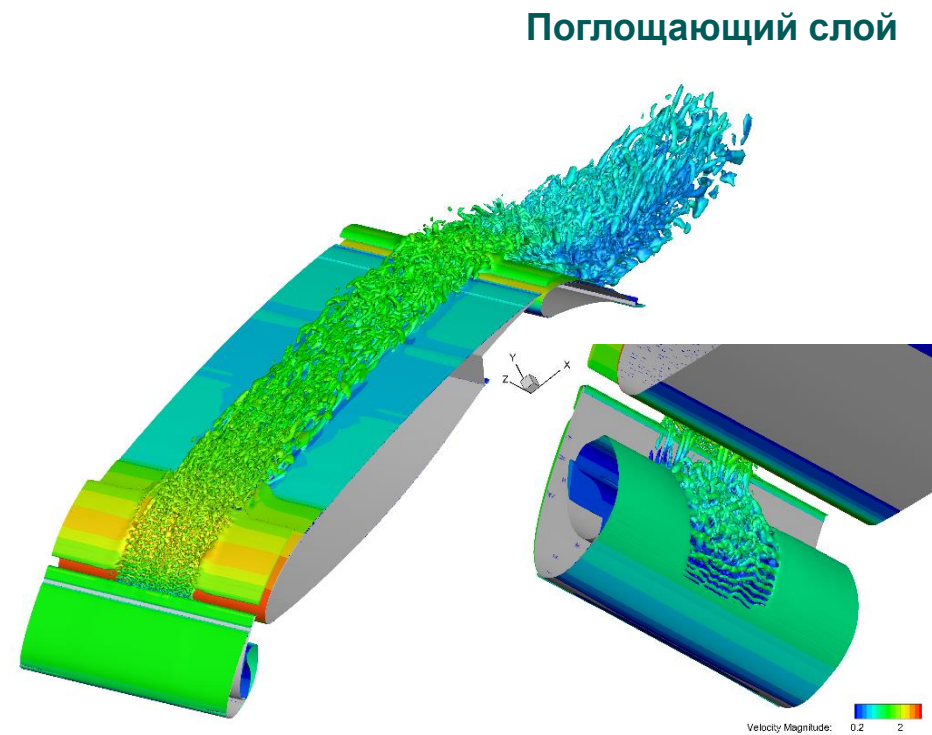
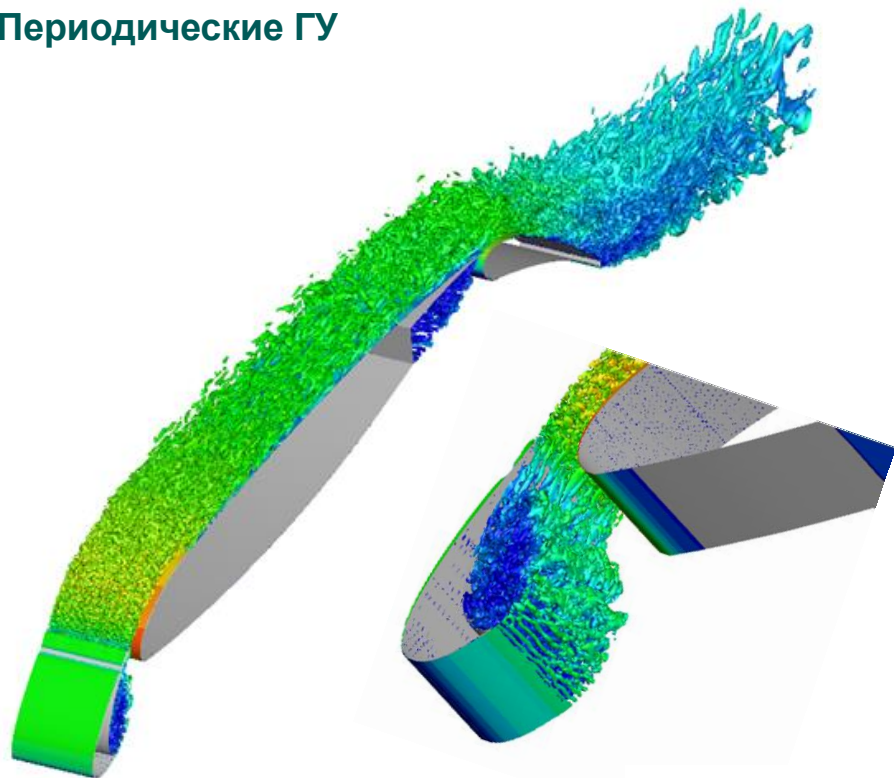
Спектры пульсаций в контрольных точках



