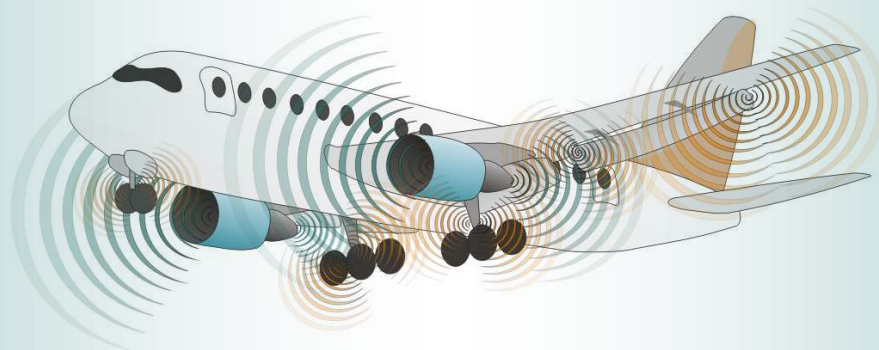


КОМПЛЕКС ПРОГРАММ NOISETTE ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ И АЭРОАКУСТИКИ



Сектор вычислительной аэроакустики
<http://caa.imamod.ru>



Ордена Ленина федеральное государственное бюджетное
учреждение науки институт прикладной математики
им. трижды Героя Социалистического Труда М. В. Келдыша
Российской Академии Наук

Комплекс программ NOISEtte для CFD/CAA расчетов

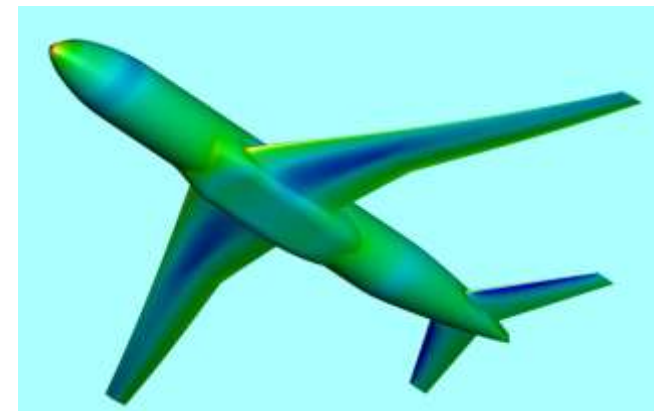
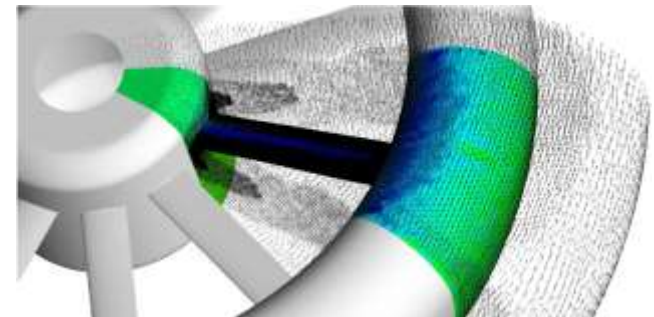


Моделирование сжимаемых турбулентных течений
с учетом явлений аэроакустики на основе алгоритмов
повышенной точности для неструктурированных сеток

Коллектив разработчиков O(10) человек

ИММ РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

- И. Абалакин, к. ф.-м. н., с.н.с.
- П. Бахвалов, к. ф.-м. н., м.н.с.
- В. Бобков, м.н.с.
- А. Горобец, к. ф.-м. н., с.н.с.
- О. Доронина, аспирант
- А. Дубень, к. ф.-м. н., м.н.с.
- Н. Жданова, к. ф.-м. н., н.с.
- Т. Козубская, д. ф.-м. н., зав. сектой
- С. Суков, к. ф.-м. н., с.н.с.



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.

Комплекс программ NOISEtte для CFD/CAA расчетов

Научная новизна и инновации

Включает результаты диссертационных работ

1. Абалакин И.В. – численные схемы и методы
2. Бахвалов П.А. – экономичные численные схемы
3. Горобец А. В. – параллельные технологии
4. Дубень А. П. – модели турбулентности
5. Козубская Т.К. – численные схемы и методы

Свидетельства о государственной регистрации программ

1. Абалакин И.В., Горобец А.В., Козубская Т.К., Программный комплекс NOISEtte.f , №2011617080
2. Абалакин И.В., Горобец А.В., Дубень А.П., Козубская Т.К., Программный комплекс NOISEtte++, №2012614096
3. Бахвалов П.А., Горобец А.В, Программный комплекс Fgrip для получения характеристик акустического сигнала в дальнем поле течения, №2013619362
4. Горобец А.В., программа Commscheme для построения коммуникационной схемы по декомпозиции неструктурированной тетраэдральной сетки, №20133619363

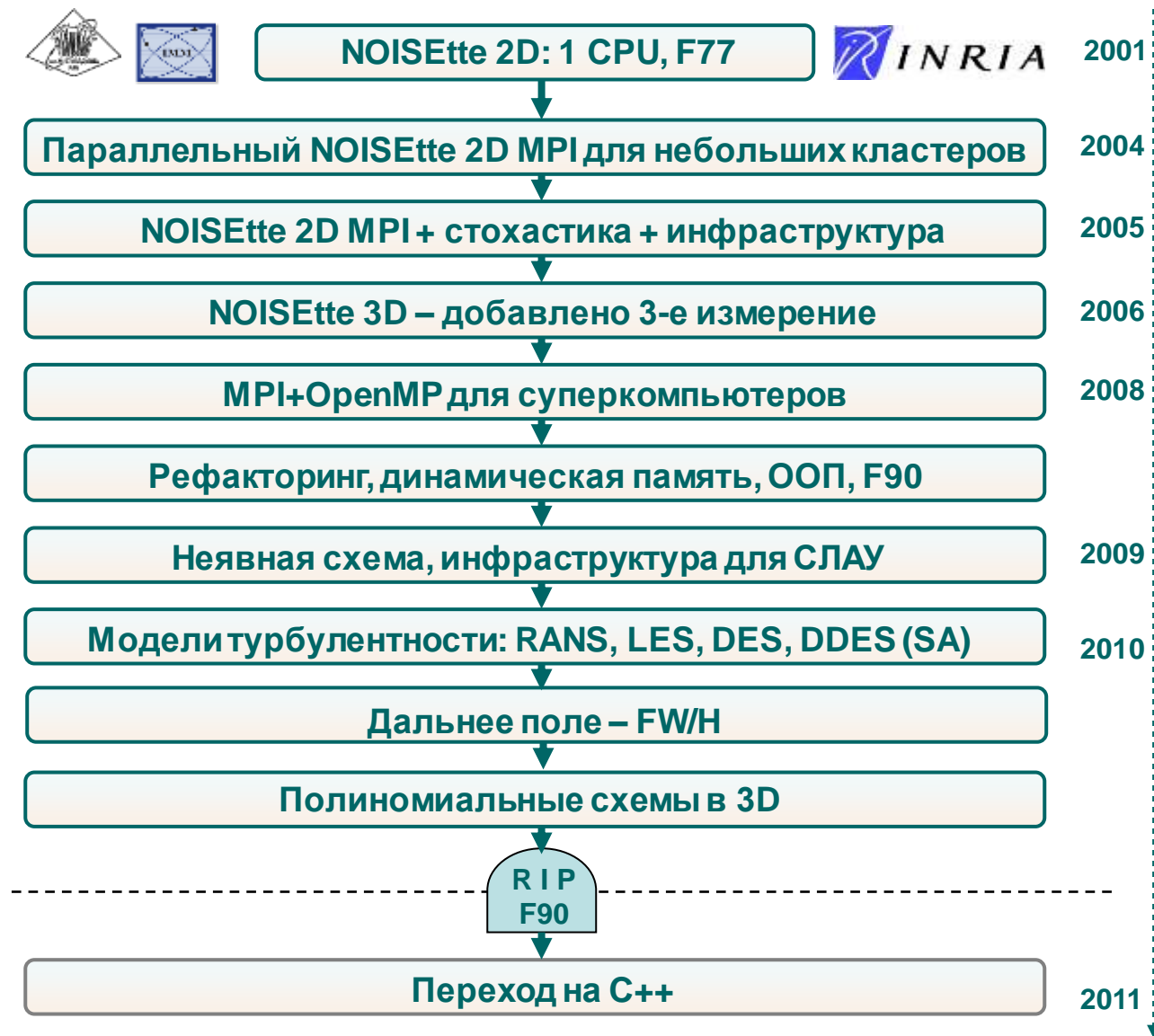
Широкое применение в научной работе и совместных исследованиях

