

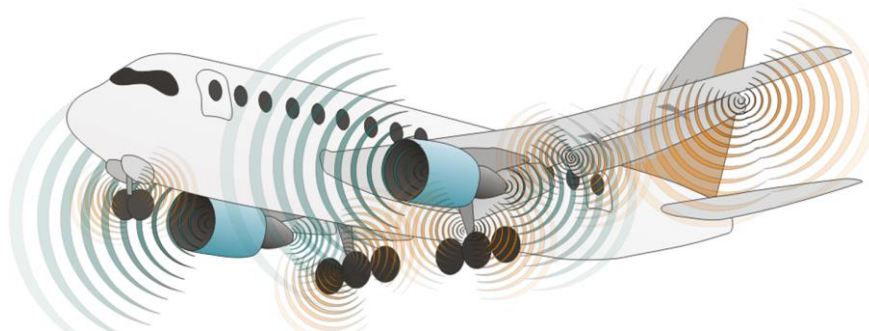
# Программный комплекс NOISETTE

Вихреразрешающее моделирование турбулентных течений

Вычислительная аэродинамика и аэроакустика

Алгоритмы повышенной точности

Неструктурированные сетки



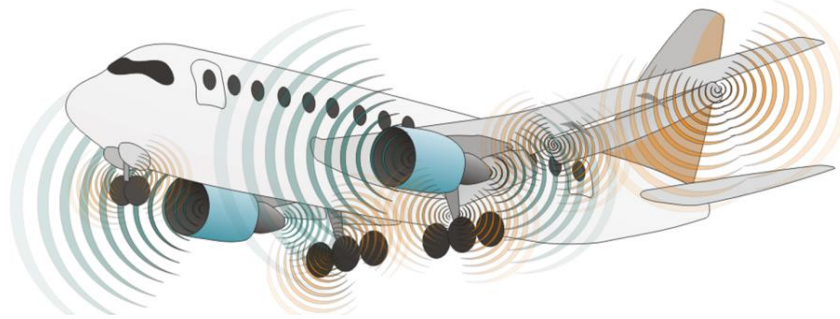
И. Абалакин, П. Бахвалов, В. Бобков, А. Горобец,  
А. Дубень, Н. Жданова, Т. Козубская, ...



Сектор вычислительной  
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

<http://caa.imamod.ru>

аэроакустики



## Вихреразрешающее моделирование ЛА

- **Экономичные и точные численные методы**  
схемы, модели турбулентности, ...
- **Эффективные НРС реализации**  
масштабируемые алгоритмы, гетерогенные вычисления, ...
- **Улучшение расчетной технологии**  
конфигурация методов и моделей, AMR, ускорение CCR, распределенная обработка, ...

- **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  
 $\mathbf{F}_\nu, \mathbf{G}_\nu, \mathbf{H}_\nu$  – 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, HLLS, Годунов

- **Маломаховые течения**

Предобуславливатель Туркеля

- **Разрывные решения**

- WENO-EBR, MUSCL-TVD EBR

- **Интегрирование по времени**

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

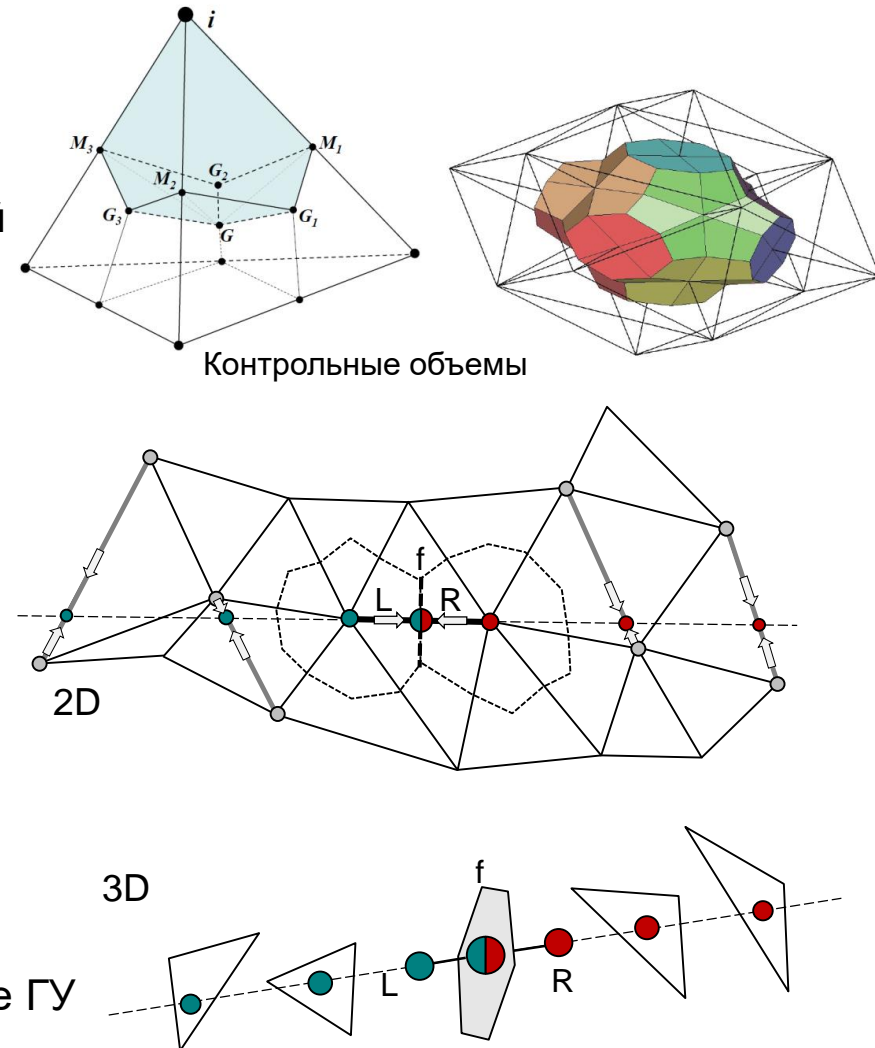
- Неявная схема 1-2 порядка

- **Решатели СЛАУ**

Предобусловленный Bi-CGSTAB

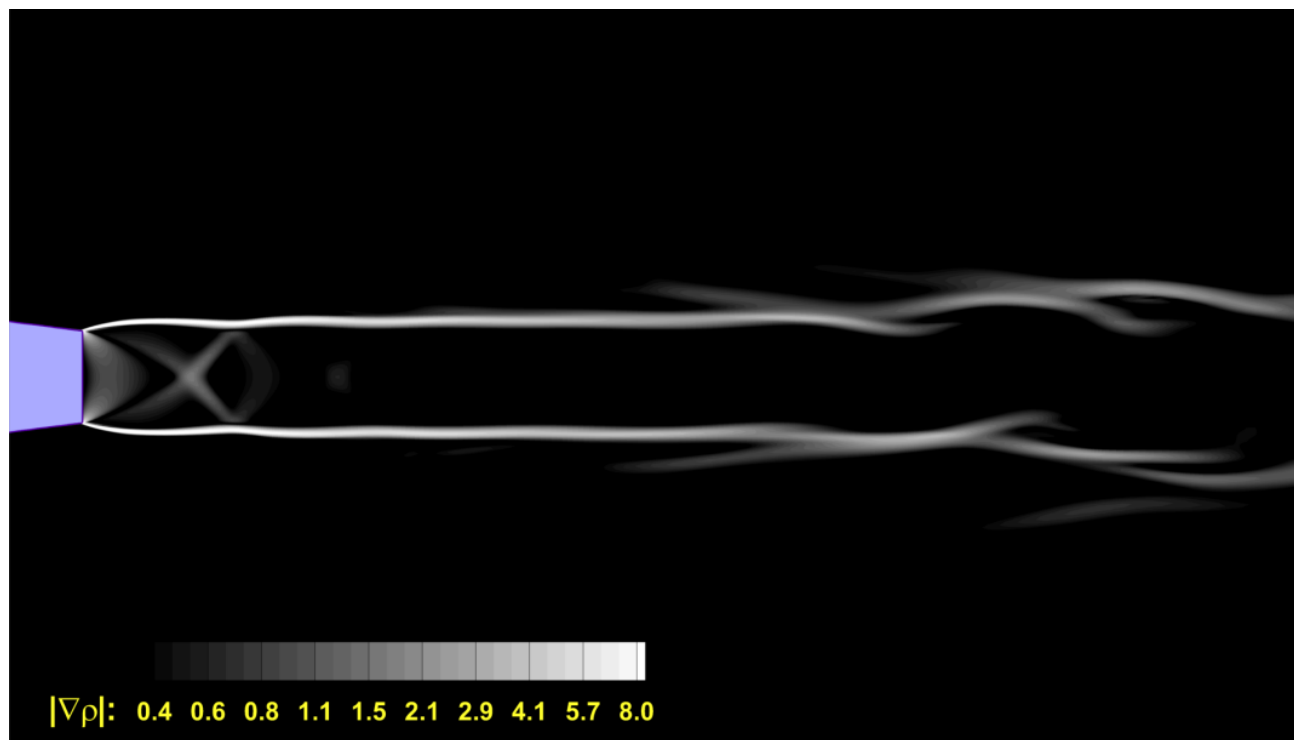
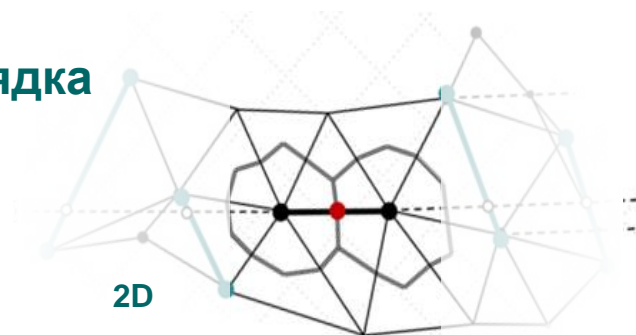
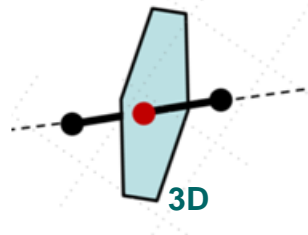
- **Граничные условия**

Твердые стенки, неотражающие, периодические ГУ



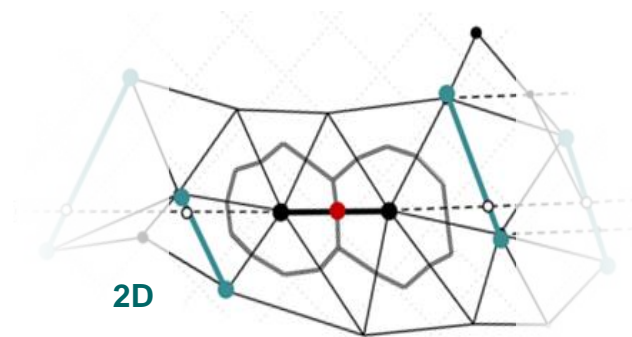
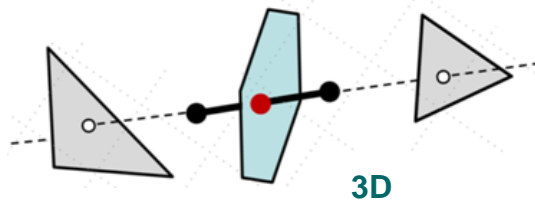
Абалакин И.В., Бахвалов П.А., Горобец А.В., Дубень А.П., Козубская Т.К. Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // Вычислительные методы и программирование, т.13 (2012), стр. 110-125.

## Базовая схема 1 порядка



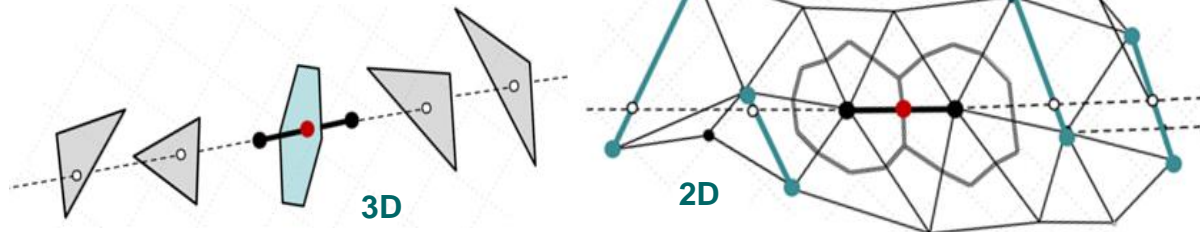
Bakhvalov, P.A. & Kozubskaya, T.K. Comput. Math. and Math. Phys. (2017) 57: 680.  
<https://www.doi.org/10.1134/S0965542517040030>

## Схема EBR3-WENO



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

## Схема EBR5-НУВ



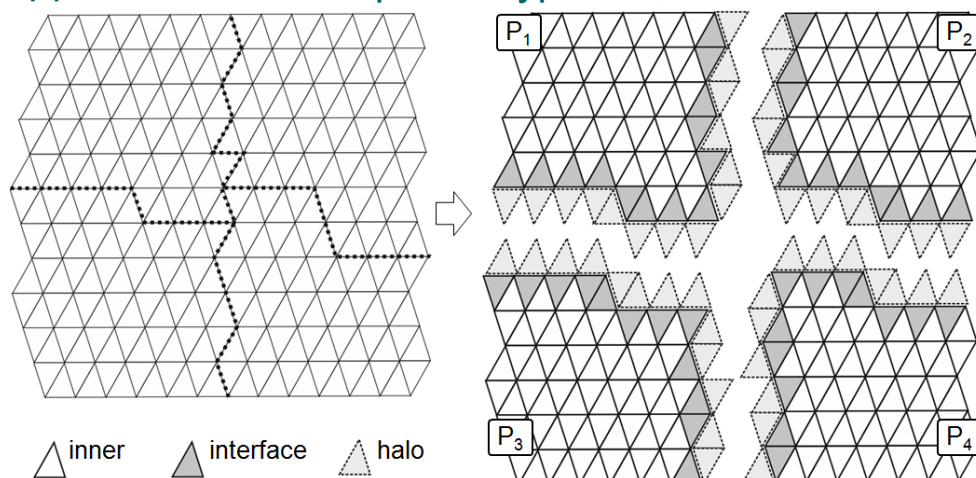
До 5-го порядка точности (на ТС сетках) по цене LO