Прямое крыло

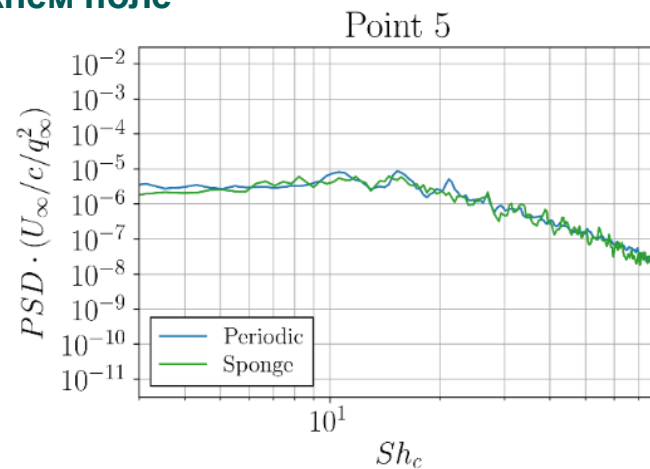
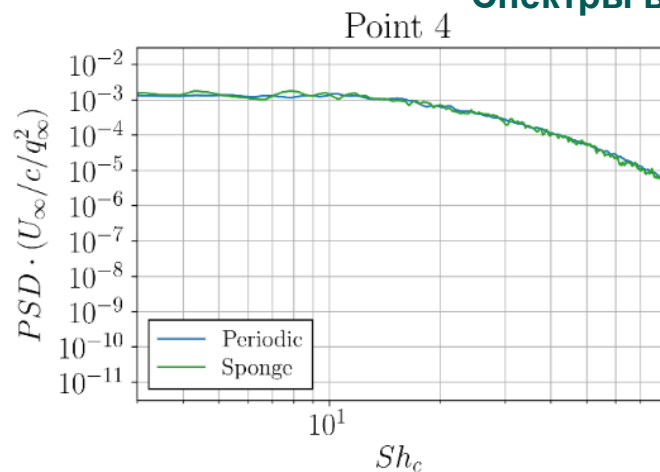
Периодические ГУ