Заказчики и партнеры по научной работе

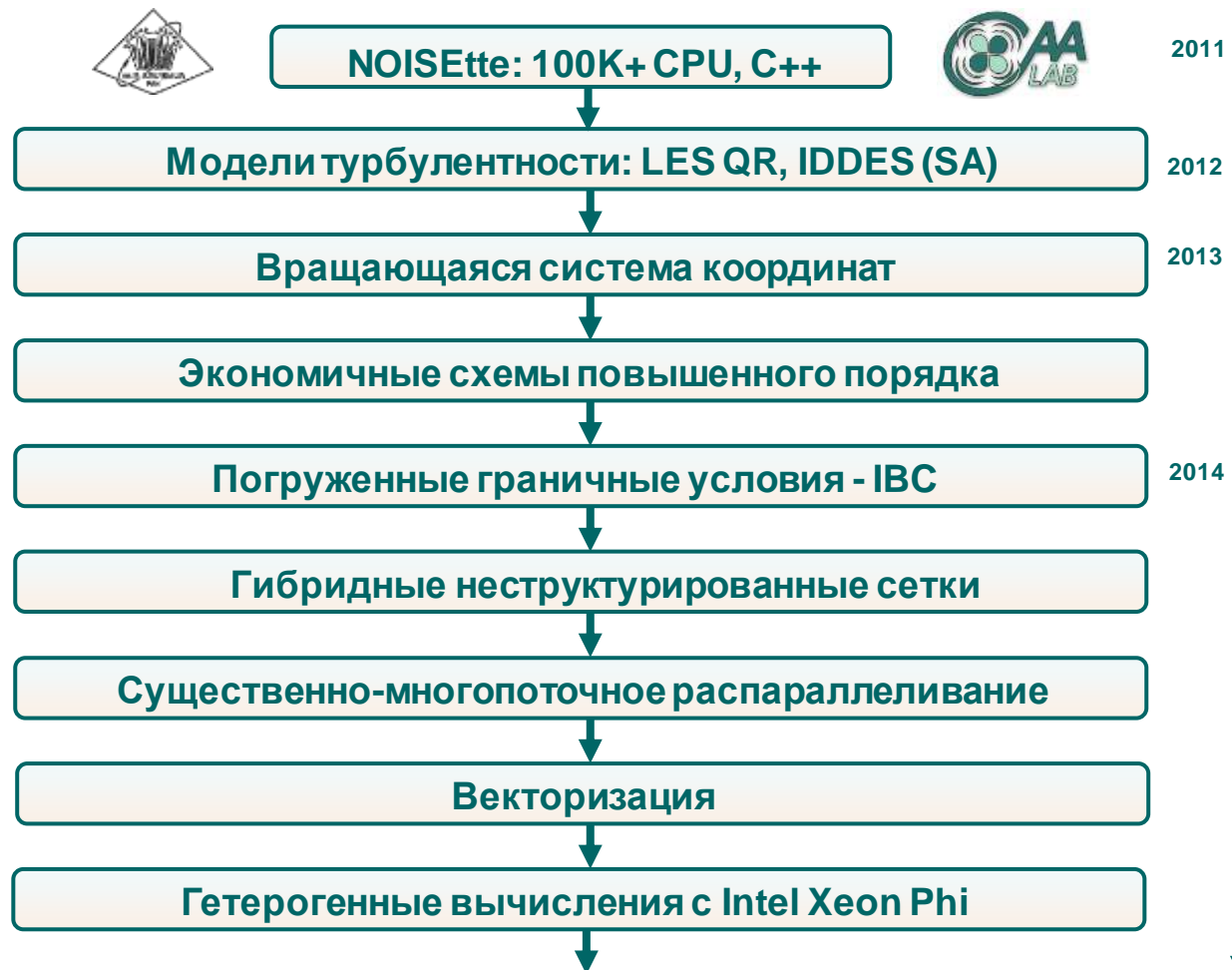
ЦАГИ, ОАО «Авиадвигатель» (Пермь),
ОАО «Камов», ОАО «ОКБ Сухого»,
РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров), МФТИ,
Минобрнауки, РФФИ,
UPC (Испания), EU FP7, ...



История развития кода: до н. э.



История развития кода: н. э.



Математические модели

• 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
- NLDE – уравнения Эйлера, нелинейные для возмущений

• Модели турбулентности

- RANS, URANS (SA)
- LES (Смагоринский, Q-R)
- DES, DDES, IDDES* (Смагоринский, SA)

• Погруженные граничные условия – IBC

• Метод расчета акустики в дальнем поле FW/H

• Стохастические методы генерации входного сигнала и турбулентных полей

- Белый шум, заданный спектр
- SNGR модель

*Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., Travin A.K. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities // International Journal of Heat and Fluid Flow, 29(6), pp. 1638-1649 (2008).

Метод погруженных граничных условий

• Метод Бринкмана штрафных функций

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{Q}_\eta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{Q}_\eta) + \frac{1}{\eta} \chi \begin{pmatrix} 0 \\ \rho_\eta (\mathbf{u}_\eta - \mathbf{u}_{\Omega_o}) \\ E_\eta - E_{\Omega_o} \end{pmatrix} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla \cdot \mathbf{F}_v(\mathbf{Q}_\eta) \\ \mathbf{Q}_\eta(\mathbf{x}, t=0) = \mathbf{Q}_0(\mathbf{x}) \end{cases}$$

$\eta \ll 1$ — штрафной параметр

χ — характеристическая функция, $\chi = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} \in \Omega_o \cup \partial\Omega_o \\ 0, & \mathbf{x} \in \Omega_f \end{cases}$

$E_{\Omega_o} = \frac{\rho T}{\gamma - 1}$, \mathbf{u}_{Ω_o} — полная энергия и скорость обтекаемого препятствия

• Характеристический метод штрафных функций (CBVP)

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = (1 - \chi) RHS_\rho - \frac{\chi}{\eta_c} \left(\frac{\partial \rho}{\partial n} - \Phi \right) & \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\chi}{\eta_c} \frac{\partial \Phi}{\partial n}, \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = (1 - \chi) RHS_{\mathbf{u}} - \frac{\chi}{\eta_b} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_w) & \Phi = (1 - \chi) \frac{\partial \rho}{\partial n} + \chi \Phi \\ \frac{\partial T}{\partial t} = (1 - \chi) RHS_T - \frac{\chi}{\eta_b} \left(\frac{\partial T}{\partial n} - q_w \right) & \Phi_{\partial\Omega_o} = \frac{\partial \rho}{\partial n} \Big|_{\partial\Omega_o} \end{cases}$$

Система уравнений со штрафными функциями

Дополнительное уравнение для производной плотности

Характерные задачи для применения IBC



E. Brown-Dymkoski, N. Kasimov, O.V. Vasilyev, A Characteristic-Based volume penalization method for arbitrary mach flows around solid obstacles, Journal of Computational Physics 262, 344-357

Численные методы

• Неструктурированные сетки

- Треугольные/тетраэдральные сетки
- Гибридные сетки (элементы до 6 граней)

• Схемы повышенной точности с центрами в узлах

- EBR (Edge-Based Reconstruction) схемы с квазиодномерной реберно-ориентированной реконструкцией переменных
- Полиномиальная конечно-объемная схема

• Римановские солверы:

- Годунов, Роу, Соломон-Ошер, Хуанг

• Маломаховые течения

- Предобуславливатель Туркеля

• Разрывные решения

- WENO-EBR схемы
- MUSCL-TVD EBR схемы

• Интегрирование по времени

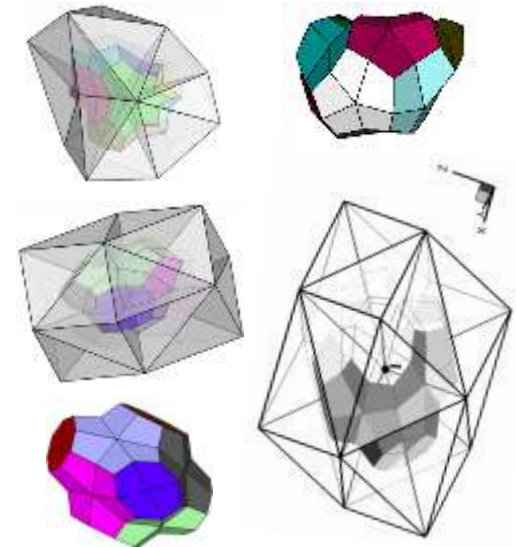
- Явная схема (Рунге-Кутта 1 – 4-го порядка)
- Неявная схема 1-2 порядка с линеаризацией по Ньютону разностной системы уравнений

• Решатели СЛАУ

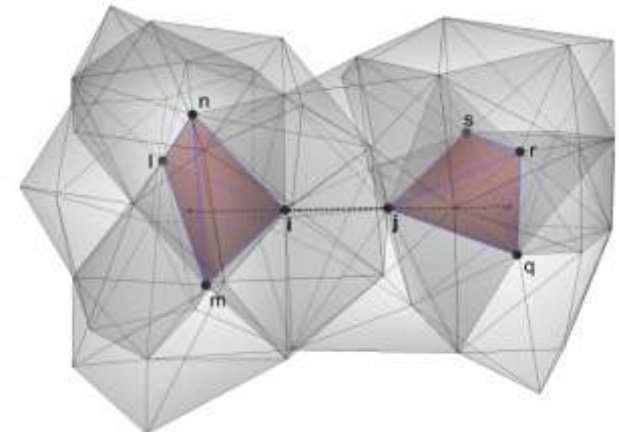
- BICG-Stab с локальными блочными предобуславливателями
- Мультисистемный режим

• Граничные условия

- Твердые стенки – отражение, прилипание
- Неотражающие граничные условия К. Тама
- Граничные условия с расщеплением потоков (Стегера – Уорминга, Роу)
- Неотражающие граничные условия Л. Дородницына
- Периодические условия - с топологическим замыканием



Контрольные объемы



Пример шаблона схемы

EBR схемы = Конечно-разностные схемы для неструктурированных сеток

1. Метод линий для решения систем ОДУ

2. Определение переменных в узлах

Узел i является центром ячейки с объемом V_i

Вся геометрическая работа (нахождение соседей 1 и 2 уровней, построение ячеек, граней, нормалей, а также определение шаблонов схемы) выполняется на стадии препроцессора

3. Выполнение законов сохранения (консервативность)

следует из общей формулировки схемы:

$N(i)$ — множество граней ячейки вокруг узла i
(или множество ребер сетки, выходящих из узла i)

F_{ij} — поток через грань ячейки ij с площадью S_{ij}
(проекция на нормаль)

$$\left[\frac{\partial Q}{\partial t} \right]_i + \frac{1}{V_i} \sum_{j \in N(i)} F_{ij} S_{ij} = 0$$

4. Реберная реализация: основной цикл идет по ребрам (вычисление F_{ij}) с накоплением необходимых интегральных сумм в узлах

5. Будем определять поток через каждую грань ячейки в одной точке в середине соответствующего ребра (т.е. ребра, пересекаемого данной гранью)