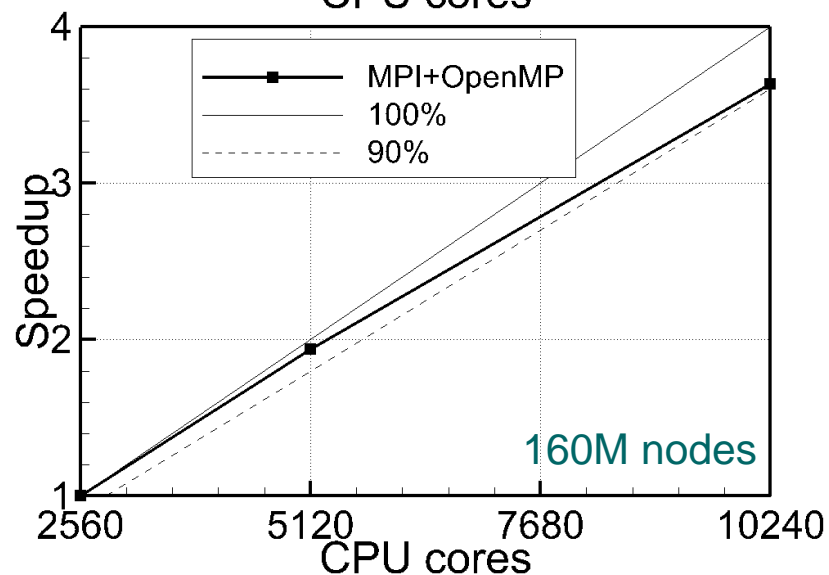
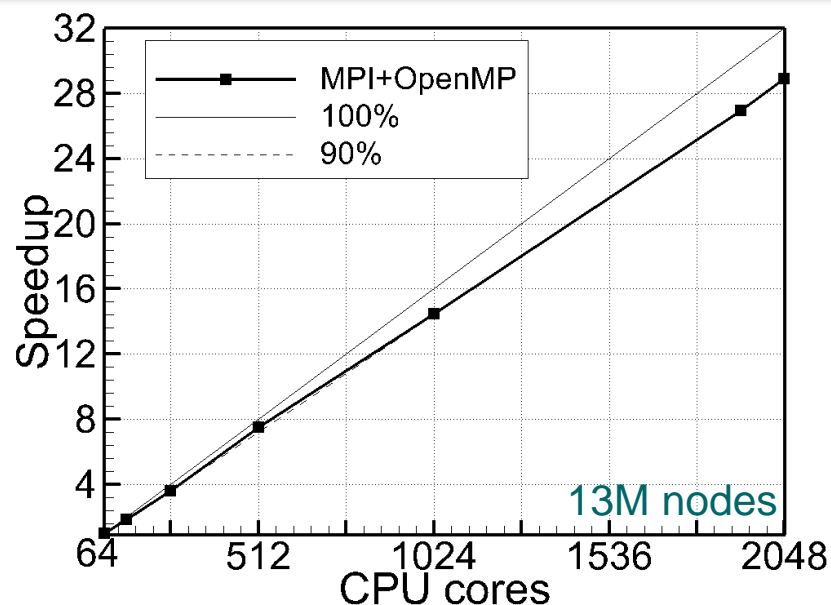
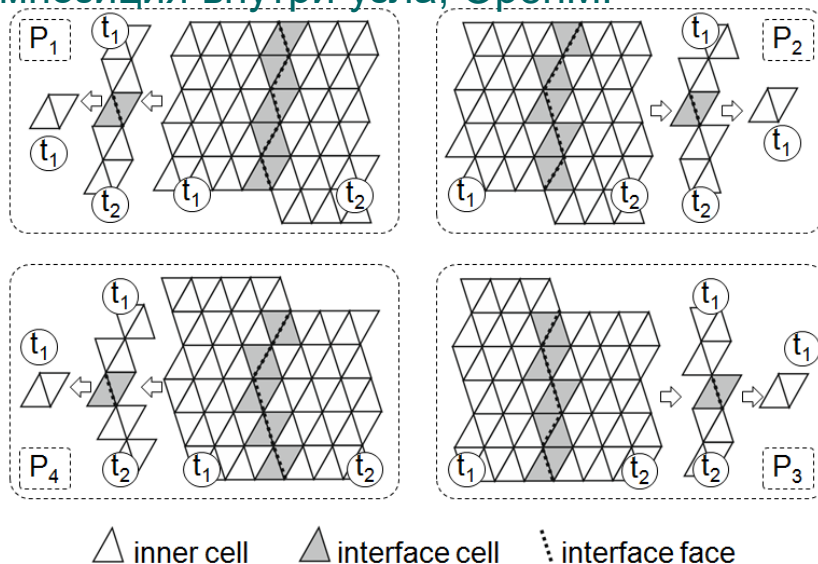
Bakhvalov, P.A. & Kozubskaya, T.K. Comput. Math. and Math. Phys. (2017) 57: 680.  
<https://www.doi.org/10.1134/S0965542517040030>



## 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>



- Средства разработки: C++03, MPI, OpenMP
- Внешние библиотеки: ParMETIS, LZMA, FFTW3, ...
- Управление версиями – SVN
- Баг-треккер, р.м. – Redmine
- QA

Current QA run revision

request QA run

4906

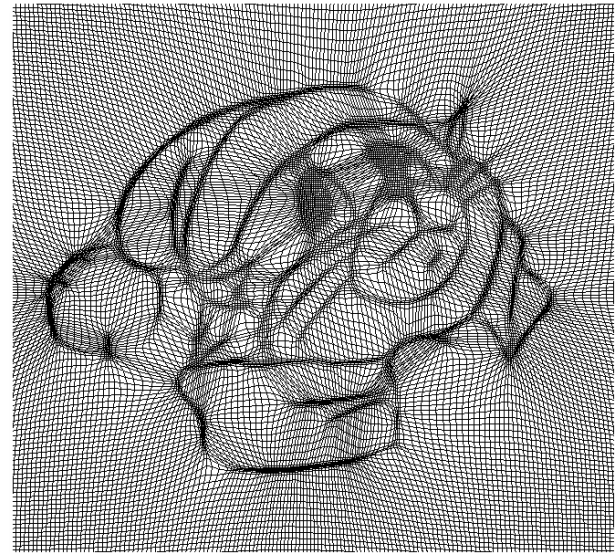
Testcases statistics:  
361 passed, 2 failed (363 total)

STARTED AT 2018-11-30 23:00:02  
NEW\_REVISION PASSED 4906(2018-11-30 18:23:56 +0300 by cherepock)  
CODE\_CHECKOUT PASSED [/qa/run.results/4906/code\\_checkout.log](/qa/run.results/4906/code_checkout.log)  
QA\_CHECKOUT PASSED [/qa/run.results/4906/qa\\_checkout.log](/qa/run.results/4906/qa_checkout.log)  
COMPILATION PASSED </qa/run.results/4906/compilation.log>

Название теста	Статус	Результаты
QA_UTILS frunrotflow flow	FAILED	<a href="#">.std</a>   <a href="#">frunrot1.std</a>   <a href="#">frunrot2.std</a>   <a href="#">frunrot3.std</a>   <a href="#">genmesh.std</a>   <a href="#">noisette_vs_frun.png</a>
QA_UTILS frunrotflow	FAILED	<a href="#">frunrot1.std</a>   <a href="#">frunrot2.std</a>   <a href="#">meshconvert.std</a>   <a href="#">meshperiodic.std</a>   <a href="#">pex_eaxct_vs_frun.</a>
QA_STIEFEL 3D case012	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D case012	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D case008	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D case008	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D case025	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D case025	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D caseScheibe05	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D case003	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D case003	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D case013	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>
QA_STIEFEL 3D case013	PASSED	<a href="#">QA_log.txt</a>   <a href="#">testcase.stdout</a>

Showing 1 to 363 of 363 entries

- Применение динамических сеток с IBC
- Адаптация к архитектуре Эльбрус
- Генератор синтетической турбулентности
- Ускорение поиска ближайшей точки (KD-tree)
- Рефакторинг, прокачка структуры данных
- Отчуждаемые компоненты:  
Параллельный постпроцессор FW/H  
Библиотека точных решений – FP до 8-й точности (qd\_real)



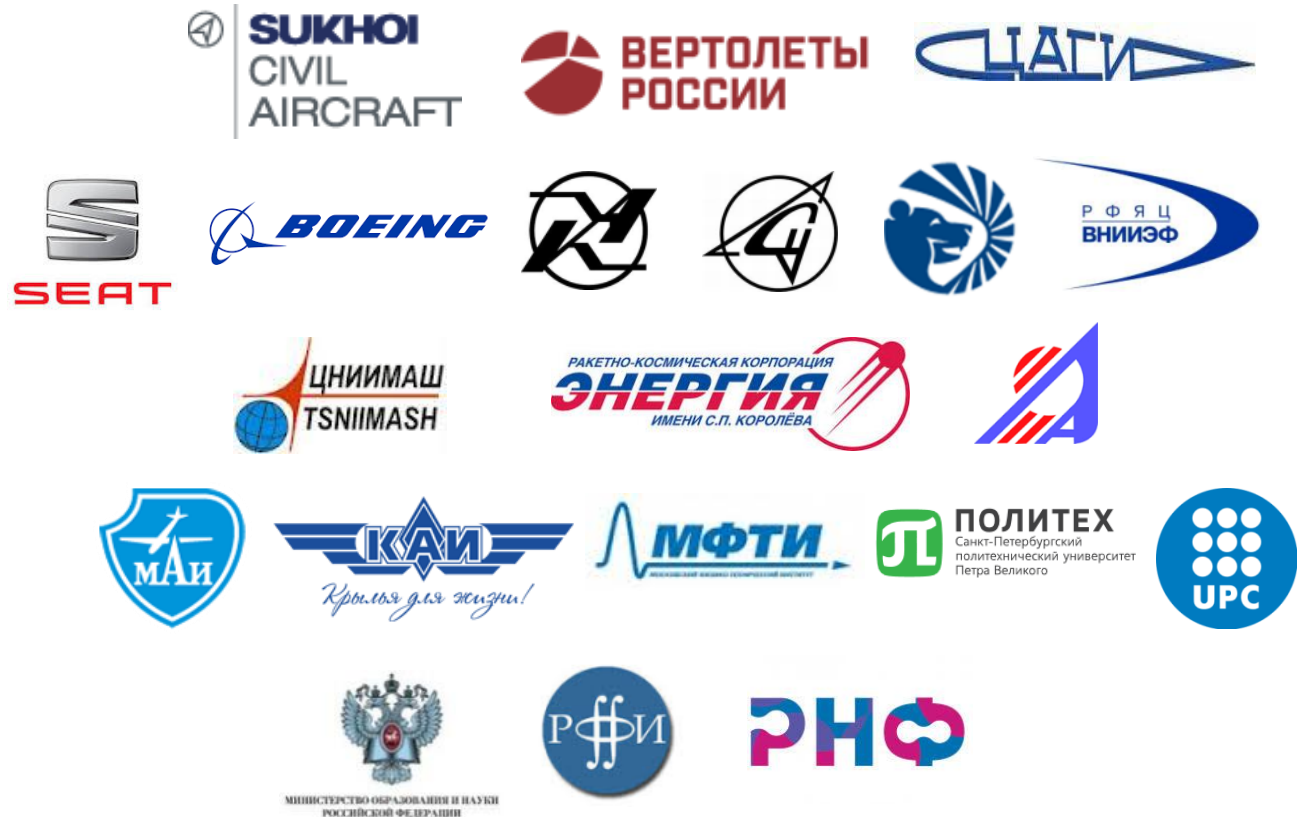
- Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona

- SEAT

- Boeing, СПбПУ

- ИПМ – 8 отдел

- НИО-5 ЦАГИ





Производитель: МЦСТ

Архитектура: «Эльбрус» с очень длинными машинными командами (VLIW)

Оптимизирующий компилятор C++, совместимый с GCC

- **Эльбрус 8С:** 8 ядер, 1.3 ГГц, кэш 16 МБ, память DDR3 51 ГБ/с, 125 GFLOPS, 80 Вт, 28 нм
- **Intel Xeon E5-2650v2:** 8 ядер, 2.6 ГГц, кэш 20 МБ, память DDR3 60 ГБ/с, 166 GFLOPS, 95 Вт, 22 нм
- **AMD Opteron 6276:** 16 ядер, 2.3 ГГц, кэш 16 МБ, память DDR3 51 ГБ/с, 147 GFLOPS, 115 Вт, 32 нм

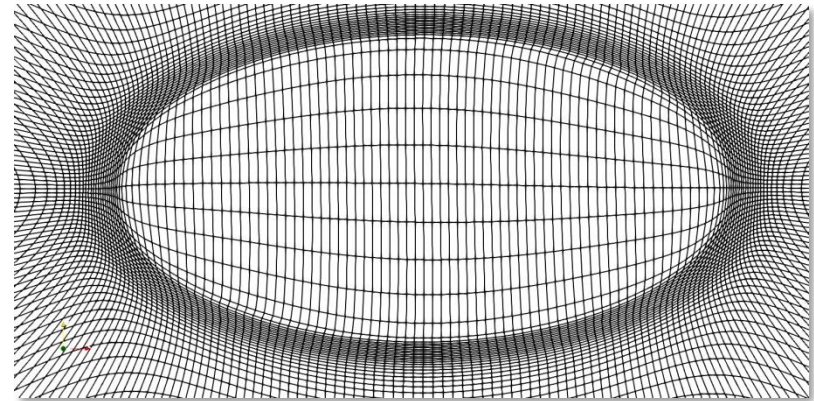
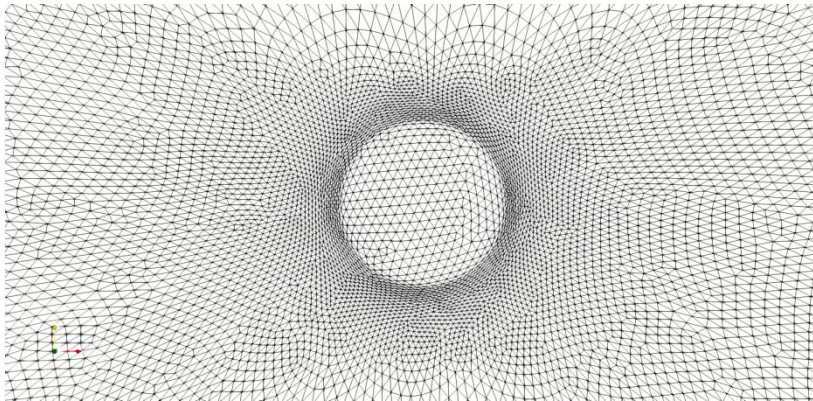
**NOISEtte:** тест на сетке из 680 тыс. элементов

Схема EBR5 повышенной точности по пространству, неявная схема 2-го порядка по времени.