Поглощающий слой

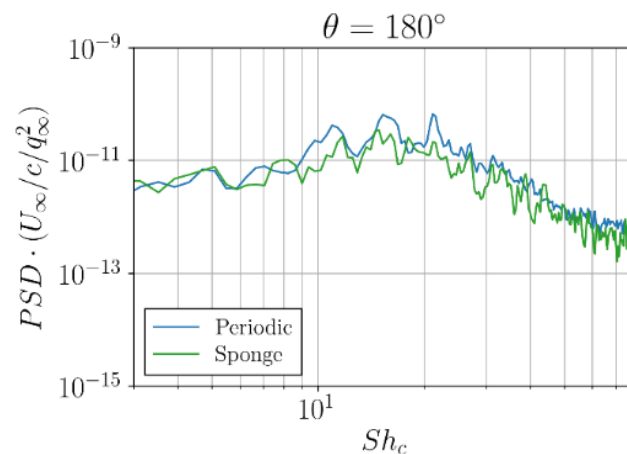
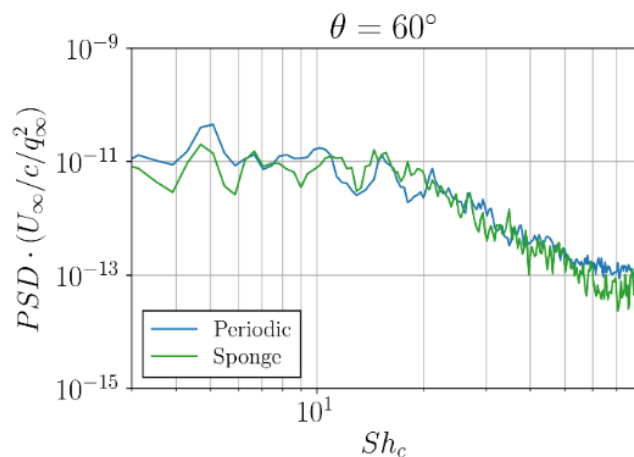