6. Одномерный шаблон реконструкции

7. Квазиодномерный шаблон реконструкции

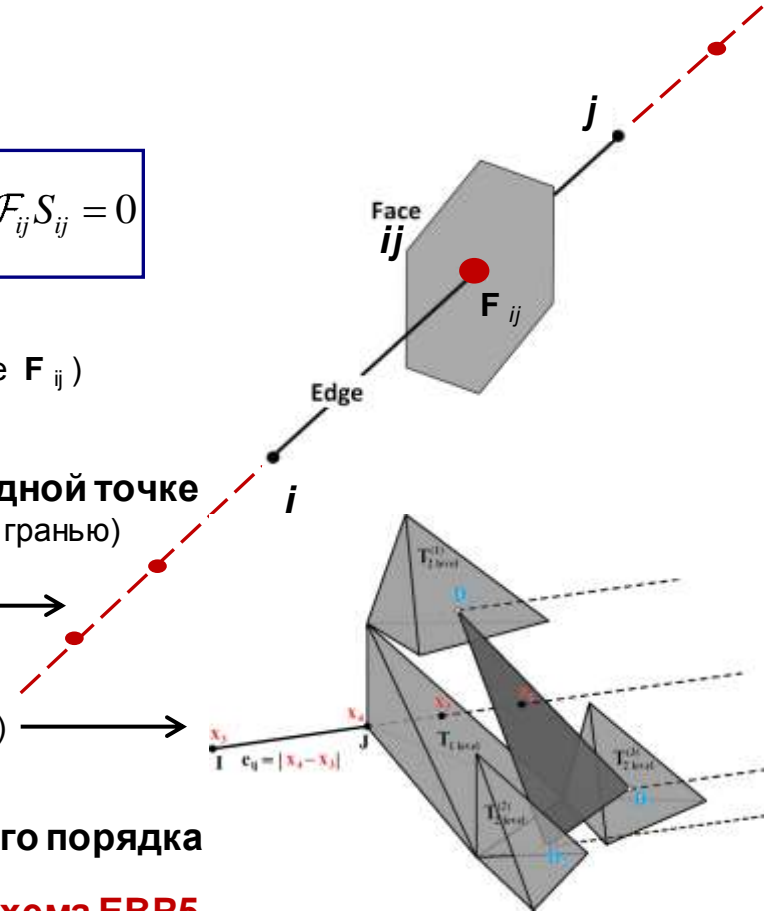
(вся геометрическая работа делается один раз перед началом расчета)

8. На 5-точечном шаблоне можно построить:

одну реконструкцию 4-го порядка и три реконструкции 2-го порядка

9. На основе 5-точечной реконструкции 4-го порядка строится **схема EBR5**

10. На основе взвешенной комбинации трех 3-точечных реконструкций 2-го порядка, с использованием мониторов гладкости строится **схема WENO-EBR**



Особенности программной архитектуры NOISEtte

- **Переносимость**

Может работать на различных системах от рабочих станций до суперкомпьютеров, Windows, Linux,..., прямой/обратный порядок байтов, MPI, OpenMP, MPI+OpenMP.

- **Автономность**

Может работать без дополнительных библиотек

- **Высокая степень параллелизма**

Рассчитан на системы с числом ядер порядка сотни тысяч

- **Высокая производительность вычислений**

Явная схема ~15-20% от пиковой производительности CPU ядра, неявная схема ~10-15%

- **Совмещенное ядро для 2D/3D расчетов**

- **Предназначен для фундаментальных исследований**

Рассчитан на использование подробных сеток с числом тетраэдров более миллиарда, программная реализация позволяет легко добавлять новые модели и численные методы

- **Предназначен для промышленных приложений**

Неструктурированные сетки позволяют работать со сложной геометрией

- **Ориентирован на большие расчеты нестационарных задач**

Среда разработки

- **Управление версиями – Subversion**
- **Баг-треккер, управление задачами – Redmine (в связке с SVN)**
- **IDE – MVS 2008, 2012;**
- **Средства отладки – внутренние средства контроля и отладки, MVS, Intel Parallel Studio, Valgrind, gdb,**
- **Набор из десятков “микротестов” для автоматизированного контроля корректности**
для каждого теста подъем с рестарта, выполнение нескольких шагов, выдача нормы расхождений
- **Набор верификационных тестов для более полной проверки**
Расчеты выполняются полностью для проверки правильности конечного решения
- **Модуль точных решений - набор аналитических решений и расчет норм ошибки**
- **Встроенное инструментальное профилирование**
Встроенная система таймирования с высоким разрешением для множественных каналов, идентифицируемых по текстовым меткам. Позволяет проводить измерения для каждой нити/процесса, собирать статистику в параллельном режиме и, таким образом, измерять сбалансированность загрузки.
- **Средства визуализации – Tecplot, Origin**
- **Встроенный менеджер памяти, счетчик фактической производительности**

Документация, интерфейс

- Подборка документации по всем средствам разработки.
 - Подробная документация по математической части (LaTeX).
 - Документация для разработчика и пользователя в виде полноценного документа – отсутствует.
 - Информация для разработчика в комментариях по исходному коду в сочетании со средствами IDE.
 - Подборка шаблонов постановок задач и тестовых примеров.
-
- Отказ от применения систем автоматической документации (Doxugen).
 - Отказ от какого-либо графического интерфейса.
 - Отказ от формата XML в файлах входных данных.

Инфраструктура для подготовки сеточных данных

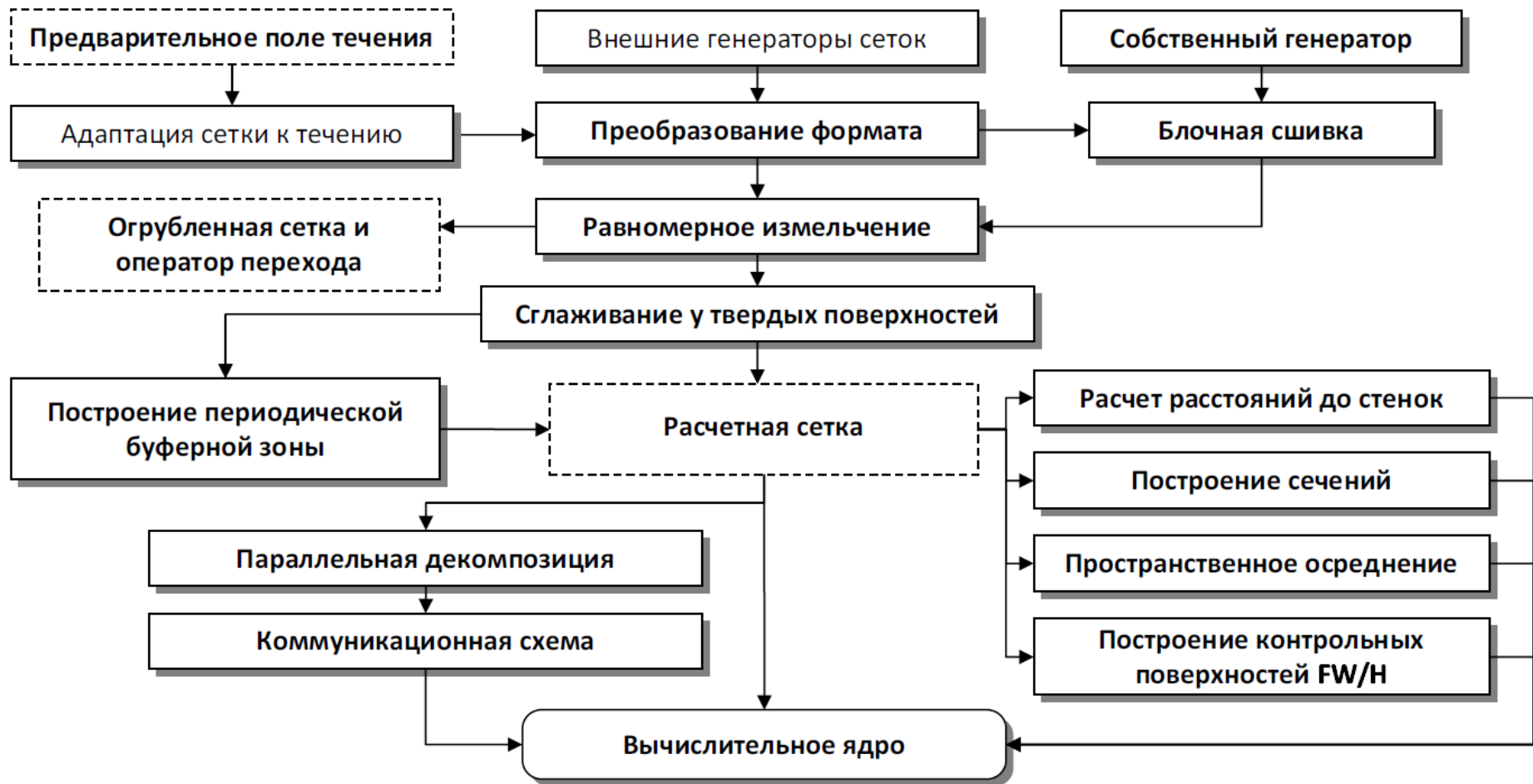
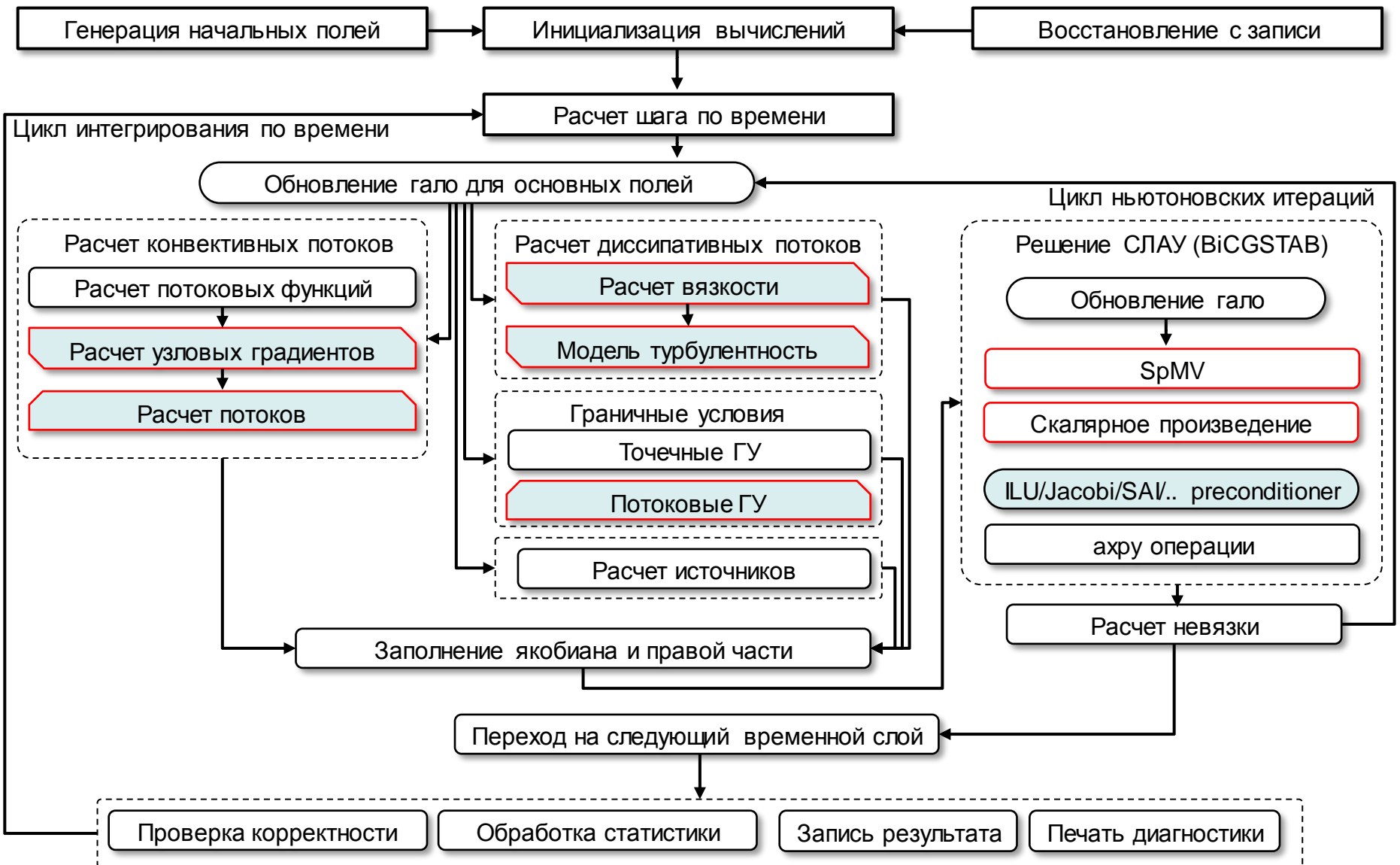