	Эльбрус	Intel	AMD
Параллельное ускорение OpenMP на 8 ядрах	6	5.2	4.6
Соотношение производительности ядра	1	3.6	1.8
Соотношение производительности 8 ядер	1	3.14	1.34
Соотношение производительности процессора	1	3.14	1.96

[http://keldysh.ru/papers/2018/prep2018\\_152.pdf](http://keldysh.ru/papers/2018/prep2018_152.pdf)

- Разработка и реализация методики отслеживания погруженной границы движущегося тела с использованием 'level-set' функций
- Внедрение методики динамической сеточной адаптации. Цель – повысить точность численного решения вблизи границы
- Модификация метода для расчета турбулентных течений
- Решение задач численного моделирования аэродинамики тел, движущихся по действию внешних сил
- Решение задач численного моделирования аэродинамики тел, движущихся по действию индуцированных сил (Fluid Structure Interaction)

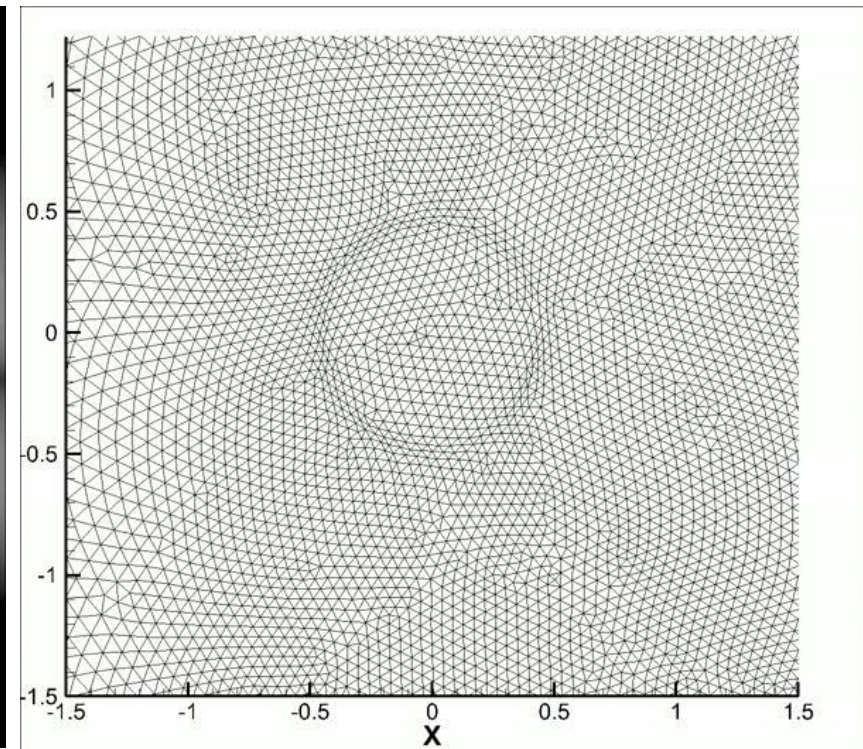
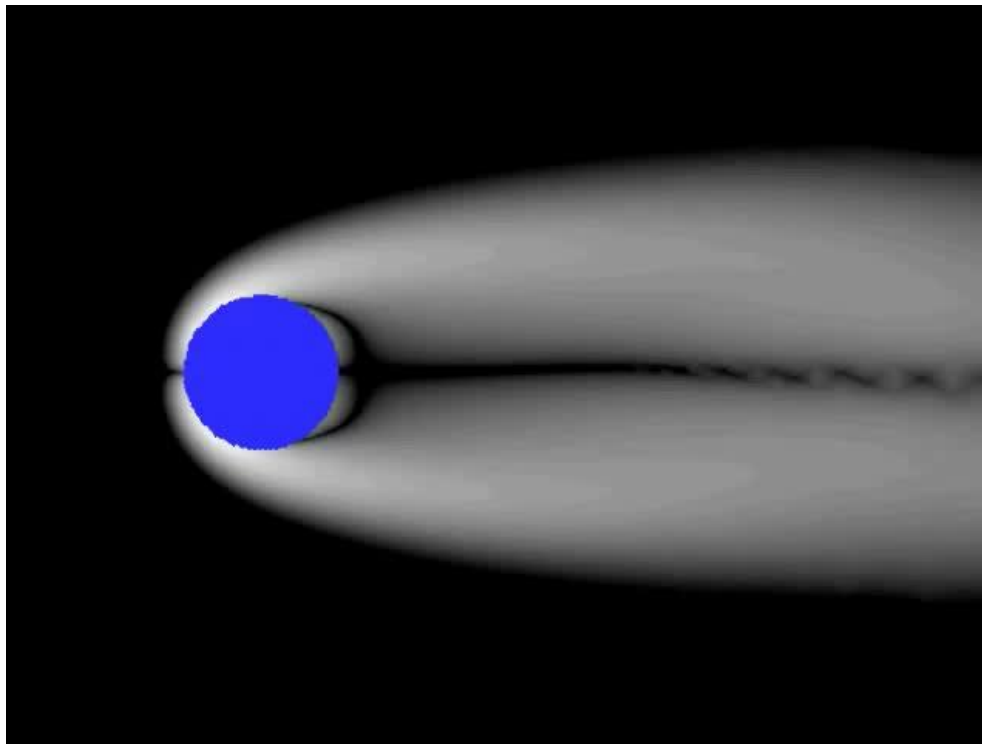




## Динамическая адаптация расчетной сетки без изменения топологии

### Работа в кооперации с ВЦ РАН

Garanzha V.A., Kudryavtseva L.N., Utyuzhnikov. Variational method for untangling and optimization of spatial meshes // Journal of Computational and Applied Mathematics, 269:24-41, 2014.

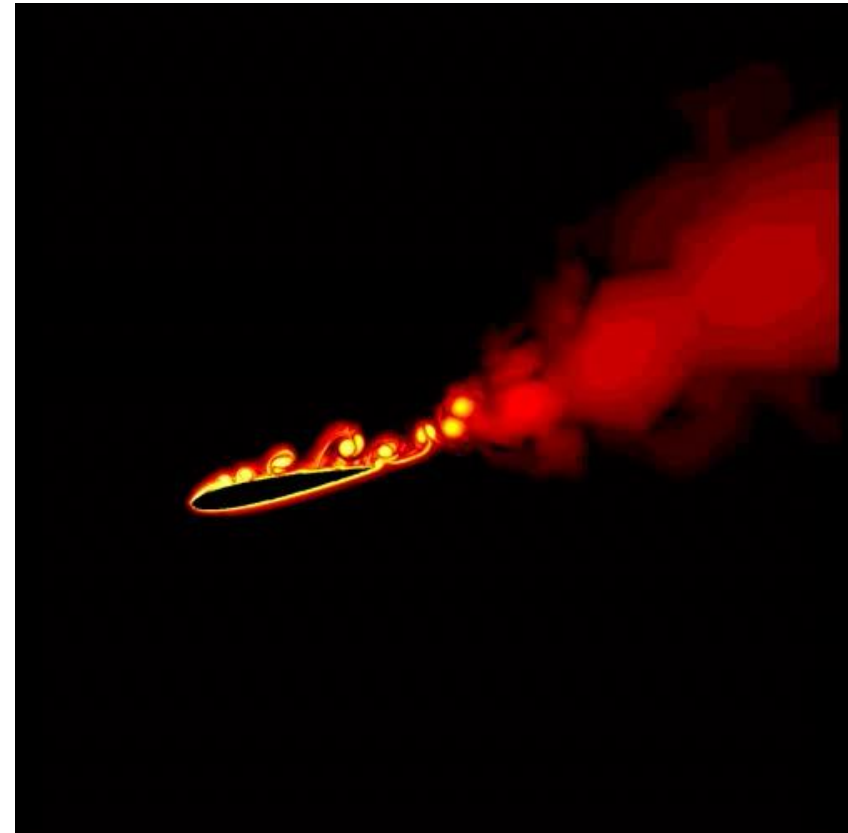
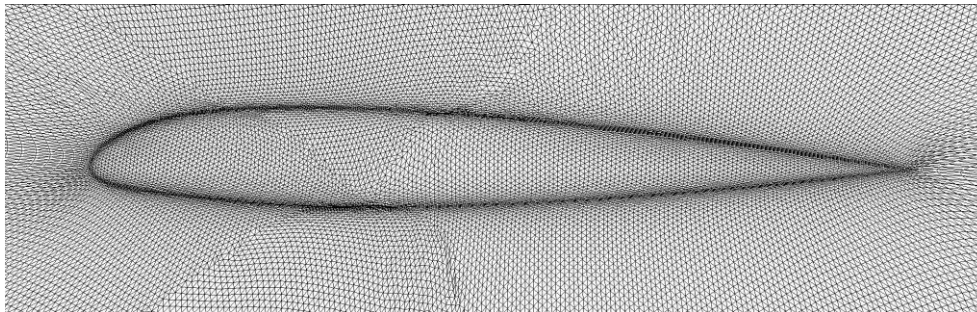
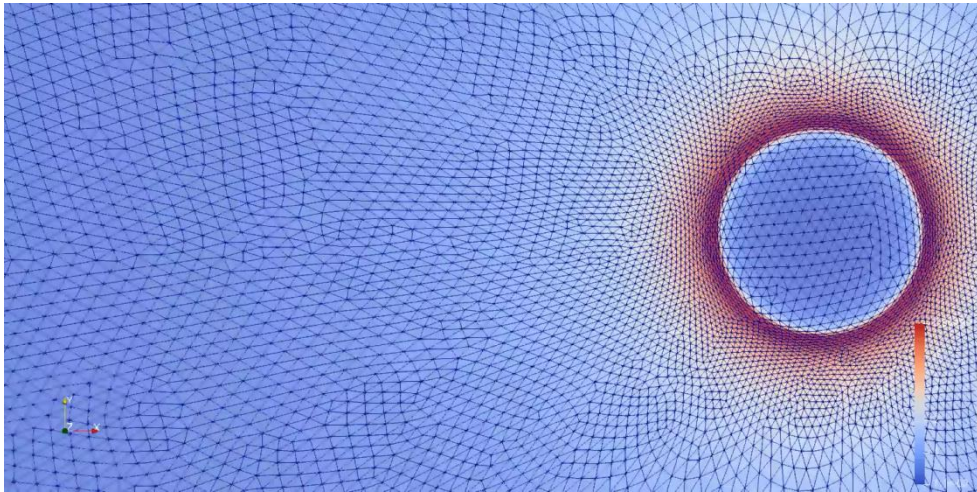




## Динамическая адаптация расчетной сетки без изменения топологии

### Работа в кооперации с ВЦ РАН

Garanzha V.A., Kudryavtseva L.N., Utyuzhnikov. Variational method for untangling and optimization of spatial meshes // Journal of Computational and Applied Mathematics, 269:24-41, 2014.



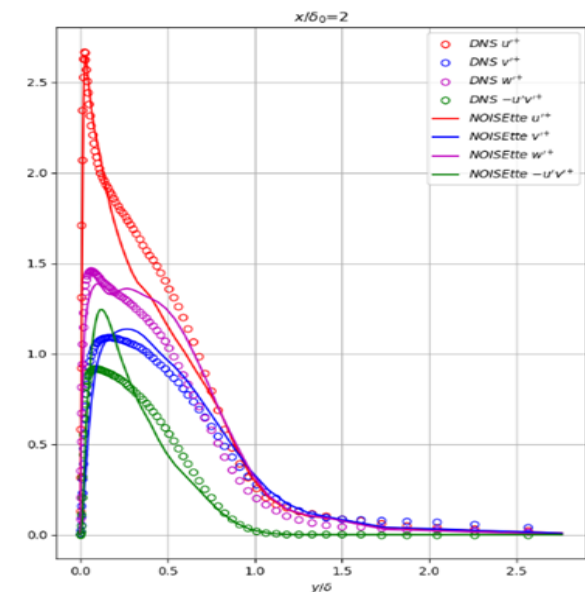
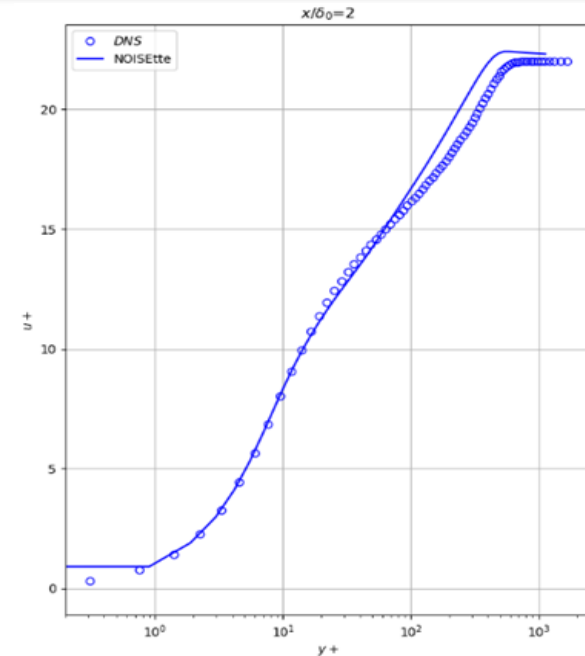
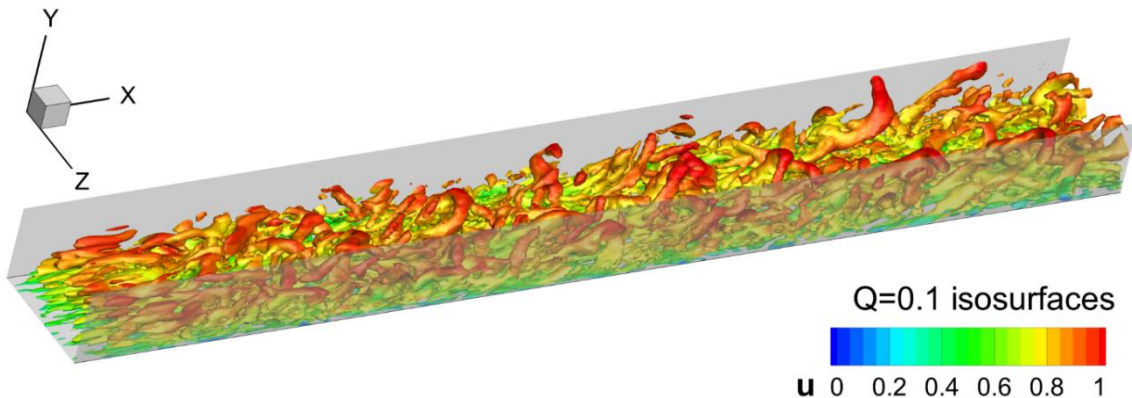
# Генератор синтетической турбулентности

## ● Генератор синтетической турбулентности STG\*

- задание пульсаций скорости на входной границе LES зоны или через распределенный объемный источник (VSTG)\*\*
- корреляции тензора моментов второго порядка для синтетических пульсаций на основе RANS решения

## ● Верификация

- развитое турбулентное течение в плоском канале
- турбулентный пограничный слой на плоской пластине  $Re_0=1000$  на входе, эталонные данные: DNS [Spalart, 1988]



\*M. L. Shur, P. R. Spalart, M. K. Strelets, A. K. Travin. Synthetic Turbulence Generators for RANS-LES Interfaces in Zonal Simulations of Aerodynamic and Aeroacoustic Problems // Flow, Turbulence and Combustion, 2014, v.93, p.63-92.

\*\*M. Shur, M. Strelets, A. Travin, A. Probst, S. Probst, D. Schwamborn, S. Deck, A. Skillen, J. Holgate and A. Revell. Improved Embedded Approaches. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary, Design 134, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-52995-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52995-0_3)

## • Физические параметры полета

Числа Маха:  $0.8 \div 1.3$

Высоты полёта:  $6500 \div 13000$  м

Числа Рейнольдса:  $7.5 \div 10 \cdot 10^6$

## • Стадии моделирования

- осесимметричный RANS

- 3D RANS

- IDDES

## • Подход к моделированию

- IDDES

- **VSTG**: генератор синтетической турбулентности с объемным источником

- гибридная EBR CD+Urw+WENO схема

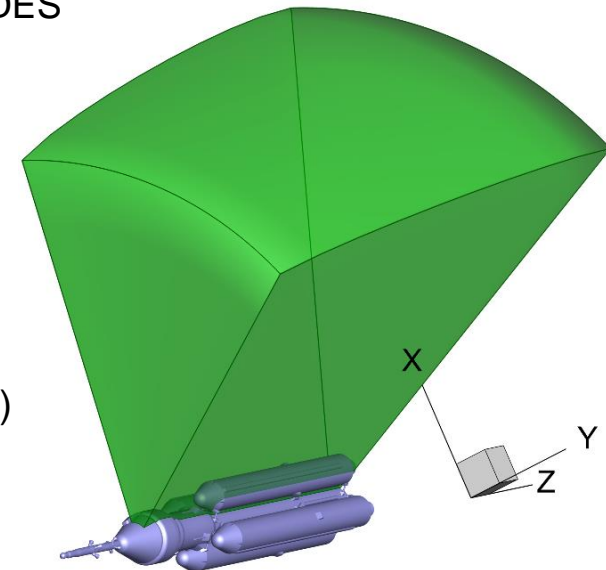
## • Вычислительный домен и сетки

$45^\circ$  без учета боковых блоков (27.1 млн.)