Прямое крыло

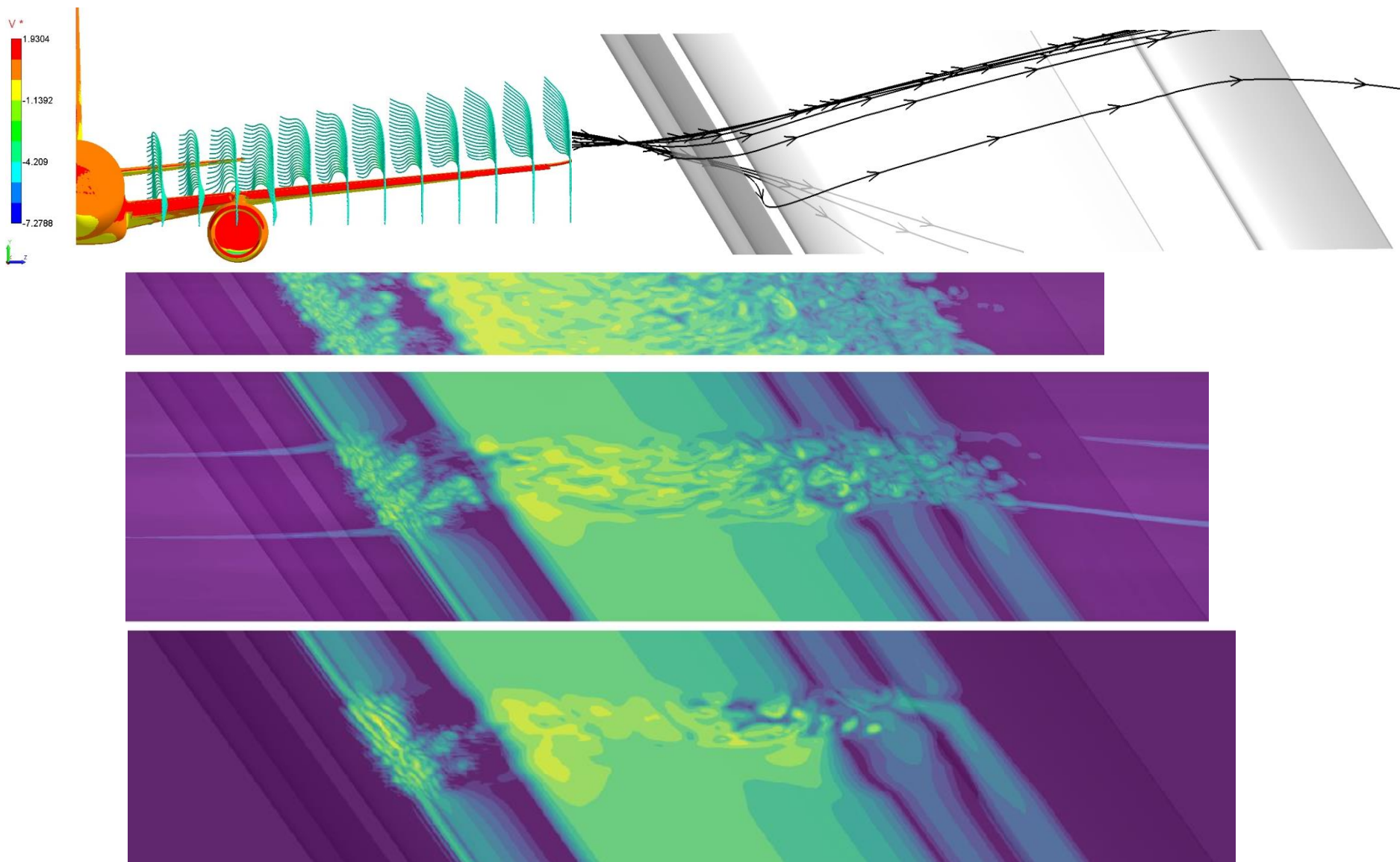
Спектры в ближнем поле



Дальнее поле



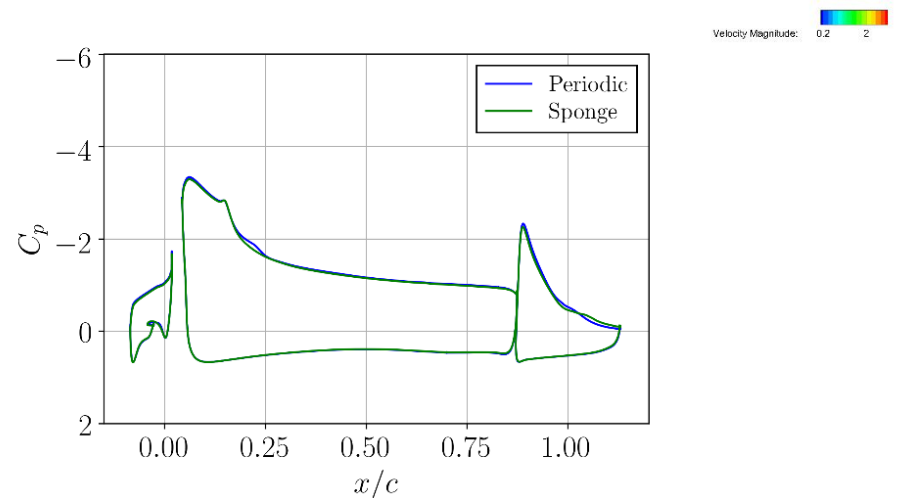