Схема работы вычислительного ядра



Обозначения:

Обмен данными

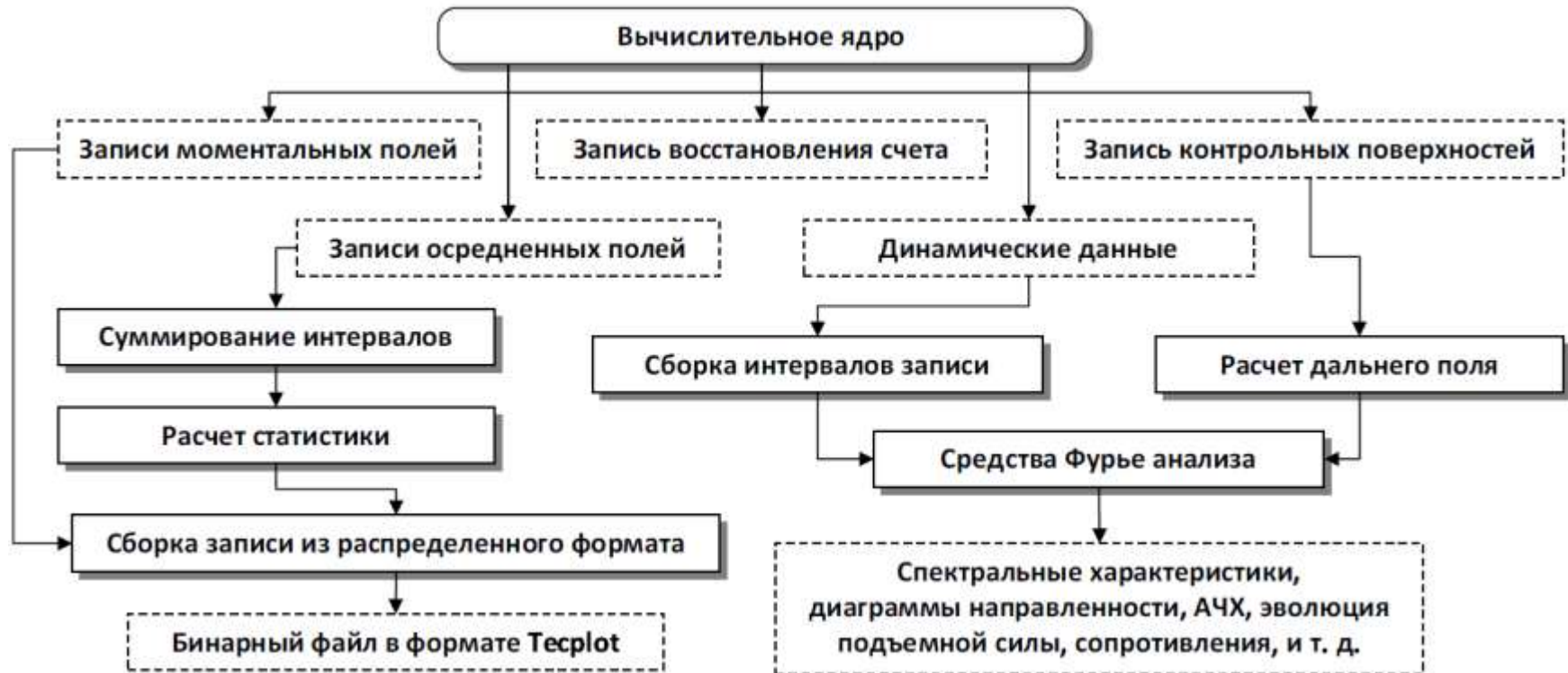
Операции по набору:

узлов

граней

многогранников

Схема работы средств обработки результатов



• Средства визуализации

- На всей сетке и неогрубленных подобластях
- На огрубленных сетках (с операторами перехода)
- На заданных поверхностях и сечениях

• Конвертеры сеточных форматов

• Платформонезависимая подсистема ввода-вывода

• Обработка и распределенное хранение результатов

- Динамические данные в контрольных точках
- Динамические данные на контрольных поверхностях
- Динамические контрольные параметры
- Статистика первого порядка – осредненные поля течения
- Статистика второго порядка – тензор рейнольсовых напряжений, и т.д.
- Моментальные поля течения

Параллельные технологии

- **Двухуровневое распараллеливание MPI+OpenMP**
для систем с числом ядер порядка 100000.
- **Существенно-многопоточное распараллеливание с общей памятью (на сотни нитей).**
- **Полная адаптация к потоковой обработке**
совместимость с массивно-параллельными ускорителями.
- **Векторизация**
(директивными средствами компилятора Intel).
- **Гетерогенные вычисления**
Использование ускорителей Intel Xeon Phi в симметричном режиме
- **Параллельная инфраструктура препроцессора**
распределенная обработка сеточных данных сверхбольшого объема.
- **Параллельная инфраструктура постпроцессора**
распределенная обработка результатов расчета сверхбольшого объема.



Параллельная генерация больших сеток

С. А. Суков - методика и программные средства

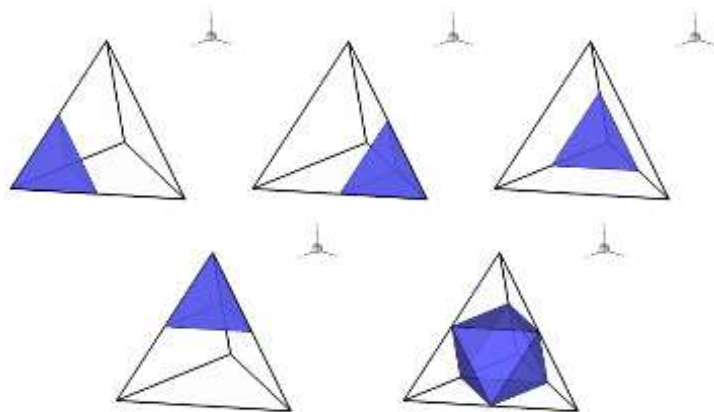
1. Последовательный генератор

Gambit, Icem CFD, ...

2. Параллельное измельчение

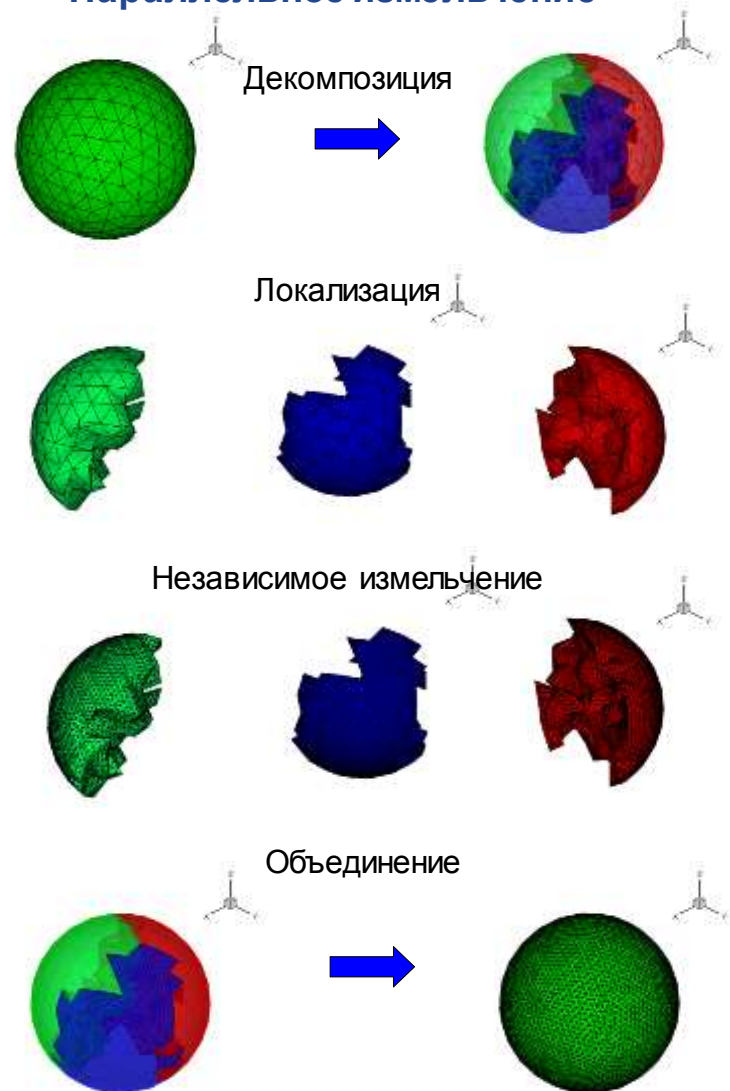
3. Сглаживание поверхностей

4. Операторы перехода



Измельчение тетраэдра

Параллельное измельчение



Параллельная декомпозиция больших сеток

Библиотека **GridSpiderPar** - Головченко Е. Н., Якобовский М. В.