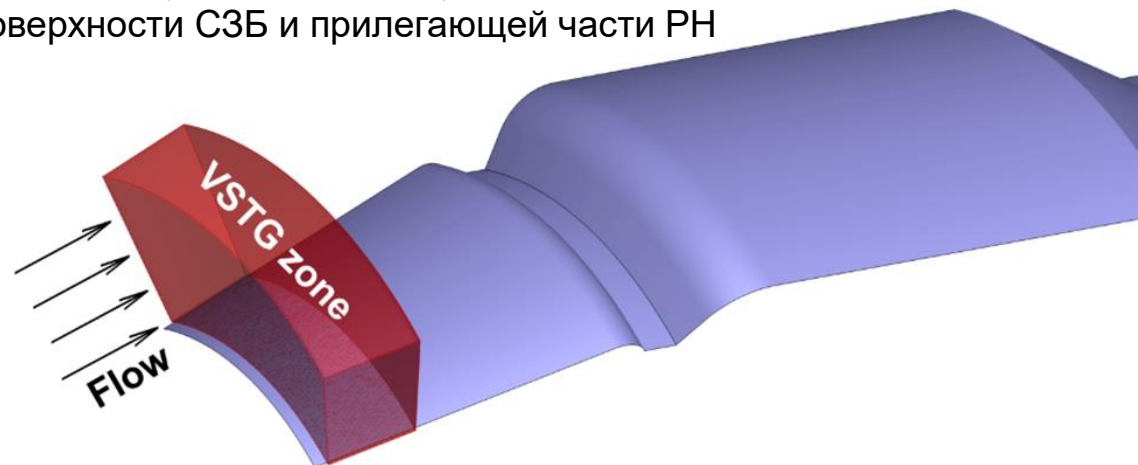
$90^\circ$  с учетом боковых блоков (63.4 млн.)

## • Задача

оценка аэроакустических нагрузок на поверхности СЗБ и прилегающей части РН

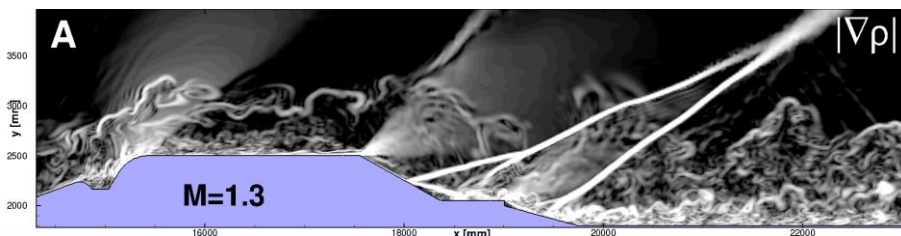
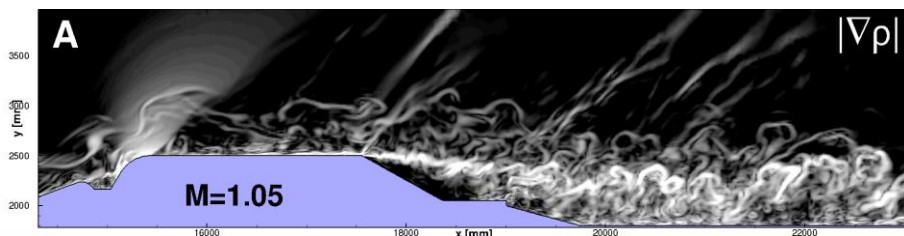
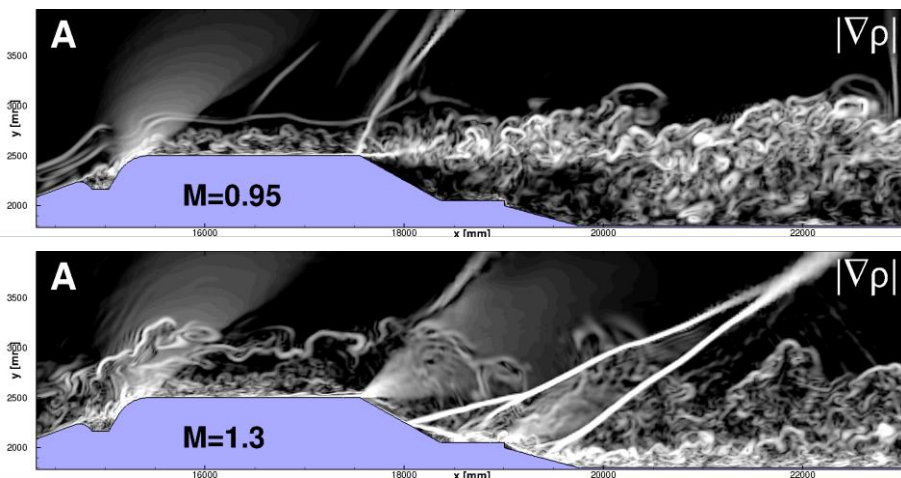
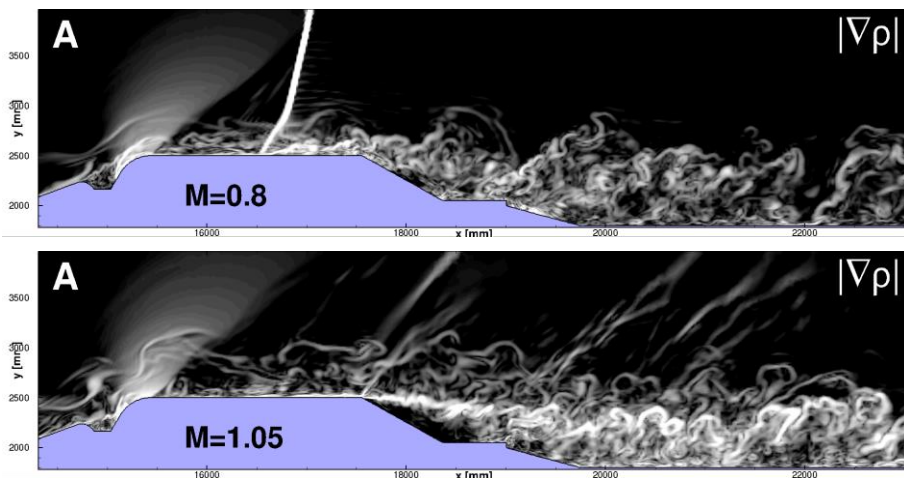


Область интереса  
(пульсации давления)

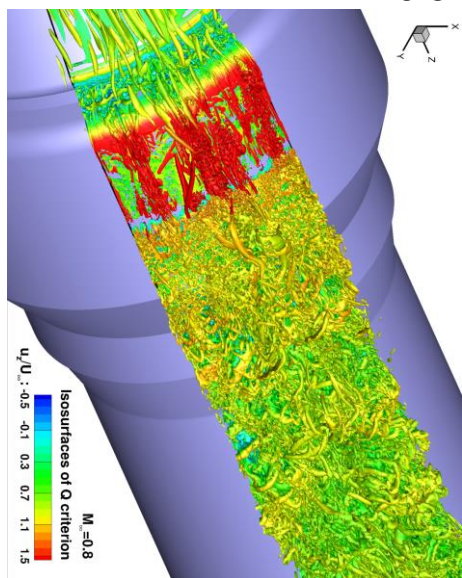




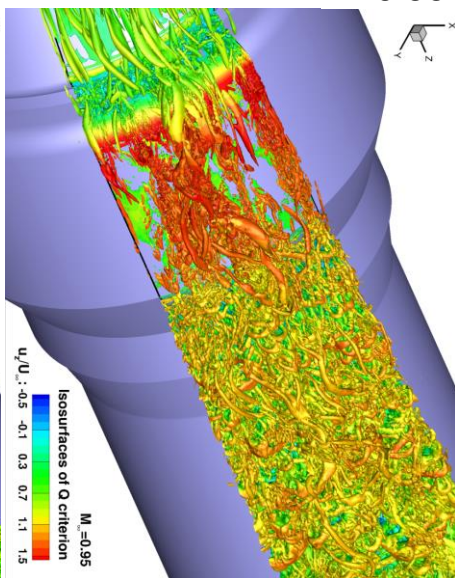
# Аэроакустические нагрузки на поверхности ракеты (РКК «Энергия»)