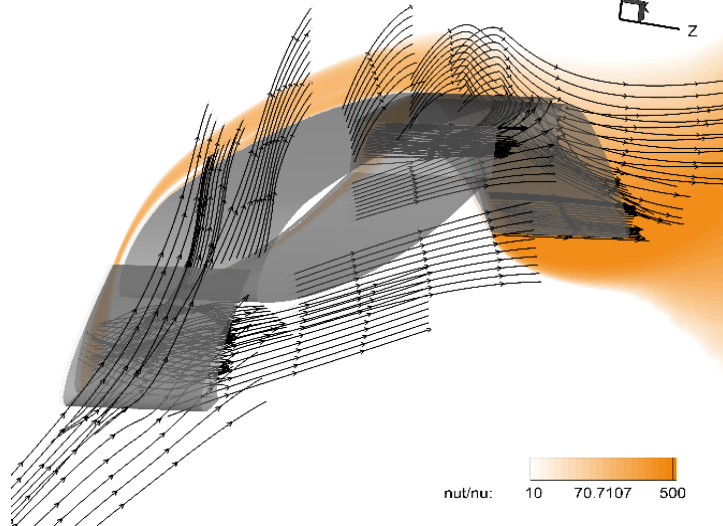
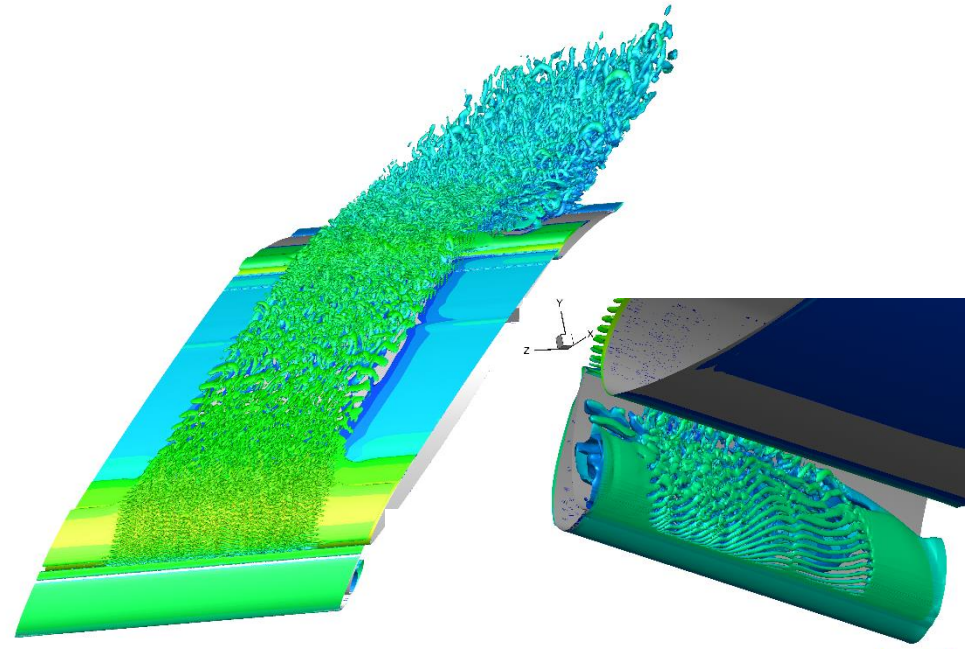
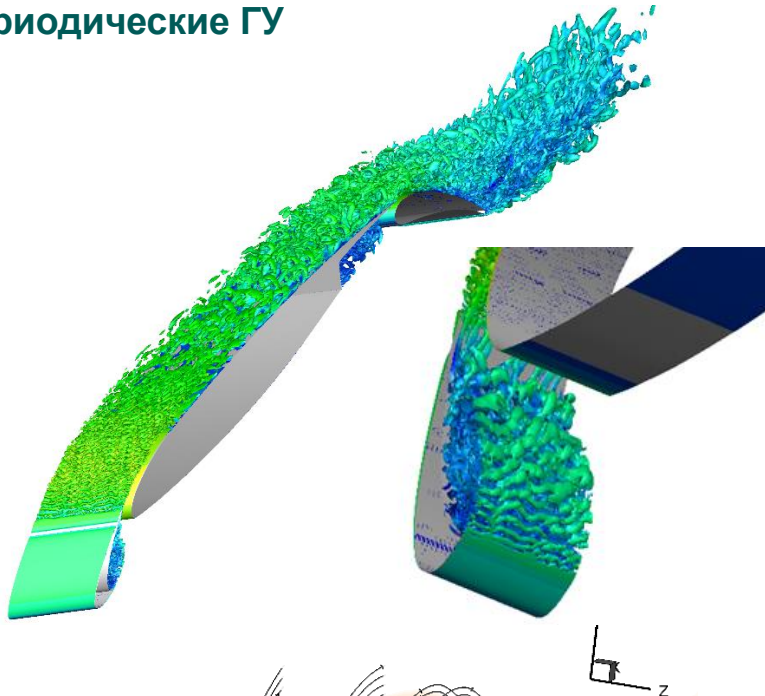
Стреловидное крыло