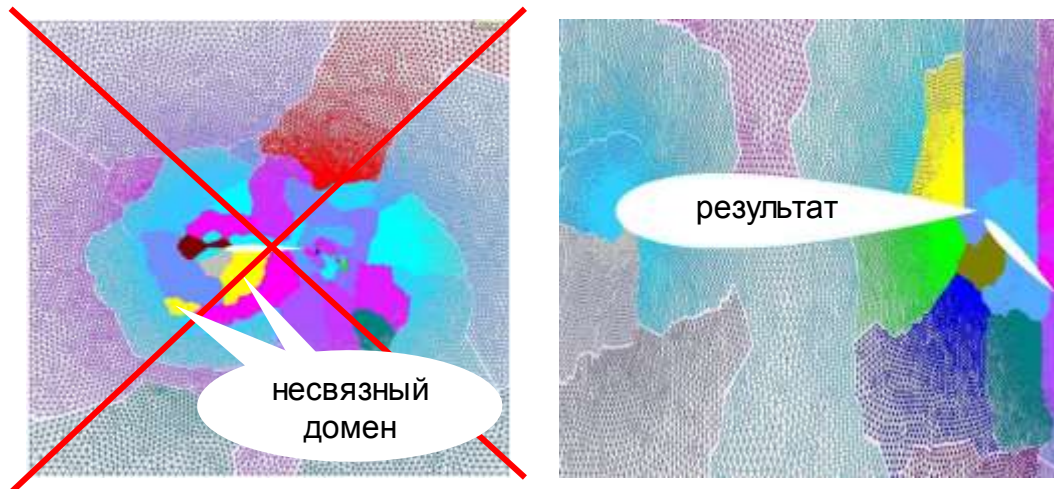
• Параллельный алгоритм геометрической декомпозиции сеток



Достоинства

- секущая плоскость (медиана) разрезается по нескольким координатам
- разница числа вершин в доменах не превышает единицу

• Параллельный инкрементный алгоритм декомпозиции графов



Достоинства

- ориентирован на формирование связанных доменов
- сбалансированность разбиений лучше, чем разбиений, получаемых другими методами декомпозиции графов (5% (60%) → 0.05%)

Тестирование распараллеливания на суперкомпьютерах

Тест на исчерпание параллелизма, суперкомпьютер Ломоносов (явная схема повышенного порядка)

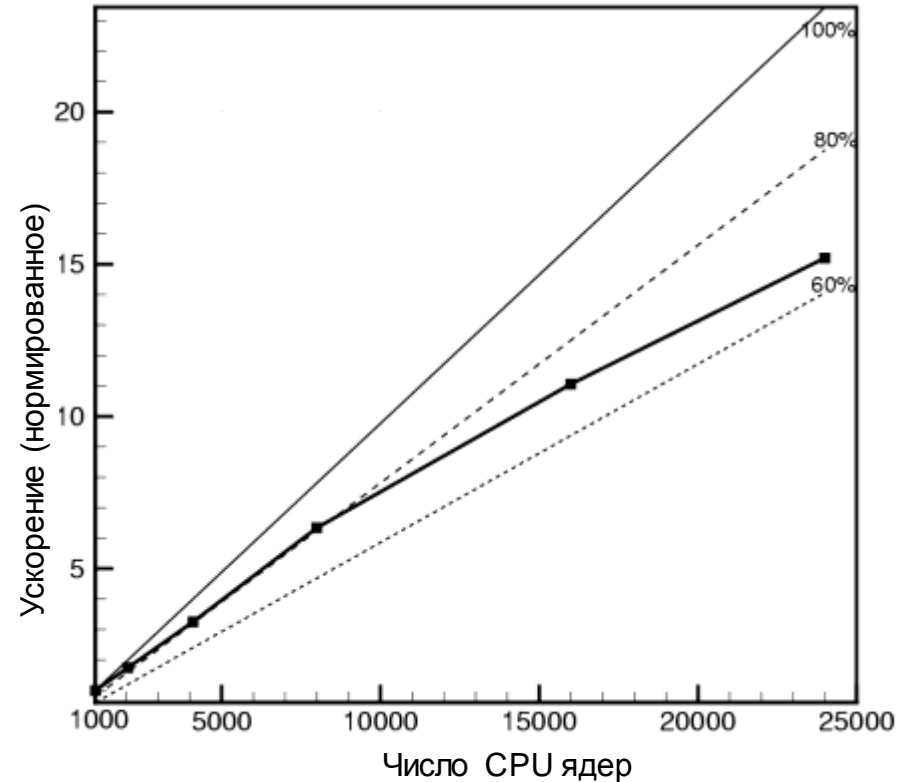
Схема с центрами в узлах

Сетка 16 миллионов узлов

Характерное время вычислений:

на 24000 ядрах ускорение ~16 из 24
относительно 1024 ядер

Минимальная нагрузка порядка 500 узлов на ядро



- **Параметры задачи**

Число Маха: $M=0.206$

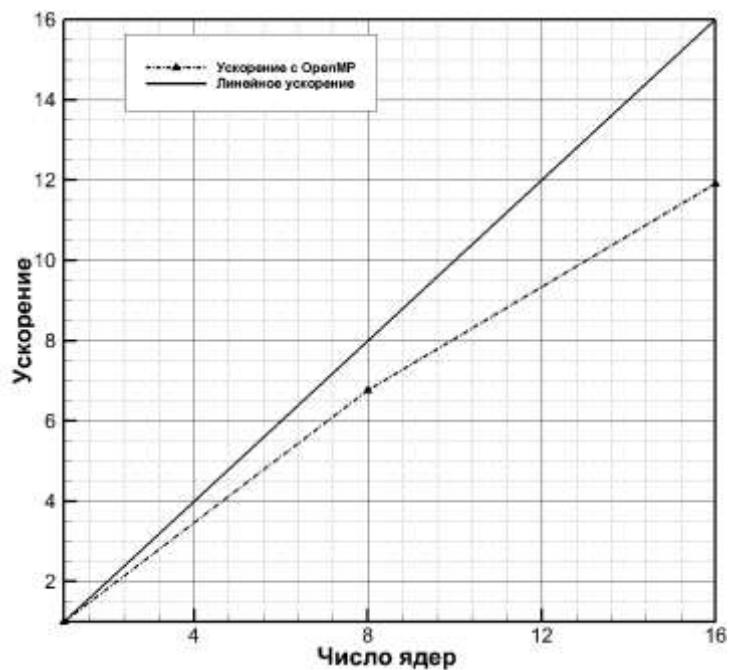
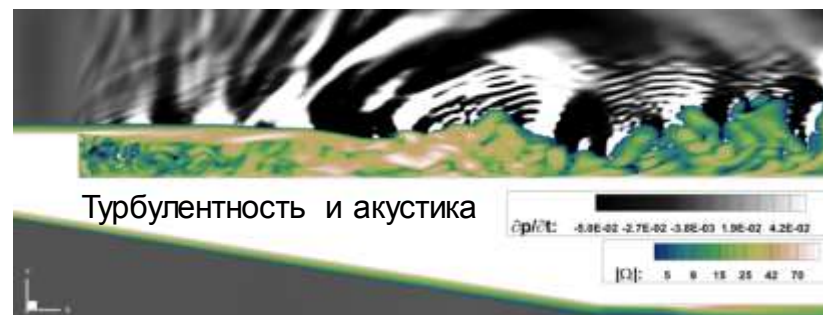
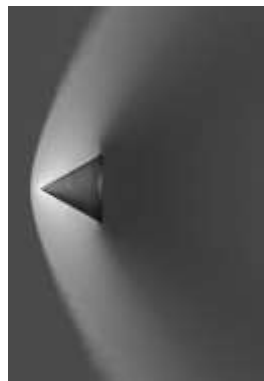
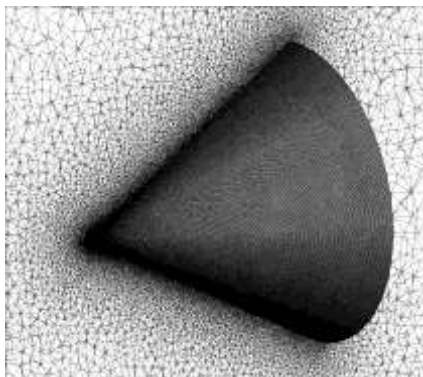
Число Рейнольдса: $Re = 14000$