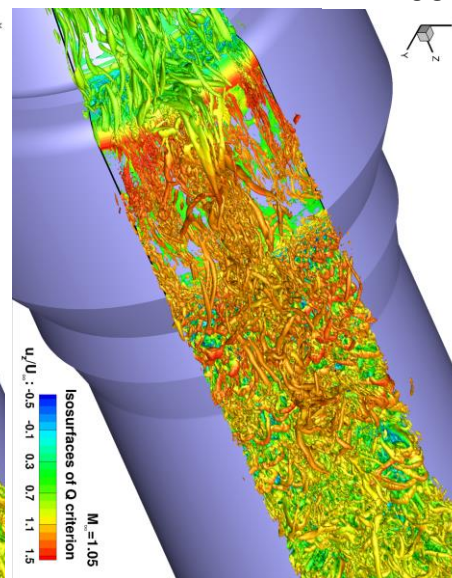
**M=0.8**



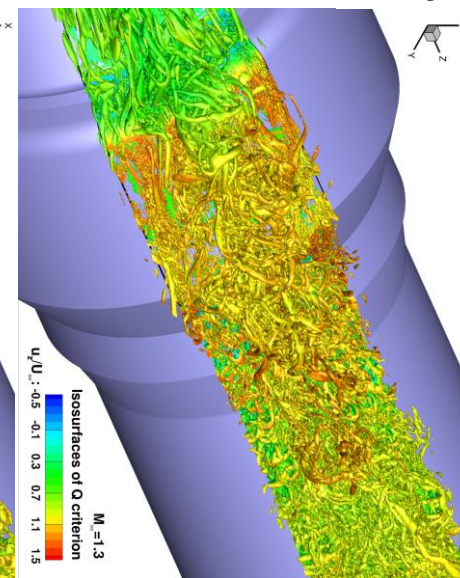
**M=0.95**



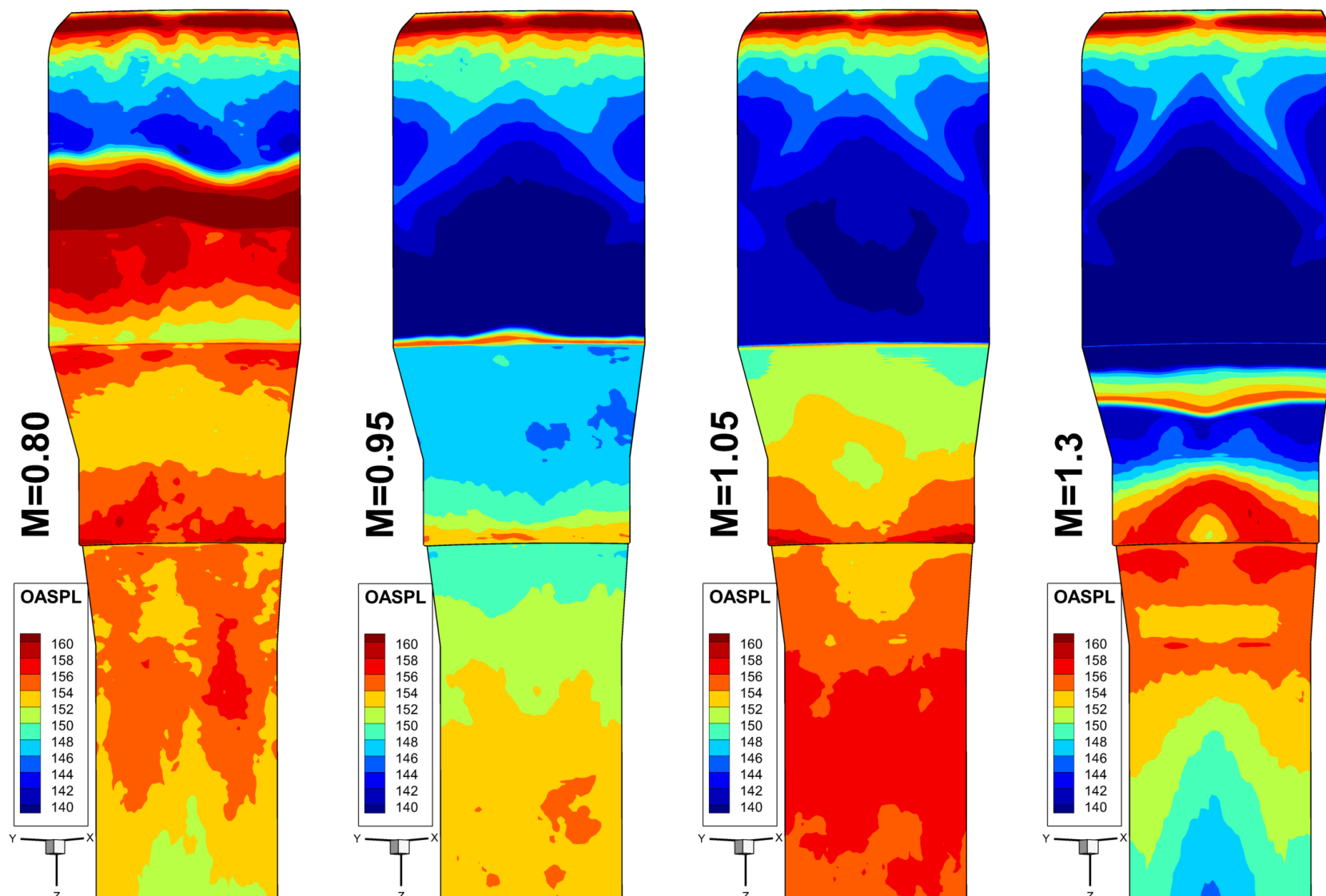
**M=1.05**



**M=1.3**



# Аэроакустические нагрузки на поверхности ракеты (РКК «Энергия»)

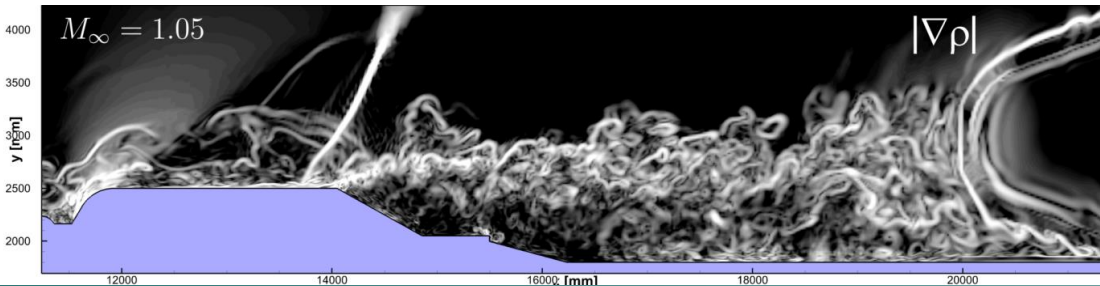
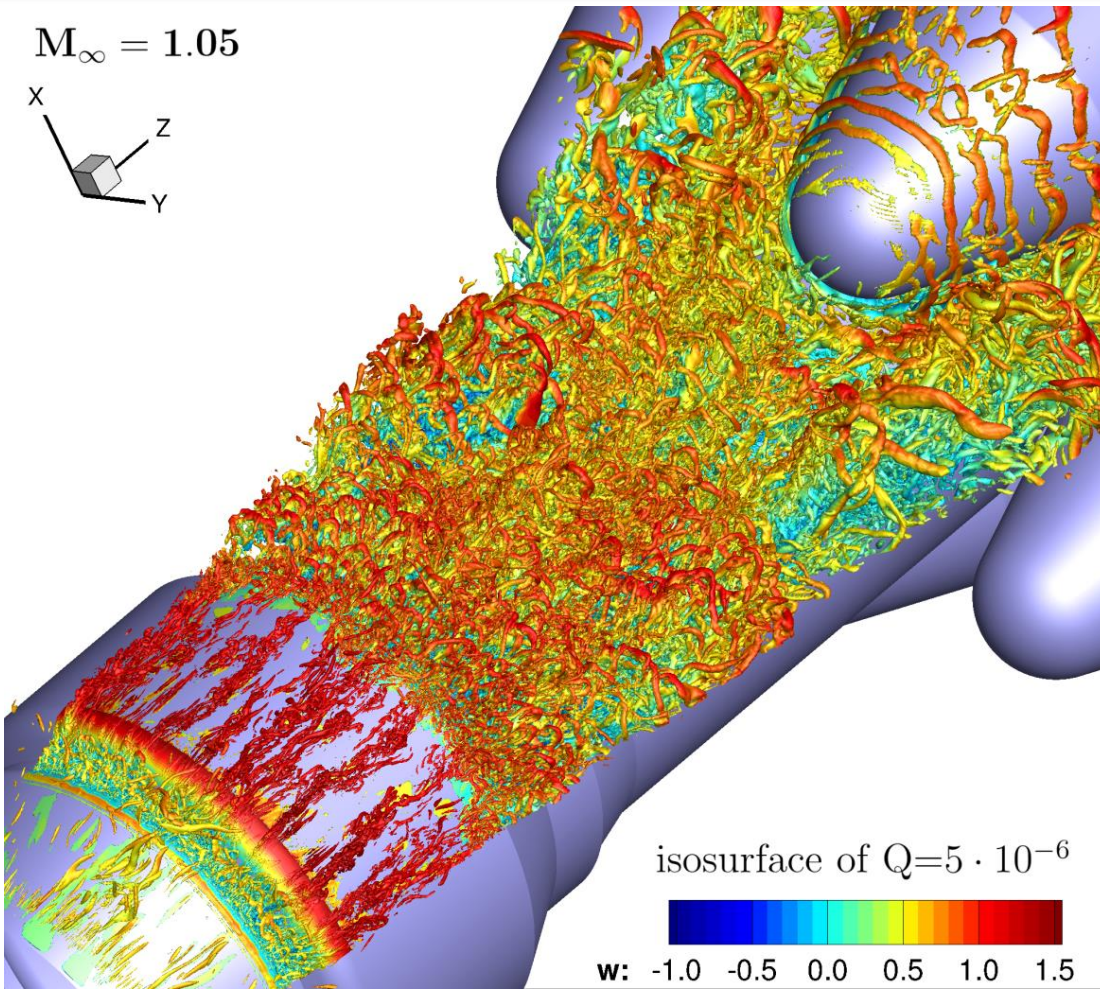
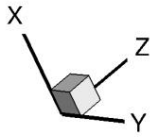


Распределения общего уровня пульсаций давления (OASPL) на поверхности ДО и прилегающей части РН



# Аэроакустические нагрузки на поверхности ракеты (РКК «Энергия»)

$$M_{\infty} = 1.05$$



## Параметры расчета

- вычислительный домен:  $90^\circ$
- с учетом боковых блоков
- сетка: 63.4 млн.
- боковой блок моделируется с помощью **IBC**
- расчет: 1920 ядер CPU  
(80 MPI x 12 OpenMP x HT)



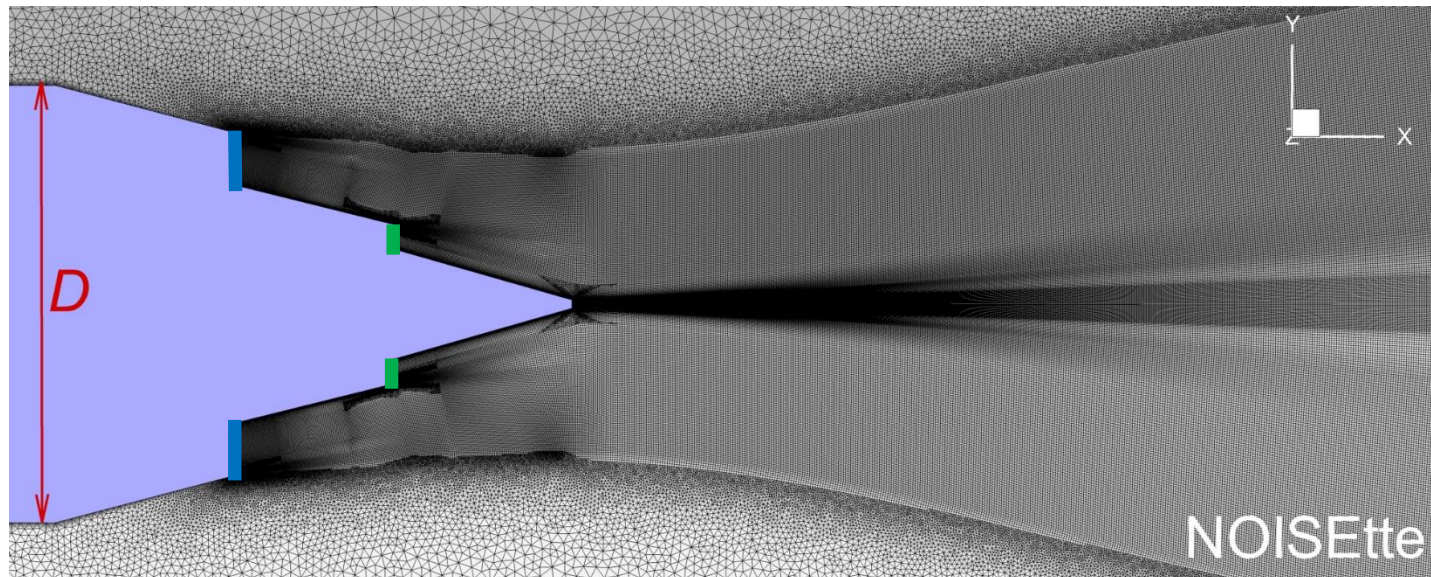
# Струя из двухконтурного сопла (совместно с ЦАГИ)

- **Двухконтурное сопло** (дозвуковой внутренний и звуковой внешний контур)

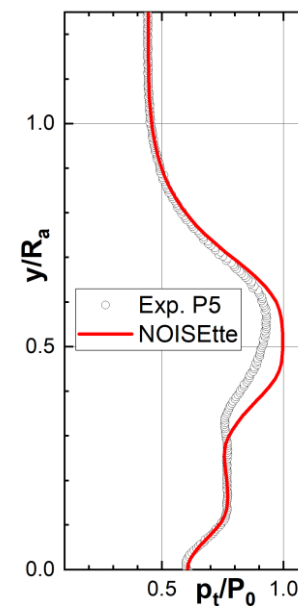
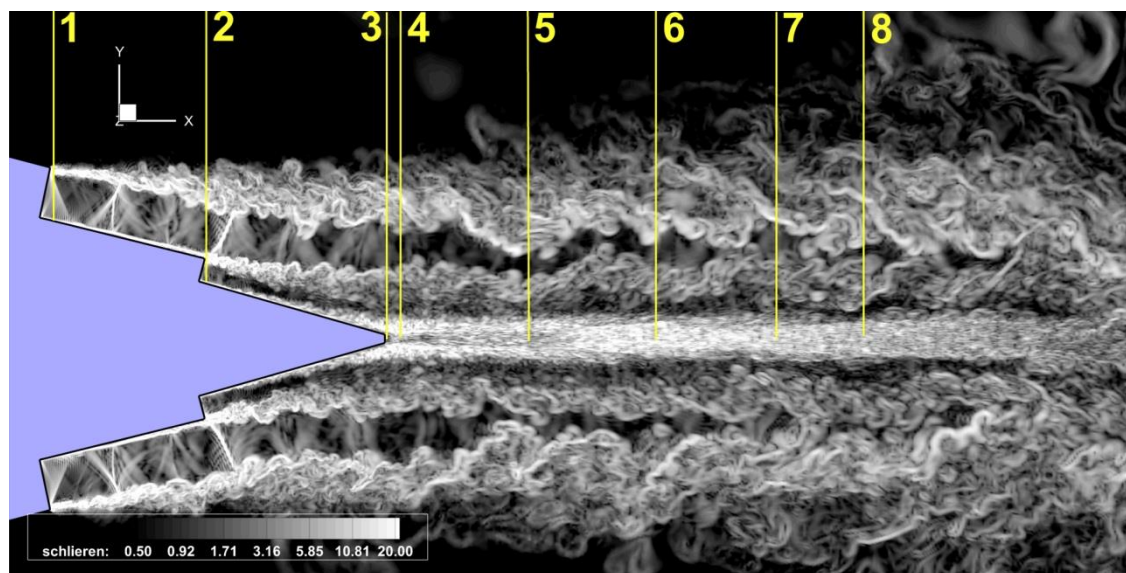
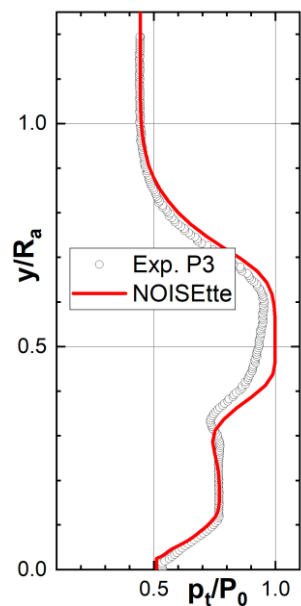
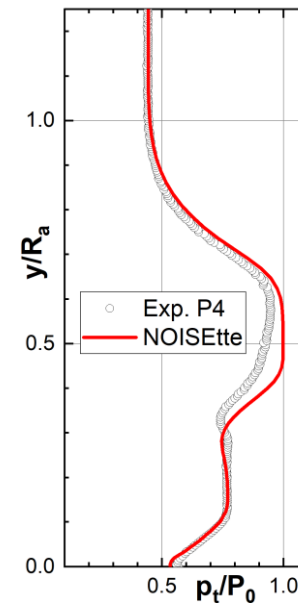
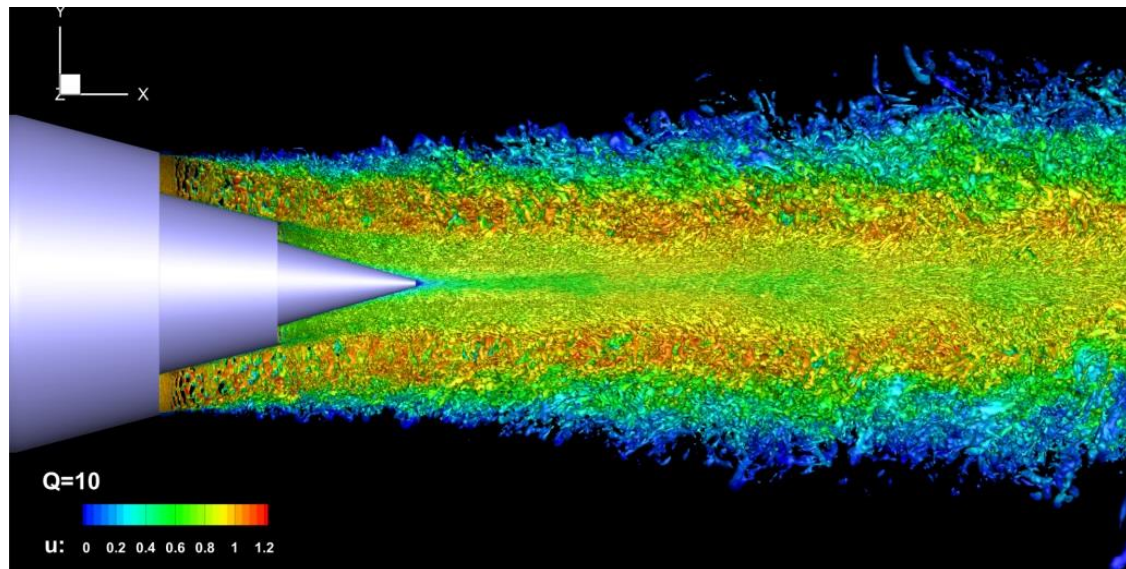
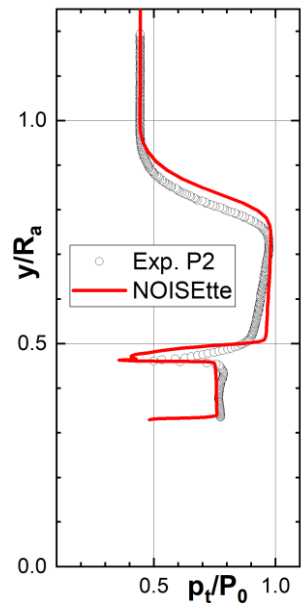
Эксперимент: В. И. Запрыгаев  $Re_D=3 \cdot 10^6$

	NPR	$M_{jet}$
Контур 1	1.72	0.915
Контур 2	2.25	1.141

- **Подход** DDES +  $\Delta_{SLA}$ , гибридная EBR CD+Upw+WENO схема
- **Расчет** 1120 ядер CPU Ломоносов-2 (80MPI x 14OpenMP x HT)
- **Вычислительная стоимость** 100D/U ~154 часа
- **Сетка** 26.6 млн узлов, 200 узлов в азимутальном направлении



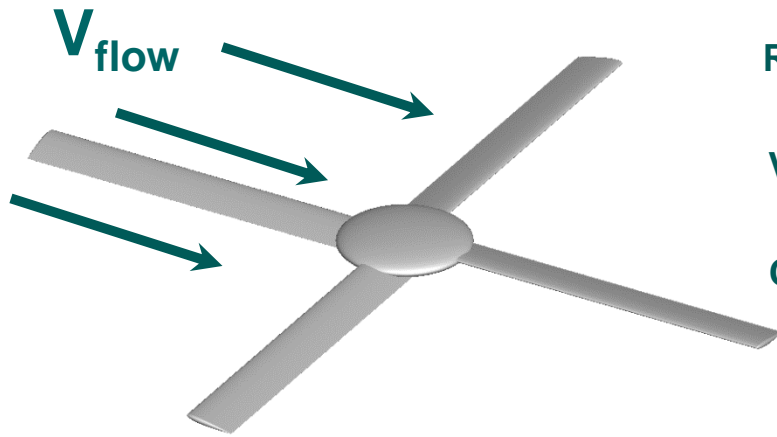
# Струя из двухконтурного сопла (совместно с ЦАГИ)