Стреловидное крыло

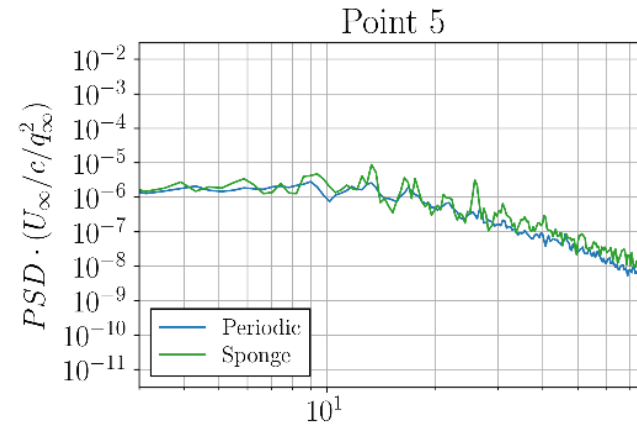
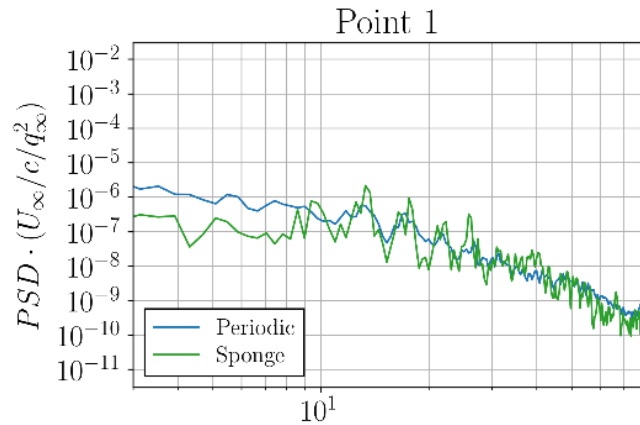
Периодические ГУ

Поглощающий слой

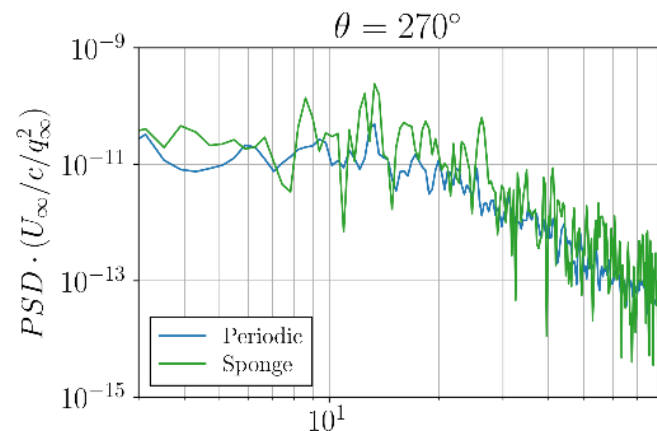
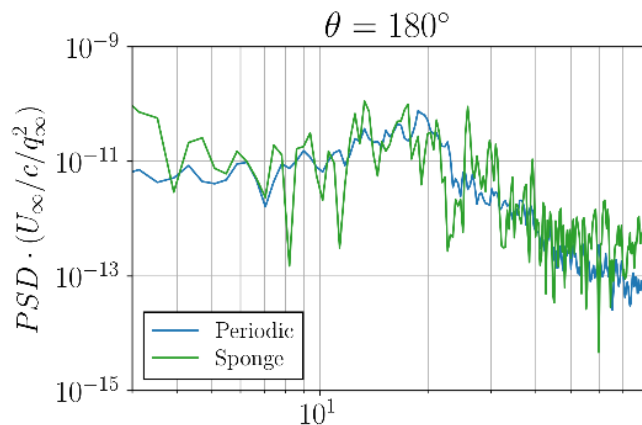