Размер сетки: до 16 млн. узлов

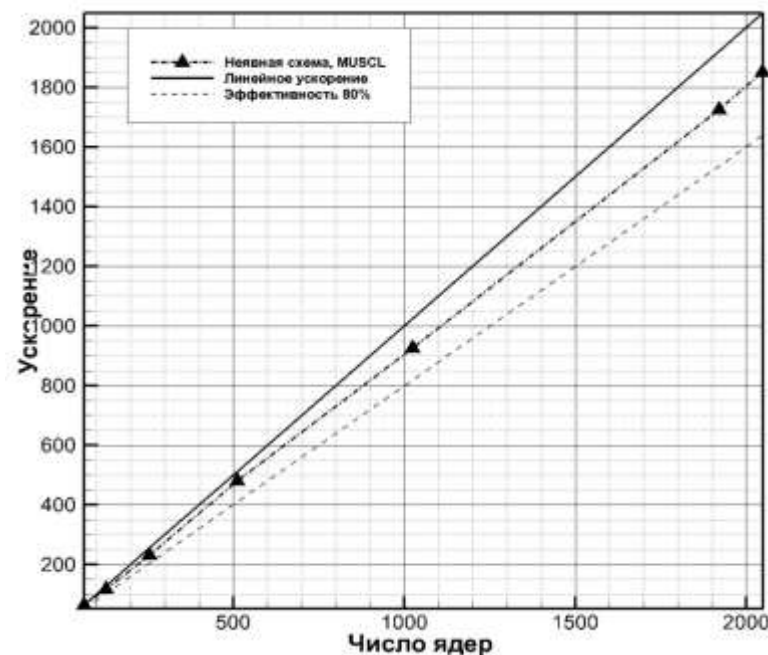
Количество контрольных точек: 1400

Тестирование распараллеливания на суперкомпьютерах

Тесты на суперкомпьютере МВС-10П



Ускорение OpenMP,
Сетка 1.3М узлов, 7.6М тетраэдров



Ускорение в рабочем режиме "всё включено"
на реальной задаче, сетка 13М узлов

Направления дальнейшей разработки

Локальный шаг по времени

Многосеточные ускорители сходимости

Улучшение решателя СЛАУ

Оптимизация неявного интегрирования по времени

Неявная безматричная схема с фиктивным временем

Подвижные сетки, аэроупругость

Скользящие сетки

Совершенствование неотражающих граничных условий

Гетерогенщина: MPI + OpenMP + OpenCL

Документация

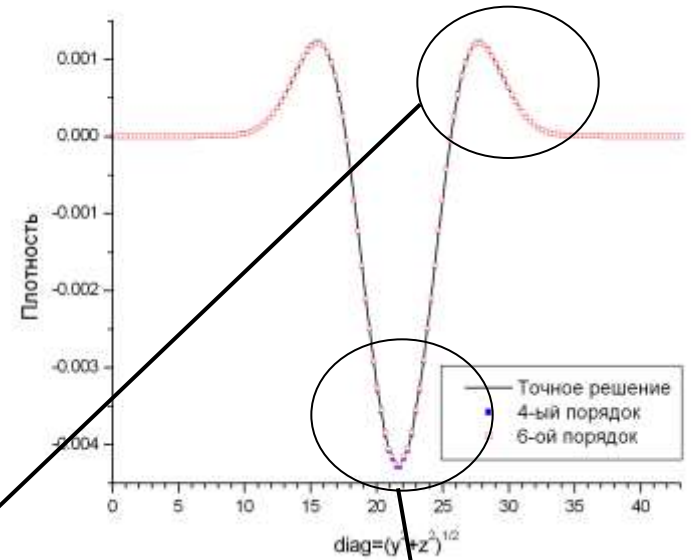
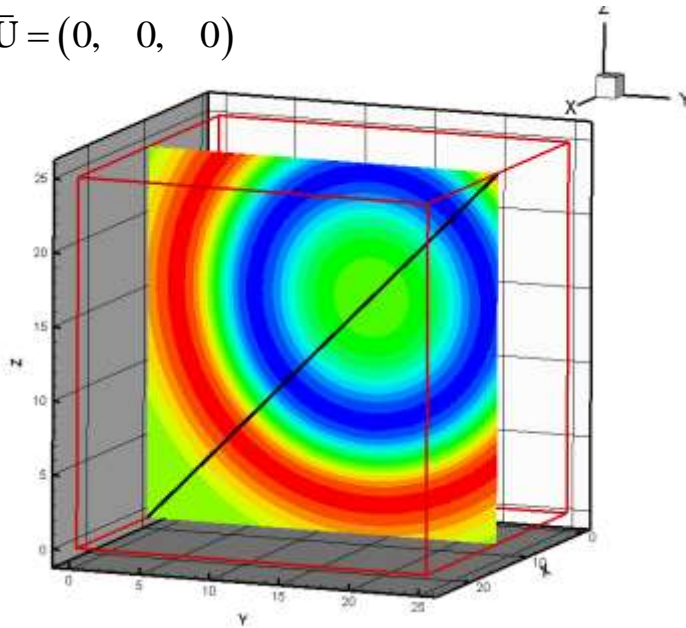
...



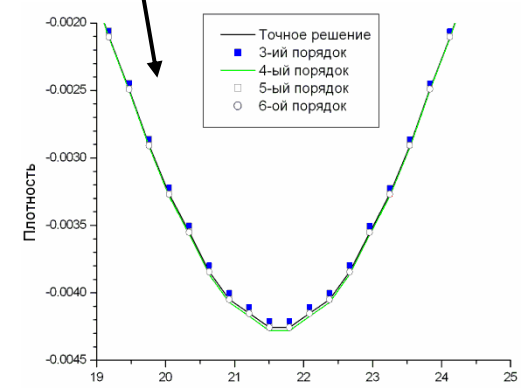
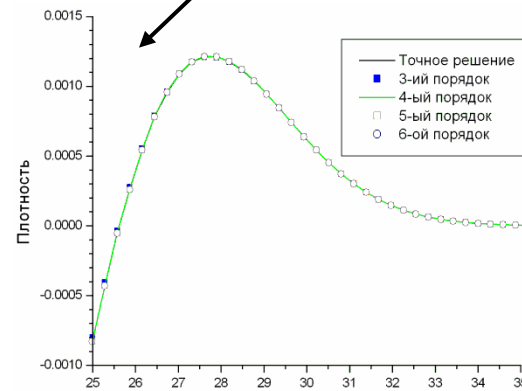
Верификация (3D-LEE)

Распространение 3D Гауссовского импульса

$$\bar{\mathbf{U}} = (0, 0, 0)$$

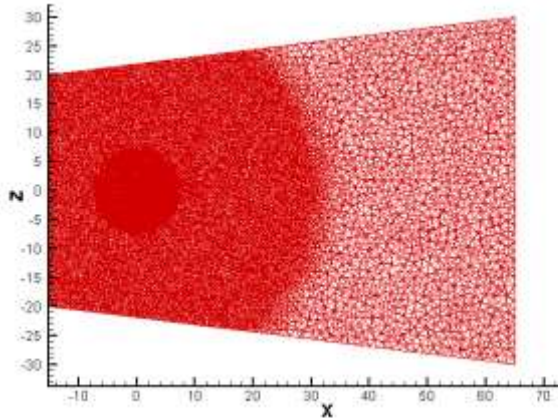


Теоретический порядок Параметры схемы	Порядок сходимости (в норме C)	Порядок сходимости (в норме L ₁)	Порядок сходимости (в норме L ₂)
3 $\beta = 1/3, \delta = 1$ $\xi^c = 0, \xi^d = 0$	2.61	2.77	2.68
4 $\beta = 1/3, \delta = 1$ $\xi^c = -1/6, \xi^d = 0$	3.35	3.18	3.23
5 $\beta = 1/3, \delta = 1$ $\xi^c = -1/30, \xi^d = -2/15$	3.32	3.68	3.54
6 $\beta = 1/3, \delta = 0$ $\xi^c = -1/30, \xi^d = -2/15$	5.15	3.60	4.12

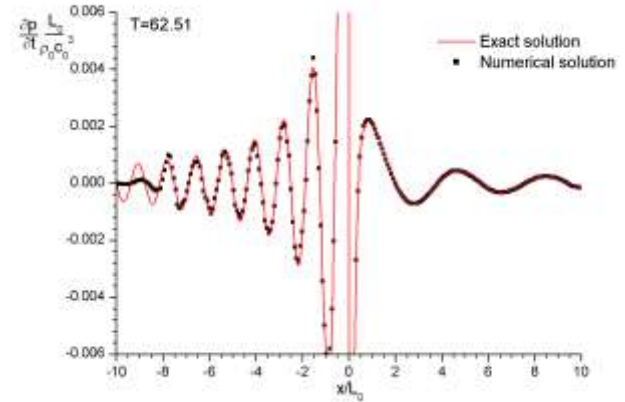
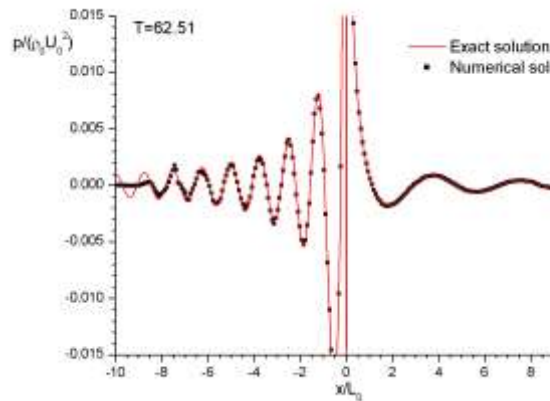


Верификация (3D-EE + FF)

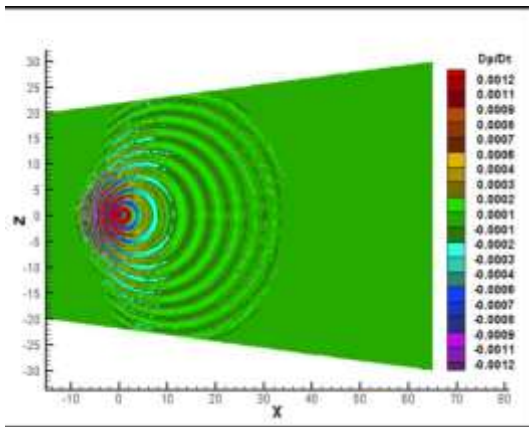
Монопольный источник в дозвуковом потоке ($M = 0.5$)



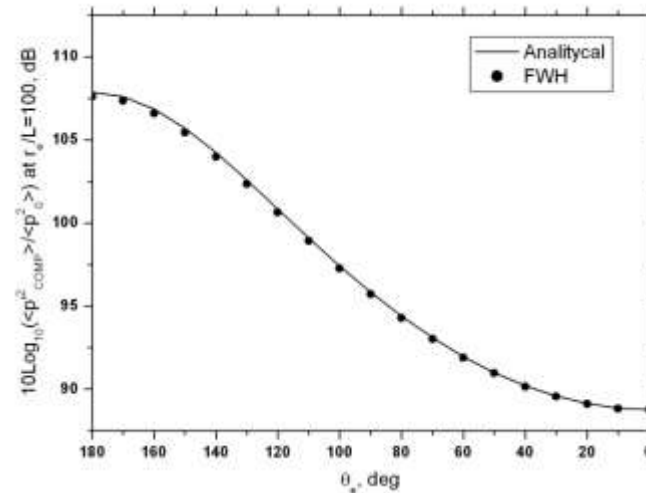
Расчетная сетка $N_p = 1\,388\,000$ $N_e = 8\,248\,000$



Распределение пульсаций давления (слева) и их производной по времени (справа)