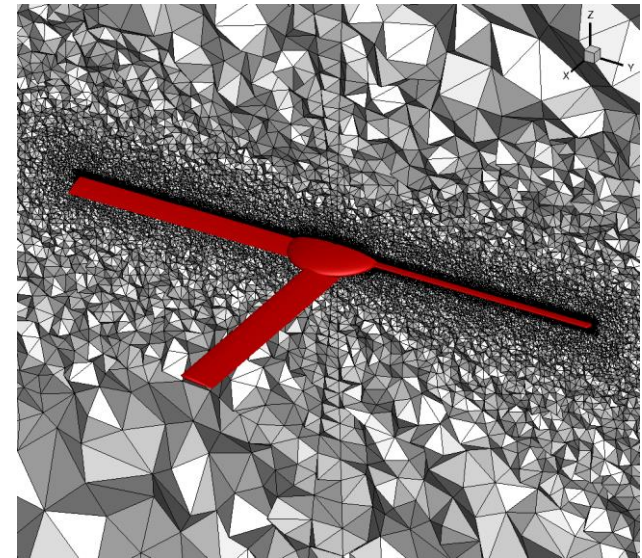




# Моделирование обтекания жесткого винта косым потоком

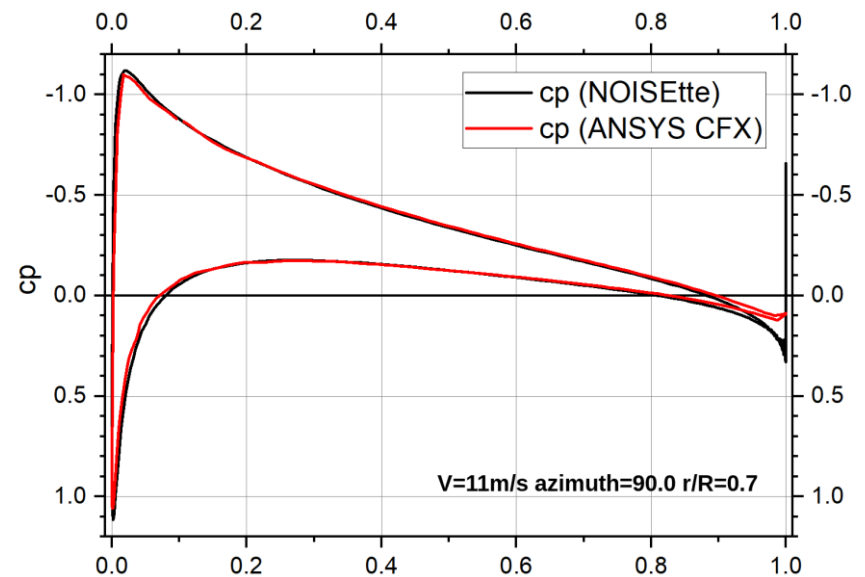
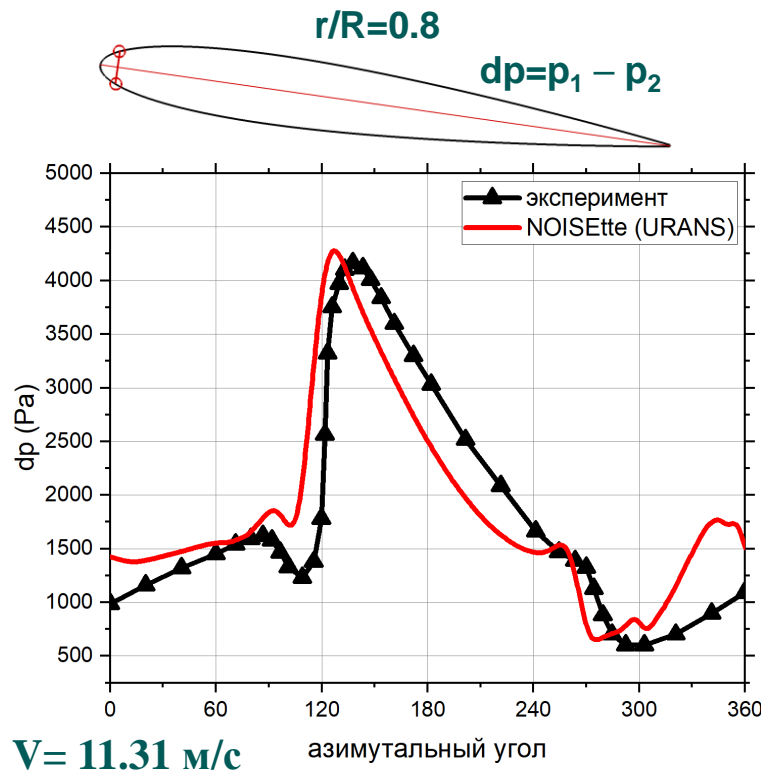


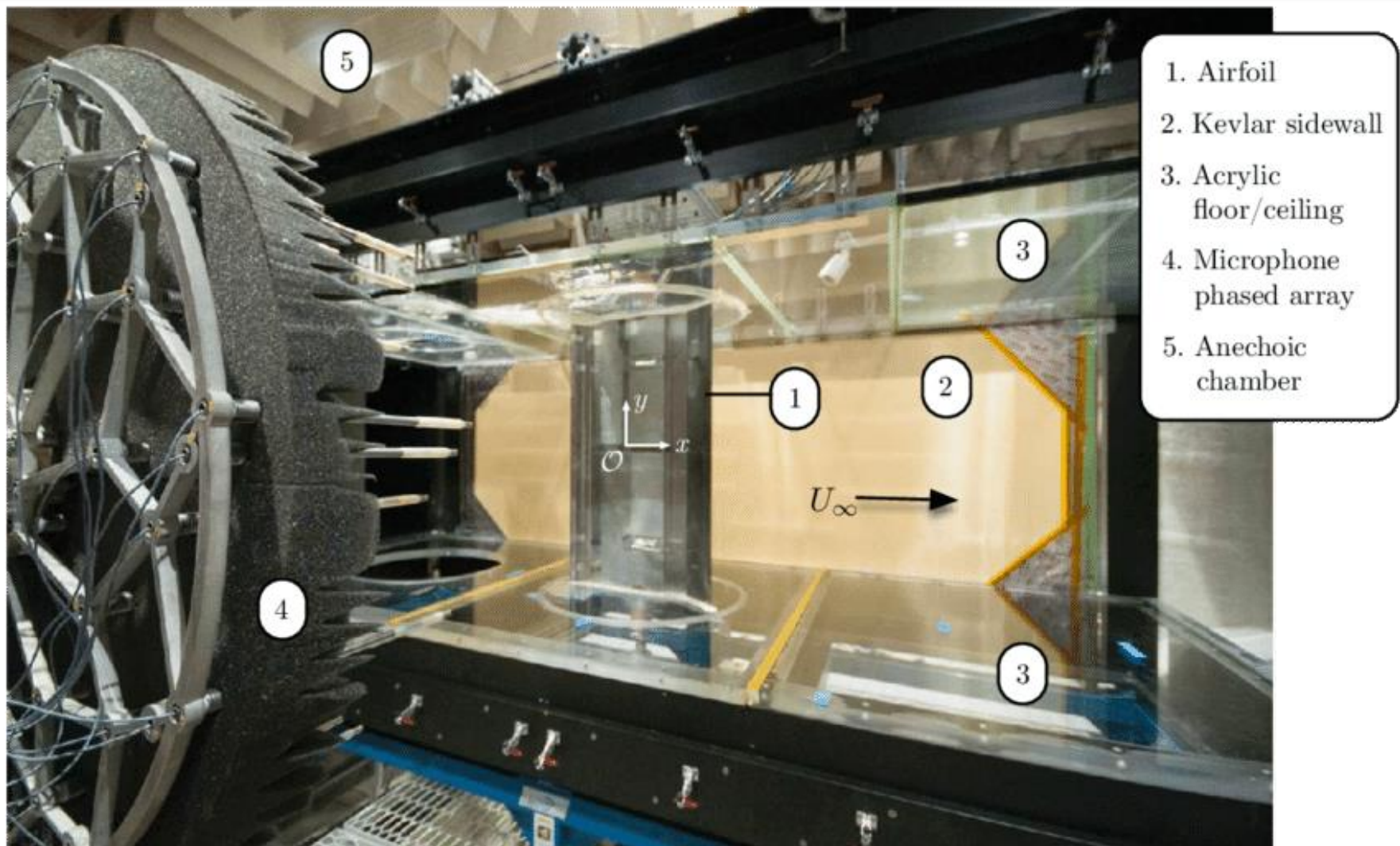
$R=1\text{ м}$ , хорда  $0.15\text{ м}$ ,  
 $360\text{ об/мин}$  ( $45\text{ мс}$ )  
 $V = 6.8, 11.3, 20.4\text{ м/с}$   
URANS  
Совместная работа  
с НИО-5 ЦАГИ



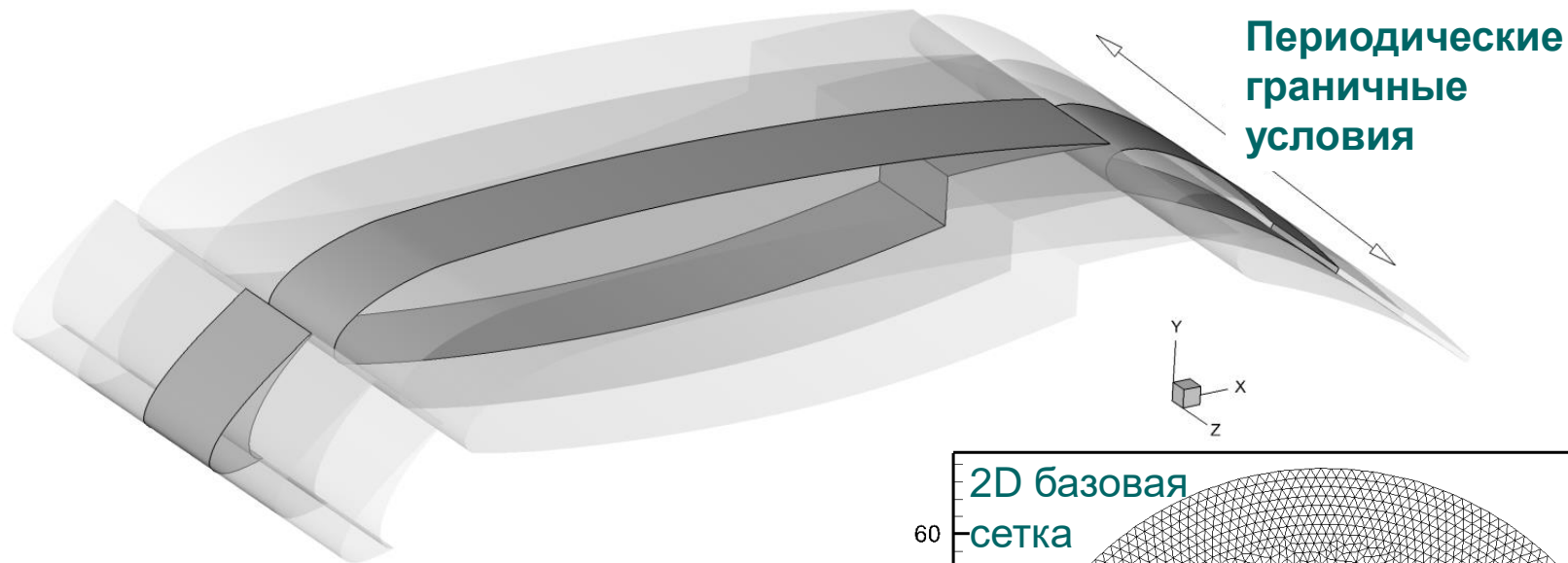
x

Сетка 9М узлов



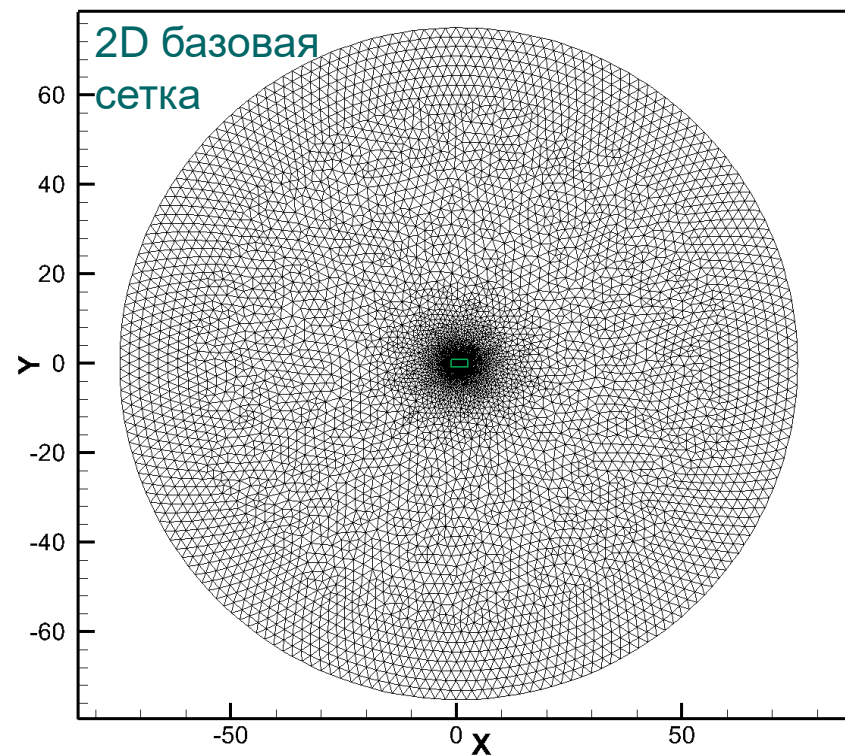


Pascioni, Kyle & Cattafesta, Louis. (2016).  
Aeroacoustic Measurements of Leading-Edge Slat Noise.  
22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. DOI: 10.2514/6.2016-2960