Стреловидное крыло

Спектры в ближнем поле



Дальнее поле

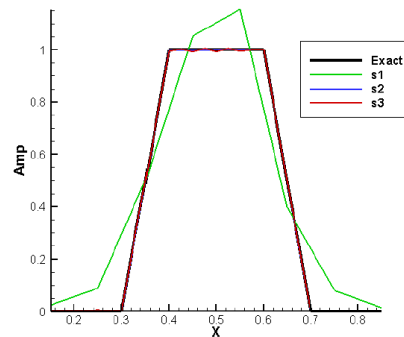
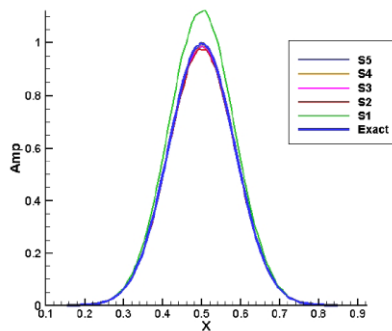
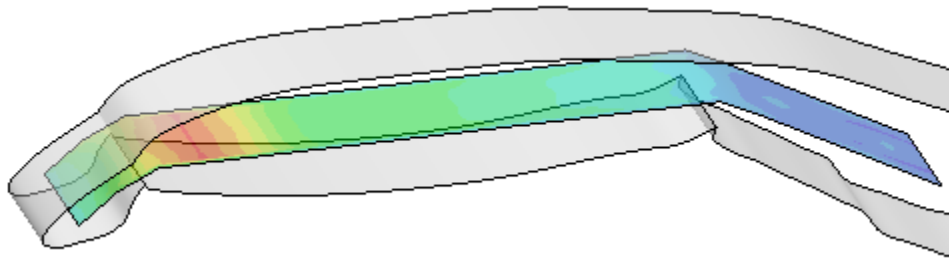


Численный beamforming

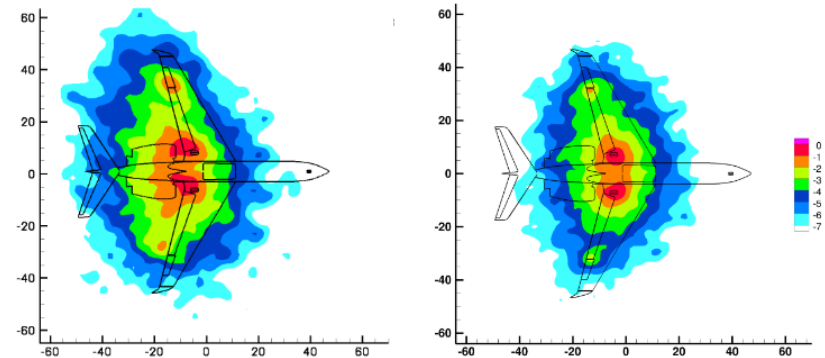
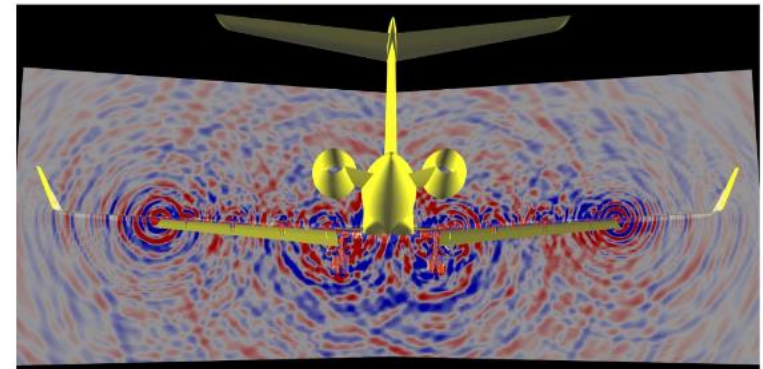
NEW!