Мгновенное поле производной по времени от пульсаций давления

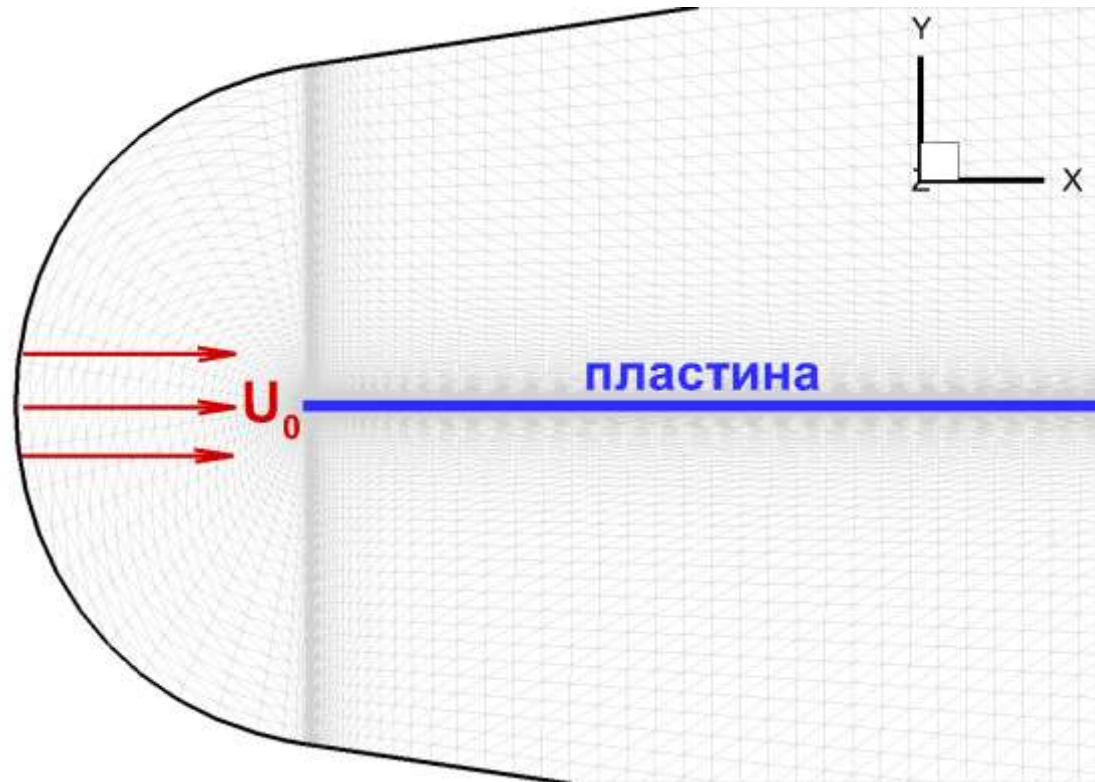


Угловое распределение интенсивности излучения в дальнем поле $R_e = 100$

Задача А1: Расчет характеристик турбулентного пограничного слоя на пластине

Исходные данные

- Число Маха $M = 0.1$
- Число Рейнольдса $Re = 2299790$ (на единицу длины)
- Параметры численного метода:
 - Схема повышенного порядка
 - Неявный метод интегрирования по времени, линеаризация по Ньютону, 2-й порядок, $CFL = 200$
 - Модель турбулентности RANS SA



Расчетная сетка: трехмерная, тетраэдральная, неструктурированная, 206646 узлов, 1020000 тетраэдров, 144800 граничных граней.

Задача A1: Расчет характеристик турбулентного пограничного слоя на пластине

• Автомодельные переменные:

u продольная скорость;

μ молекулярная динамическая вязкость;

$$u_f = \sqrt{\frac{\mu_M}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y}}_{\text{стенка}} \quad \text{динамическая скорость;}$$

$$y^+ = \frac{yu_f \rho}{\mu} \quad \text{безразмерное расстояние от стенки;}$$

$$u^+ = \frac{u}{u_f} \quad \text{безразмерная скорость.}$$

• Закон Рейхардта:

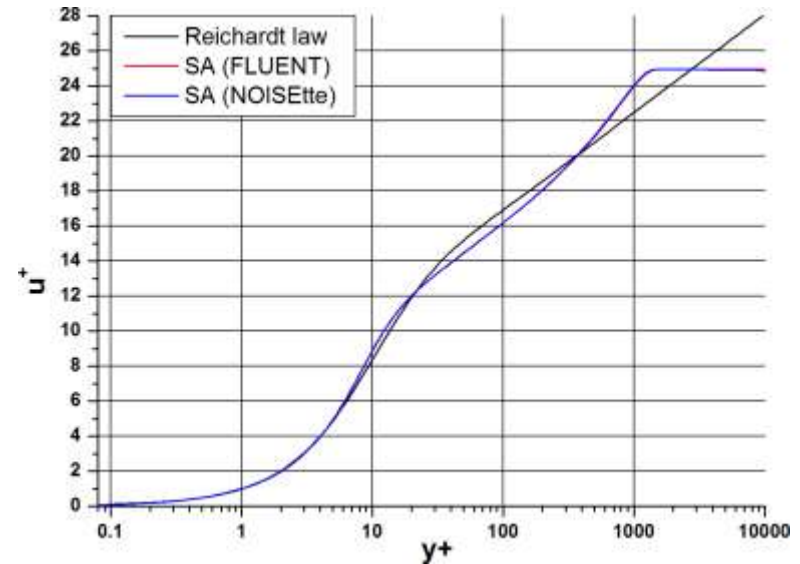
Логарифмический закон, модифицированный Рейхардтом для переходной зоны от молекулярного подслоя к развитому турбулентному [Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория. — М.: Физматгиз, 1963., с.547].

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + \kappa y^+) + 7.8 \left(1 - e^{-\frac{y^+}{11}} - \frac{y^+}{11} e^{-\frac{y^+}{3}} \right) \quad \kappa = 0.41$$

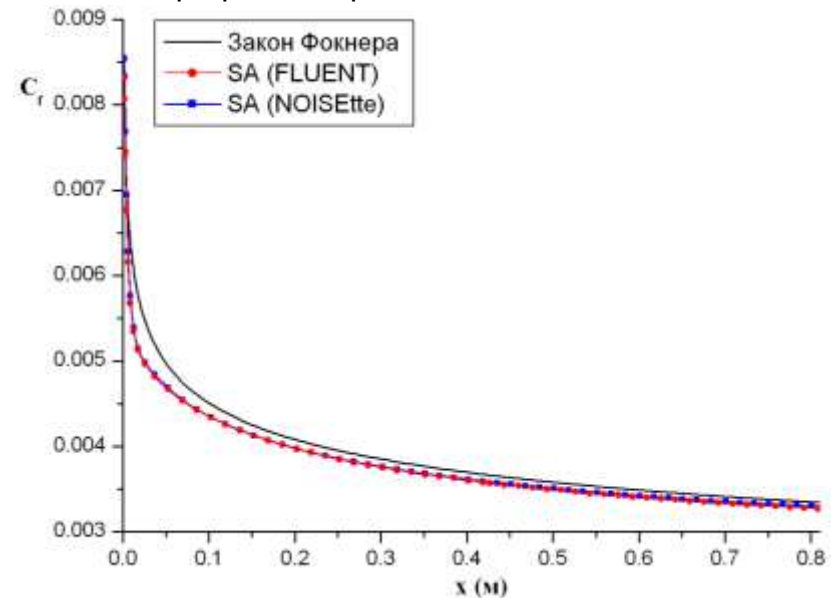
• Сравнение коэффициента трения

сравнение коэффициента трения с законом Фокнера [Лойцянский Л.Г. МЖГ — М.: Дрофа, 7-ое изд., 2003., с.667]:

$$c_f = 0.0263 x^{-\frac{1}{7}} \text{Re}^{-\frac{1}{7}}$$



Профили скорости в сечении $x = 0.8$

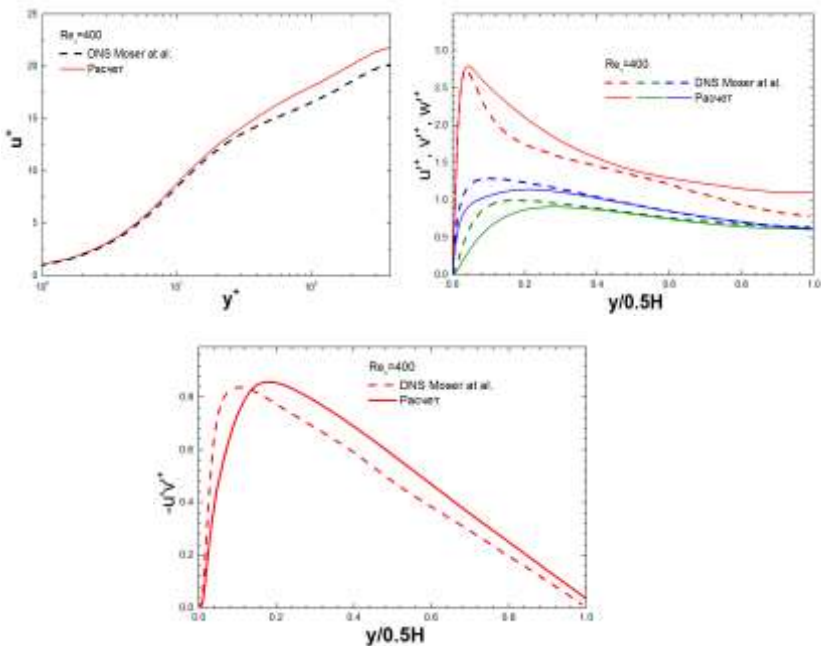
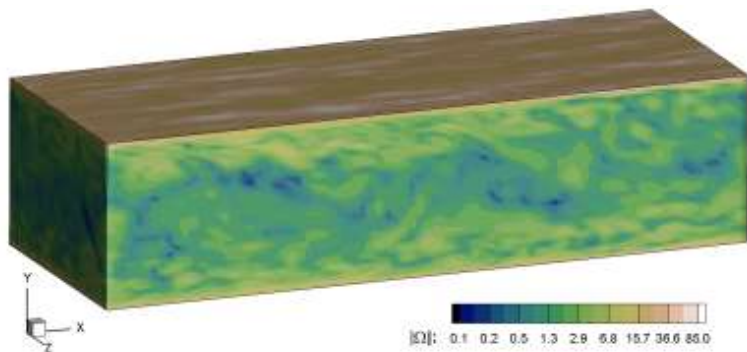