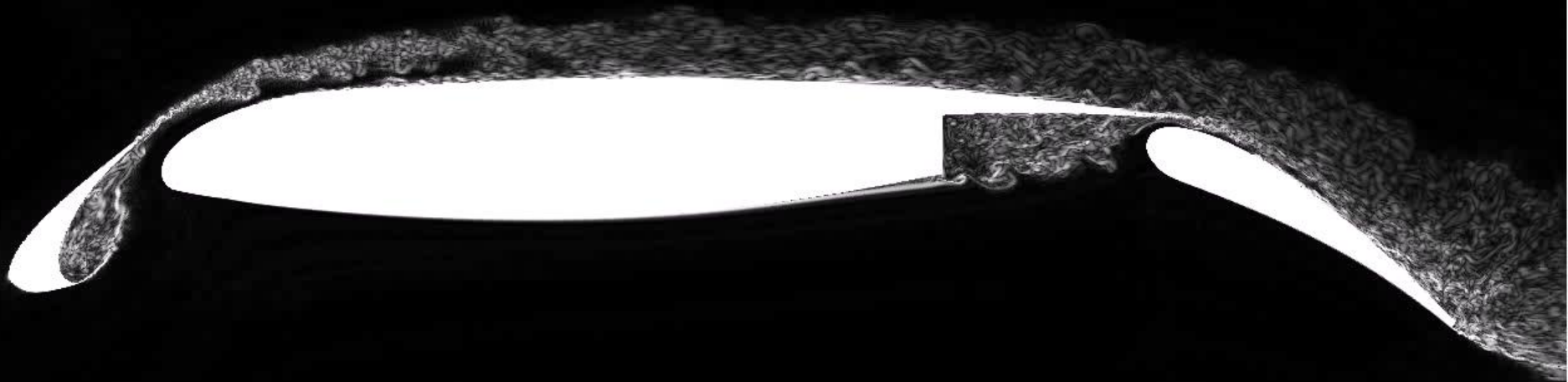


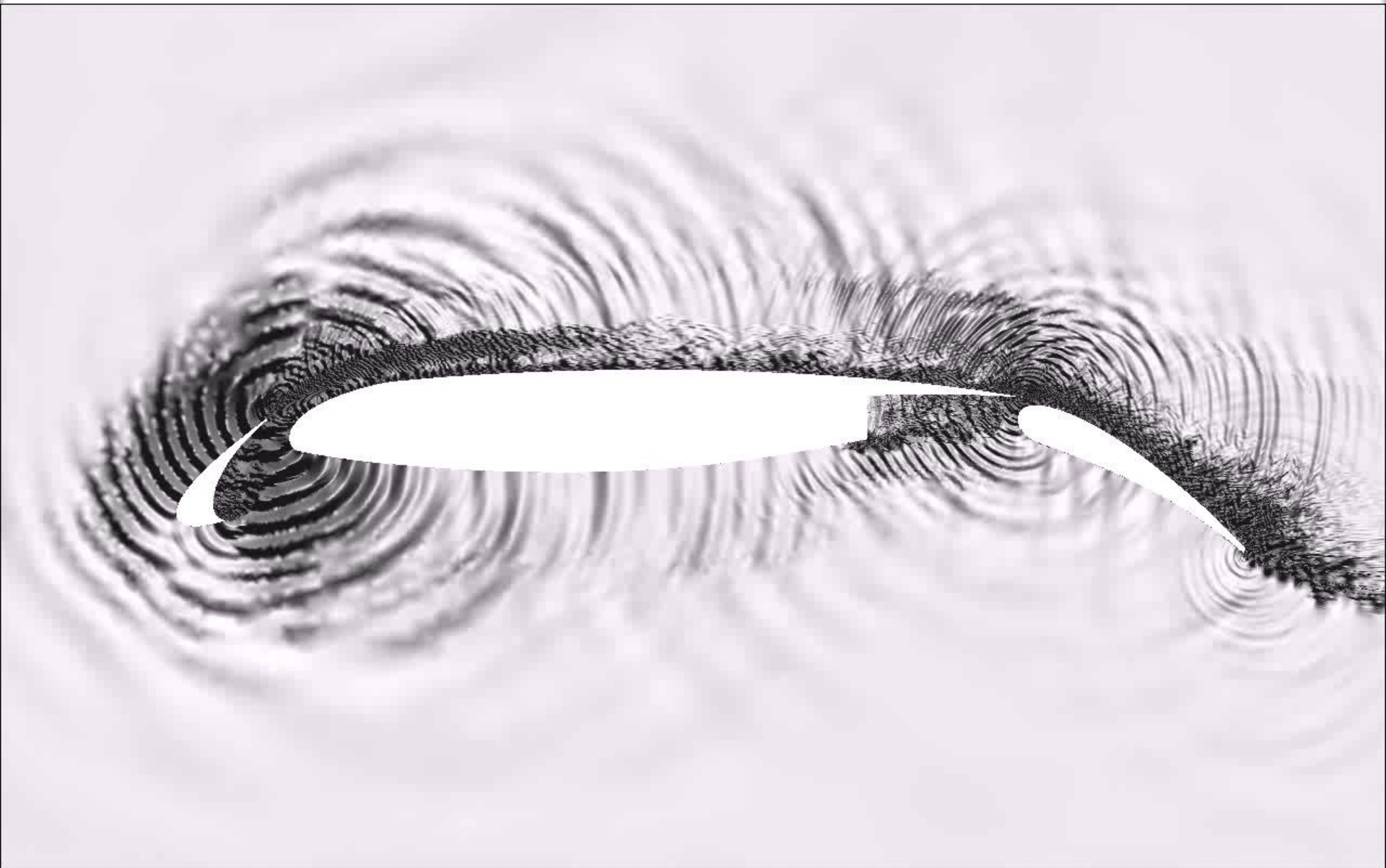
На модельной задаче изучаются  
потребное сеточное разрешение,  
периоды интегрирования по времени,  
зонный подход,  
расчет шума в дальнем поле

По базовой 2D сетке прожимаются  
призматические слои вдоль размаха

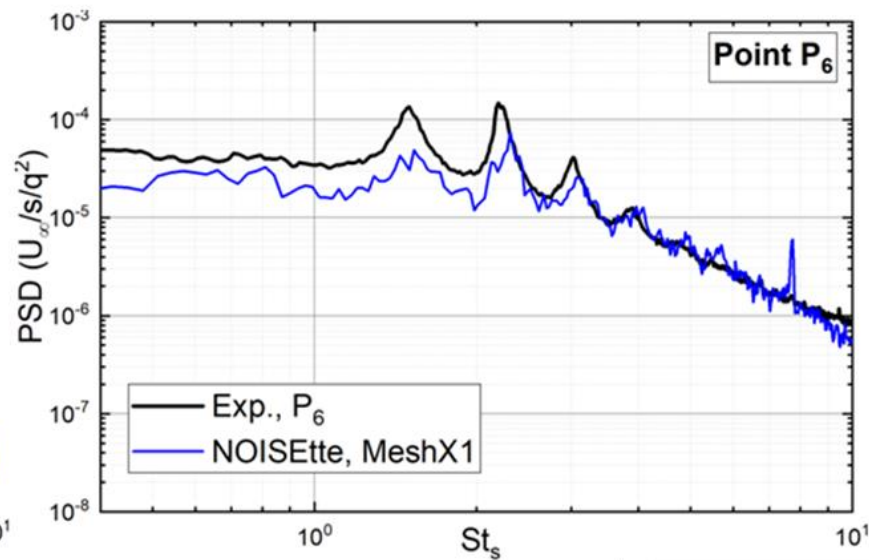
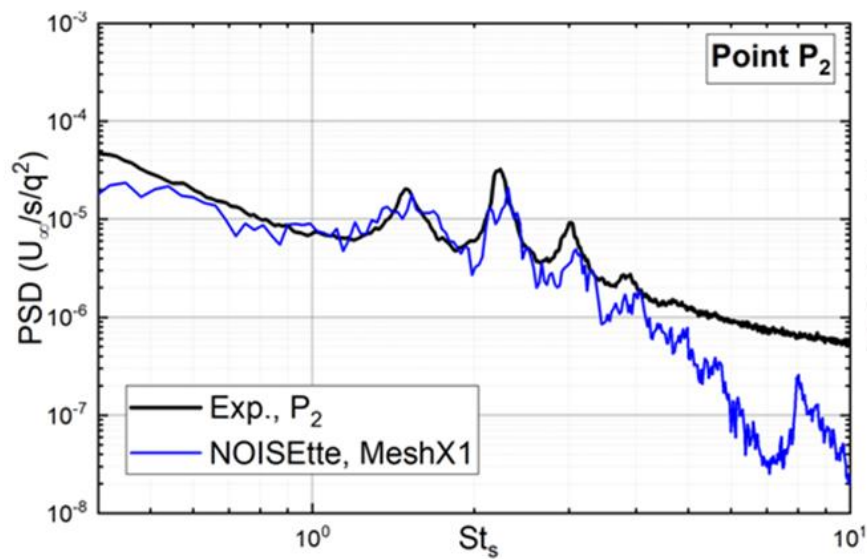
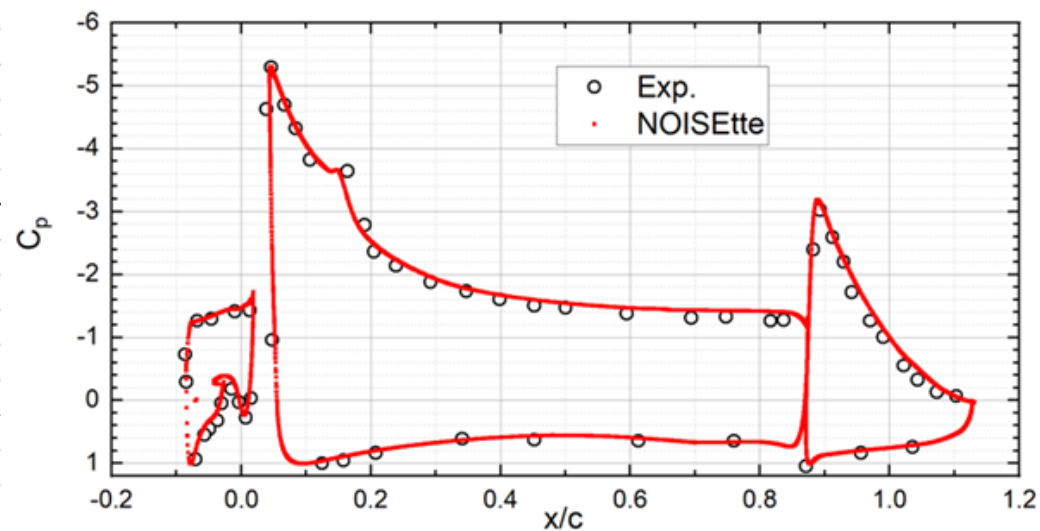
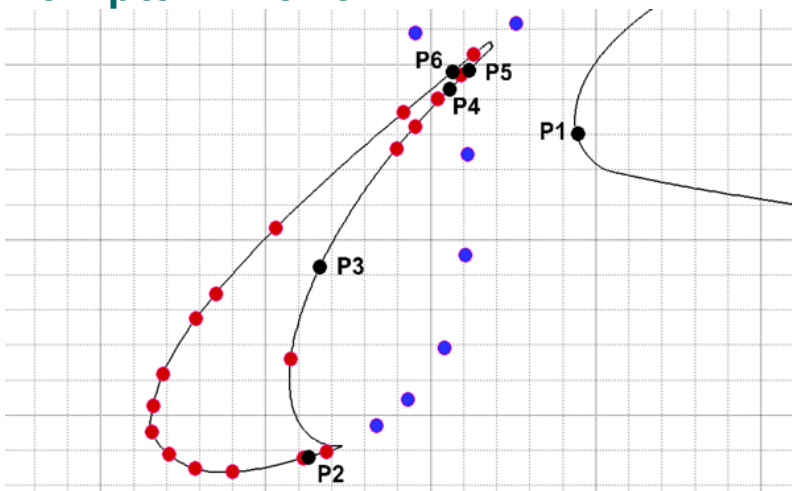


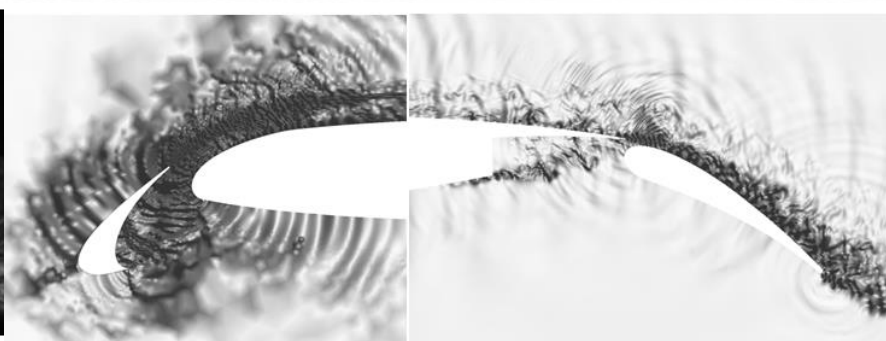
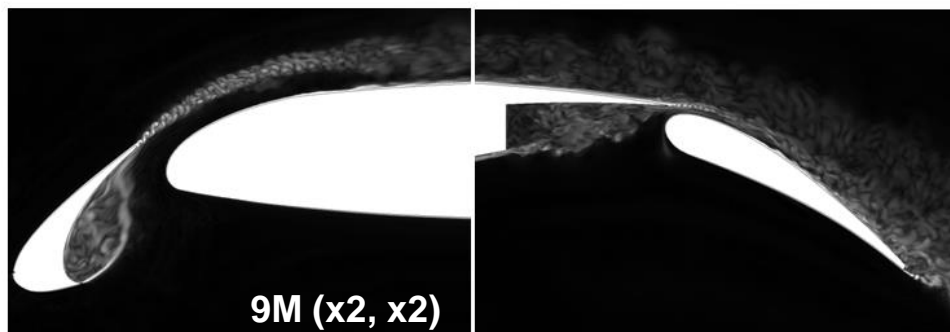
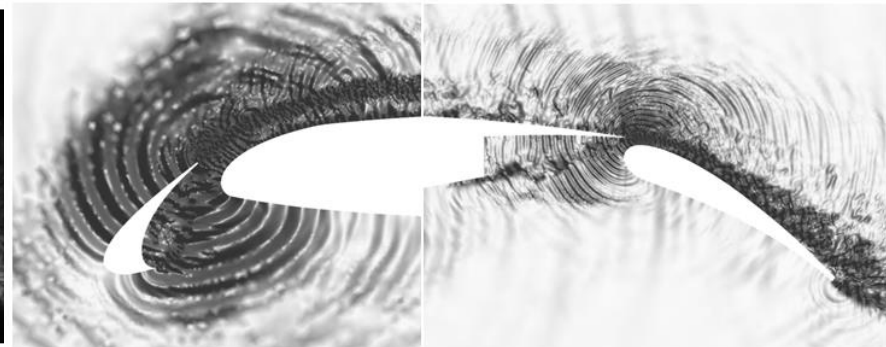
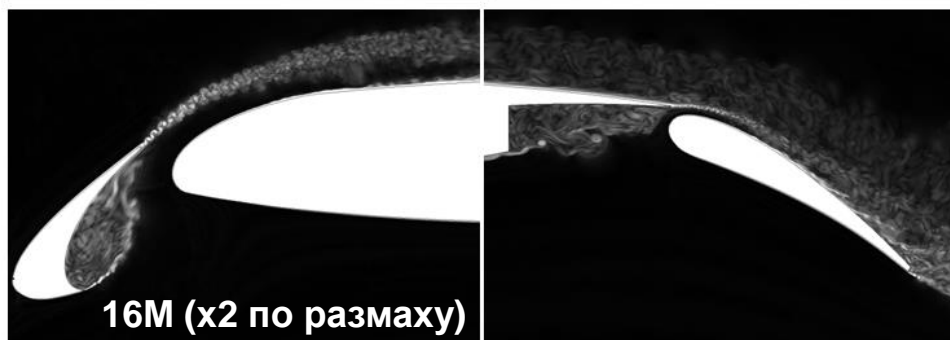
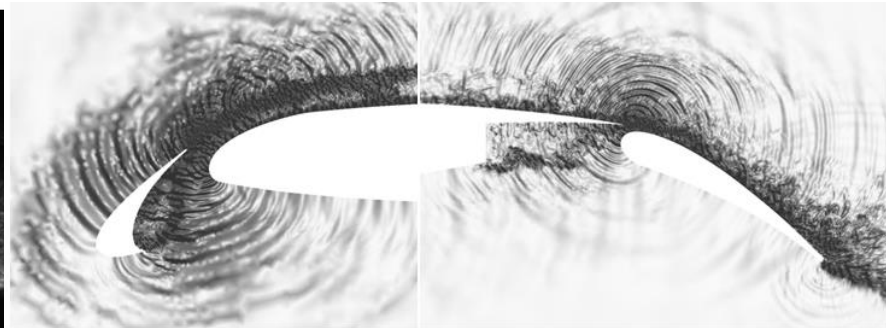
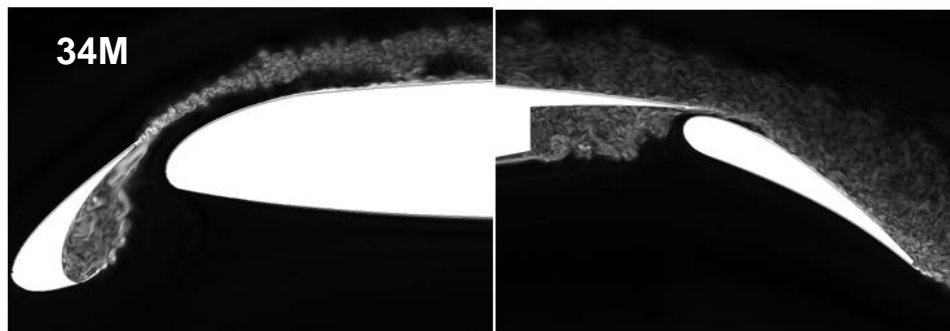