восстановление источника
волнового уравнения
во внутренней области

Г.М. Плаксин, И.Л. Софронов



Simulation-Based Airframe Noise Prediction
of a Full-Scale, Full Aircraft
Mehdi R. Khorrami (NASA),
Ehab Fares (Exa GmbH)



a) 879 Hz, left image: flight test, right image: simulation.

- **OpenCL реализация для GPU, гетерогенные вычисления**
- **Новая программная архитектура – v2.0**
иерархия объектов, модульность (фабрики, рантайм-классы), новые контейнеры
- **Ускорение расчета – мультигрид, LU-SGS, ...**
- **Прокачка средств препроцессора обработки сеточных данных**
- **Прокачка UI, разработка GUI (только под внешним воздействием)**
- **Расширение покрытия QA**
- **Разработка документации**

Работы по развитию кода с целью эффективного использования современных гибридных суперкомпьютеров, поддержаны **Российским научным фондом** **Проект 19-11-00299** “Сверхмасштабируемые параллельные алгоритмы и гетерогенные вычисления для вихреразрешающего моделирования задач гидродинамики, аэродинамики и аэроакустики”

A. Gorobets, P. Bakhvalov. Improving Reliability of Supercomputer CFD Codes on Unstructured Meshes. Supercomputing Frontiers and Innovations. (Q4-2019 или Q1-2020)

A.Gorobets. Parallel Algorithm of the NOISEtte Code for CFD and CAA Simulations. Lobachevskii Journal of Mathematics, 2018, Vol. 39, No. 4, pp. 524–532. <https://doi.org/10.1134/S1995080218040078>

Горобец А.В., Нейман-заде М.И., Окунев С.К., Калякин А.А., Суков С.А. Производительность отечественного процессора Эльбрус-8С в суперкомпьютерном моделировании задач вычислительной газовой динамики. Математическое моделирование, 2019, том 31, номер 4, стр. 17-32.

И.А. Абалакин, П.А. Бахвалов, В.Г. Бобков, А.В. Горобец. Параллельный алгоритм моделирования течения в системах ротор-статор на основе рёберно-ориентированных схем // Матем. моделирование, хх(х) (2020) хх-хх (На рецензировании)

С.М. Босняков, А.П. Дубень, А.А. Желтоводов, Т.К. Козубская, С.В. Матяш, С.В. Михайлов. Численное моделирование сверхзвукового отрывного обтекания обратного наклонного уступа методами RANS И LES // Матем. моделирование, 31(11) (2019) 3-20

Duben Alexey, Kozubskaya Tatiana. Evaluation of Quasi-One-Dimensional Unstructured Method for Jet Noise Prediction // AIAA Journal, 2019 <https://doi.org/10.2514/1.J058162>

И.В. Абалакин, А.П. Дубень, Н.С. Жданова, Т.К. Козубская, Л.Н. Кудрявцева, Метод погруженных границ на деформируемых неструктурированных сетках для моделирования аэроакустики крылового профиля // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 59(12) (2019) 41-54

А.П. Дубень, Т.К. Козубская, Г.М. Плаксин, П.В. Родионов, И.Л. Софронов. Задача бимформинга в вычислительном эксперименте: постановка и верификация. – В тезисах докладов Шестой Открытой Всероссийской (XVIII научно-технической) конференции по аэроакустике, 23-27 сентября 2019, ЦАГИ, Москва, 2019, стр. 294-296

С.М. Босняков, А.В. Волков, А.П. Дубень, В.И. Запрягаев, Т.К. Козубская, С.В. Михайлов, А.И. Трошин, В.О. Цветкова. Сравнение двух вихреразрешающих методик повышенной точности на неструктурированных сетках применительно к моделированию струйного течения из двухконтурного сопла // Матем. моделирование, 31(10) (2019) 130-144

Контакты: 8 499 2207218 tata@imamod.ru – Татьяна