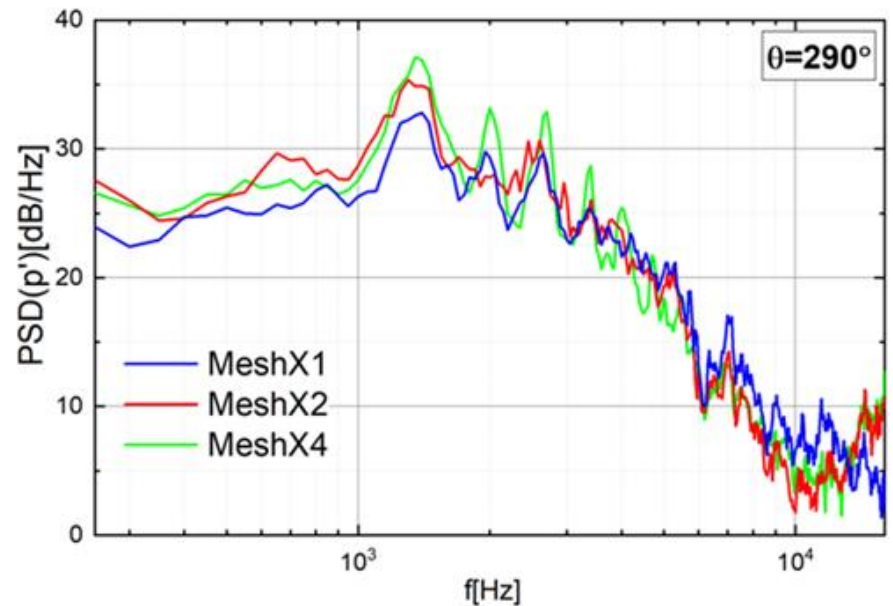
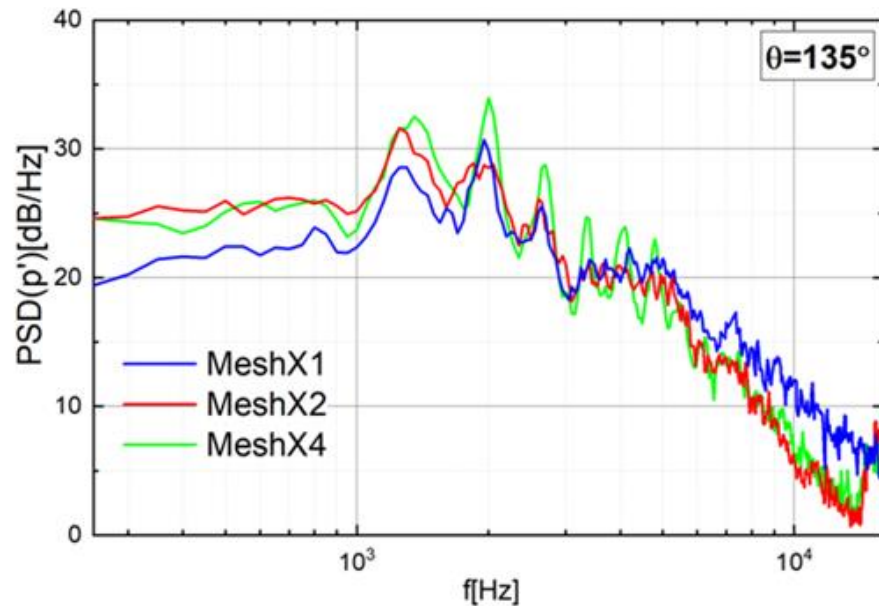
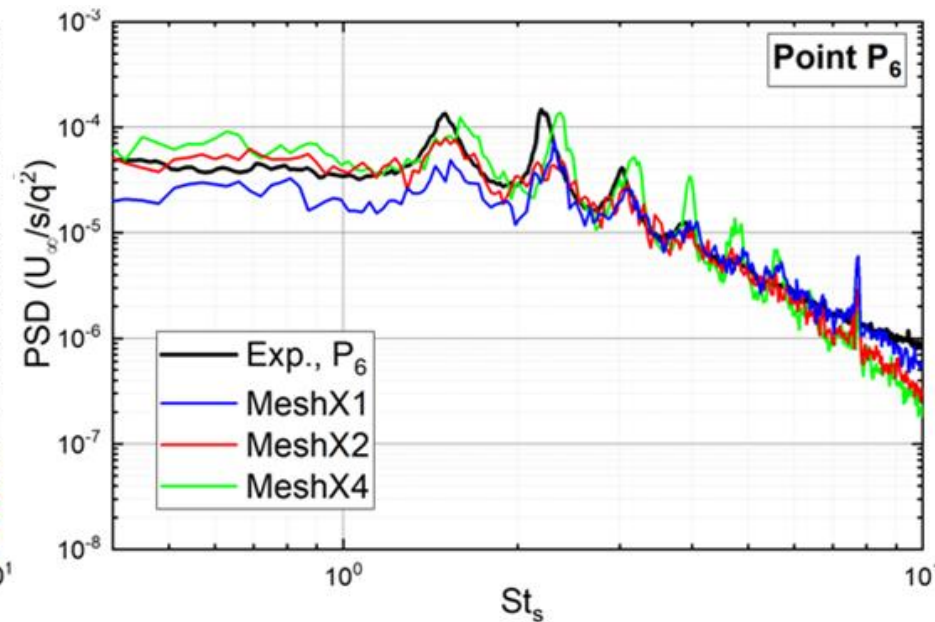
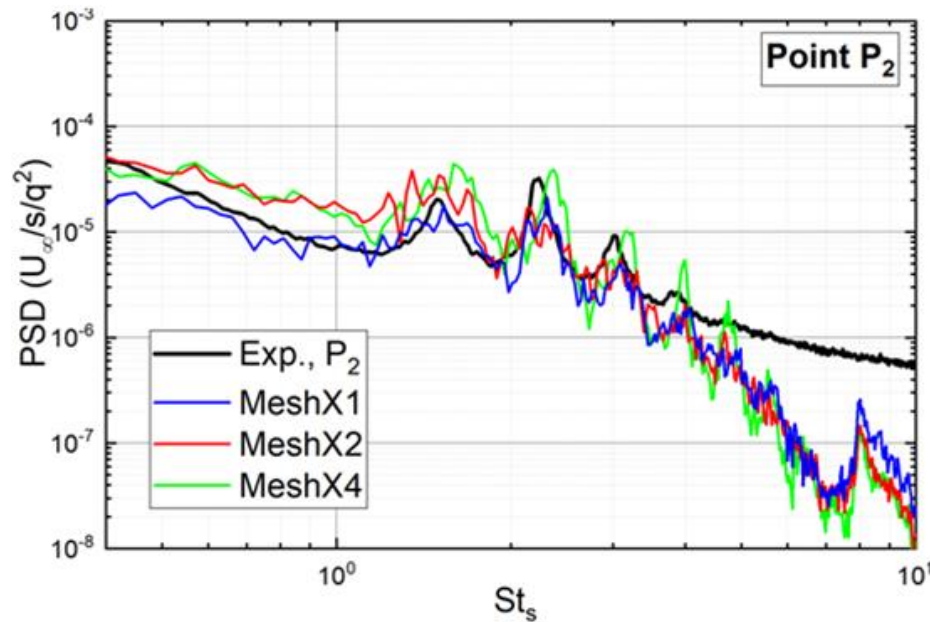
## Контрольные точки



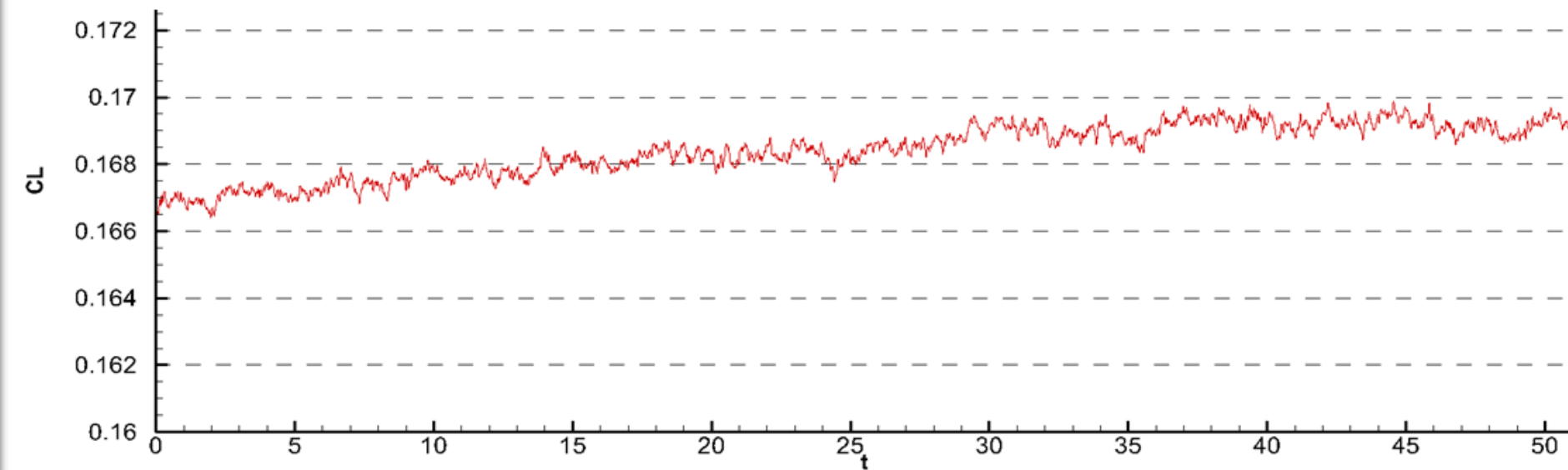
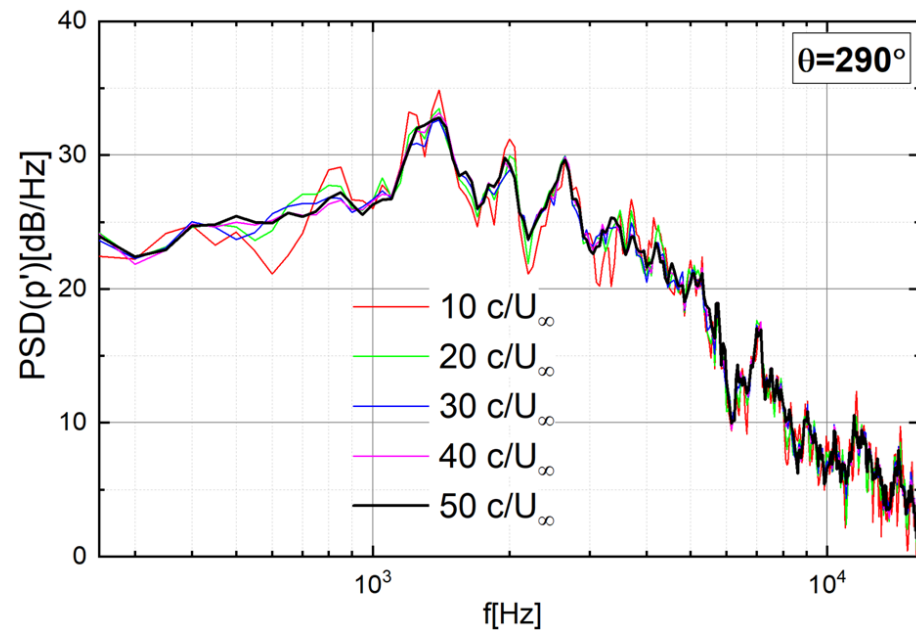
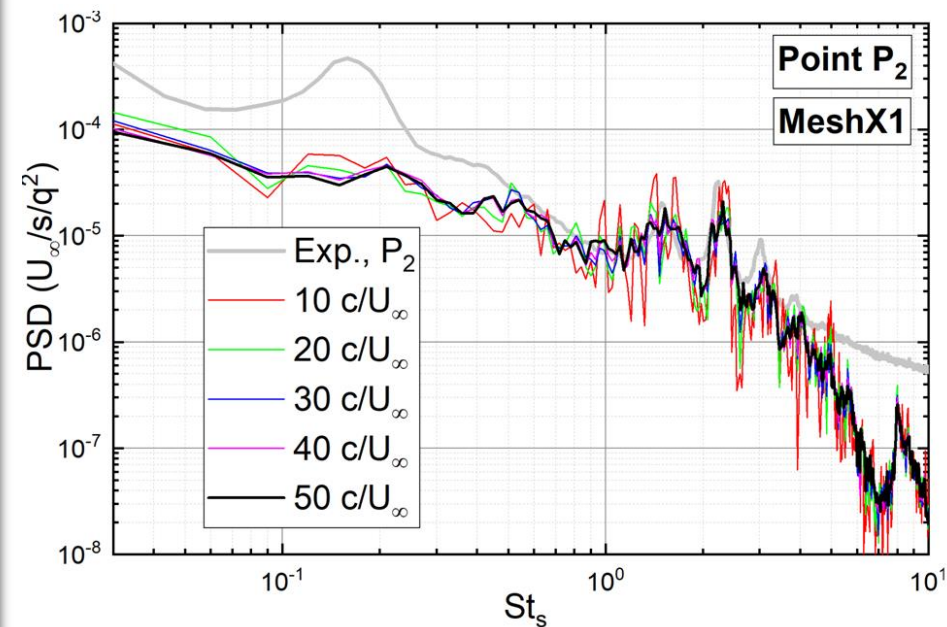




## Огрубление сетки – спектры



# Выход на ССР с RANS решения





- Выход на ССР: 30 TU
- Осреднение полей: <8 TU
- Накопление выборки для спектров: 20 – 30 TU
- Общее время: >50 TU

База: 1 шаг на 35M сетке = 0.4 CPUh ( $dt=7E-5$ ), 1 TU = 5.7K CPUh (Intel Xeon v3)

### Расчет всего крыла

разрешение X1 = 1000M nodes, ~8M CPUh

разрешение X2 = 600M nodes, ~5M CPUh

разрешение X4 = 300M nodes, ~2M CPUh

Использование пристенка -10% CPU времени

Ускорение ССР расчетами на грубой сетке -30%

**Можно уложиться в 4-5M CPUh**

Расчет сегмента крыла: 200 – 300 K CPUh

Гибридный расчет RANS крыла с DES сегментом: 500 – 700 K CPUh

- Нагромождение всех мыслимых схем, методов и моделей
- Полная защита кода от внесения изменений
- Сплошное микадо (или импортозамещающий аналог – бирюльки)
- Основная сложность – сочетание СС и VC подходов
- Необходимы большие изменения архитектуры кода (NOISETTE 2.0)
- Прокачка структуры данных, внедрение более надежных контейнеров
- Внедрение модульности для подключения внешнего функционала на этапе линковки
- Глубокая ревизия по производительности

- Проблемы EBR на сшивке входа и стенки
- Сложности со скользящим интерфейсом в VC подходе
- Улучшение работы EBR в погранслое, криволинейные ИК
- Пристеночные функции на острых кромках плохо себя ведут
- Неполное покрытие QA  
хорошо покрыто все ненужное и плохо покрыто нужное
- Нет единой документации по инфраструктуре,  
уже сами разработчики не могут в утилях разобраться

- Модульность
- Гетерогенные вычисления
- Генеральная уборка
- Документация
- Расширение покрытия QA
- Разработка документации
- Разветвление “NOISETTE-сарай” и “NOISETTE бизнес-ланч”