Коэффициент трения на стенке

Задачи по верификации моделей турбулентности

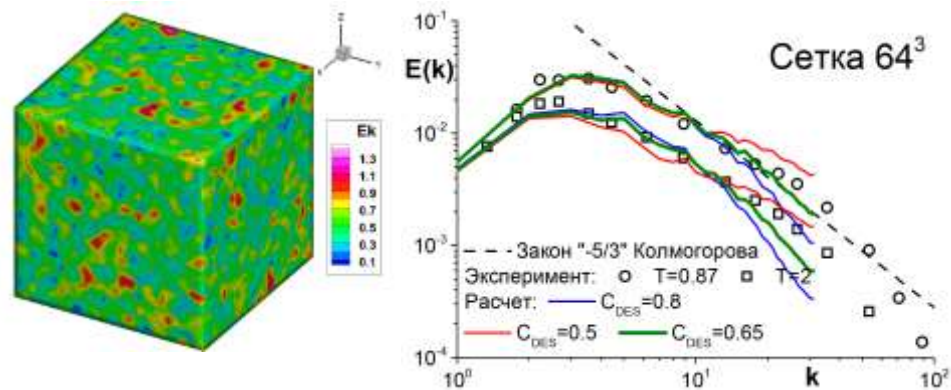
Установившееся течение в плоском канале

Сетка 436595 узлов, 2188800 тетраэдров
 $Re_{\tau}=400$ ($Re_{bulk}=14000$)



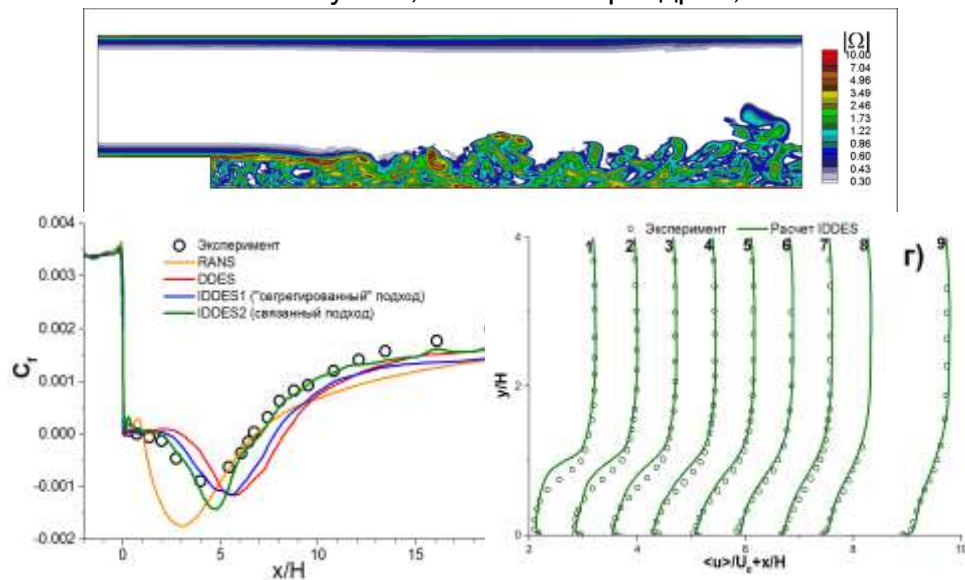
Затухание однородной изотропной турбулентности

сетки 32^3 , 64^3 , $Re=1620$



Течение в канале с обратным уступом

Сетка 1311690 узлов, 7597800 тетраэдров, $Re=28000$.



Задачи по верификации WENO-EBR

Задача о взрывной волне

Постановка

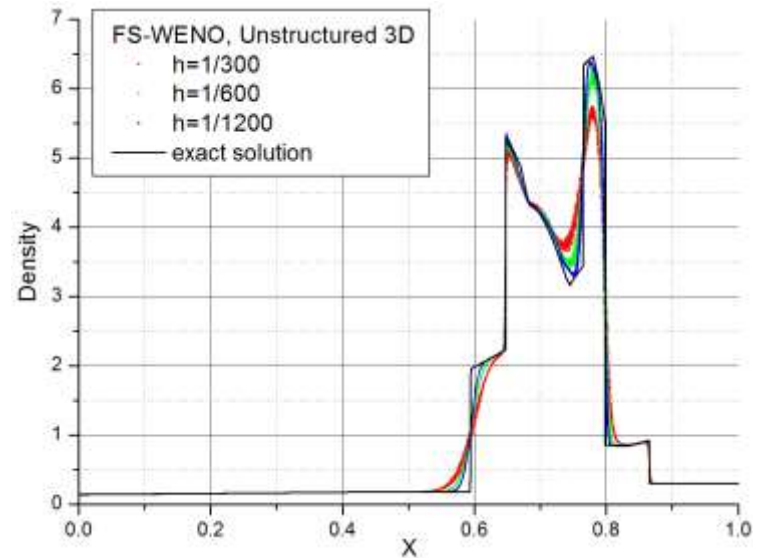
- Уравнения Эйлера ($\gamma = 7/5$)
- Начальные условия

$$\rho = 1, \quad u = 0, \quad p = \begin{cases} 1000, & x < 0.1 \\ 0.01, & 0.1 < x < 0.9 \\ 100, & x > 0.9 \end{cases}$$

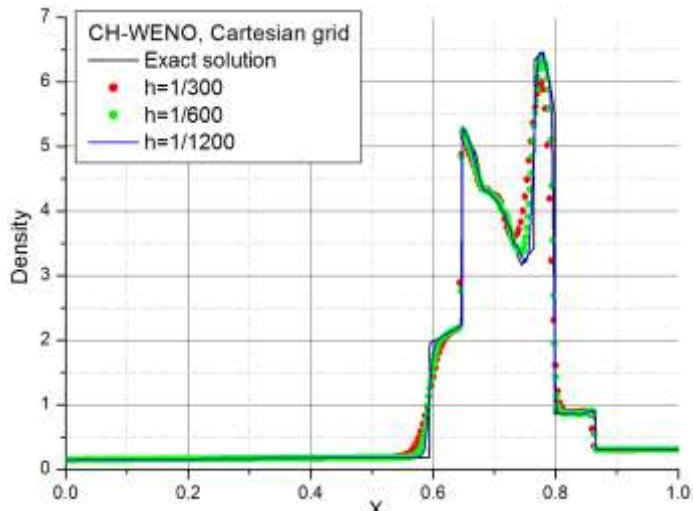
- Отражающие ГУ для $x=0$ и $x=1$

Woodward P., Colella P., *J. Comput. Phys.*, 54(1), 1984

Тетраэдральная неструктурированная сетка

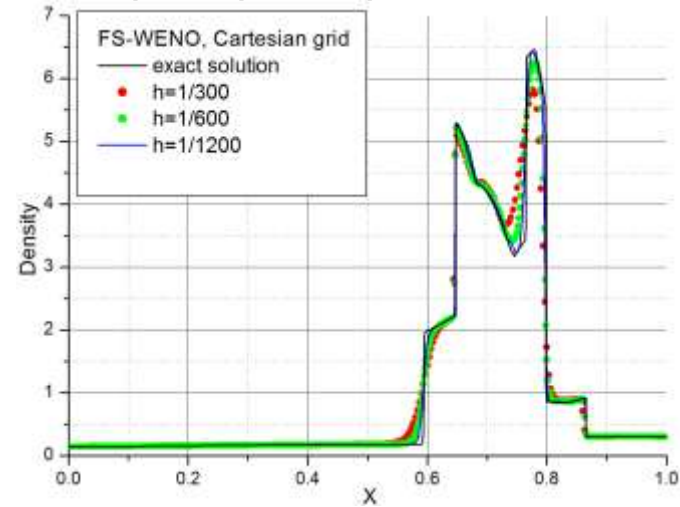


Декартова равномерная сетка



CH-WENO-EBR схема

Декартова равномерная сетка

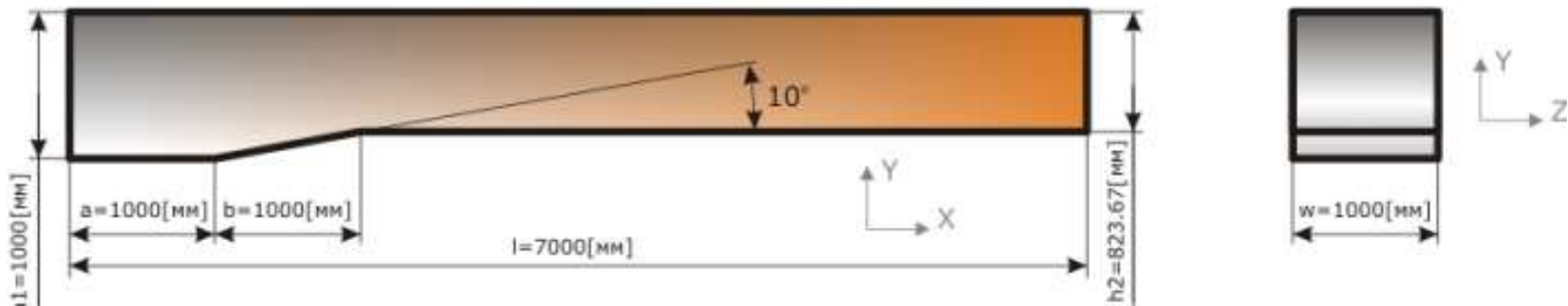


FS-WENO-EBR схема

Задача A2: Расчет характеристик течения газа в плоском канале с клином при $M=2$

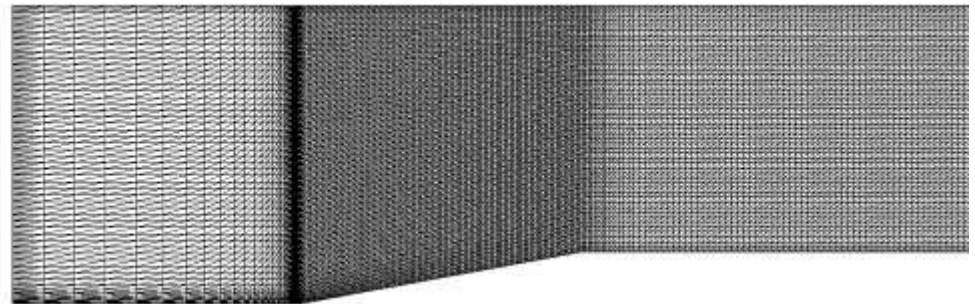
Исходные данные

Расчет аэродинамических характеристик течения невязкого сжимаемого газа в плоском канале с клином при $M=2$



Геометрия расчетной области

- Число Маха $M = 2.0$
- Параметры численного метода:
 - Схема повышенного порядка с центрами в узлах
 - Неявный метод интегрирования по времени, линеаризация по Ньютону, 2-й порядок точности, CFL = 10

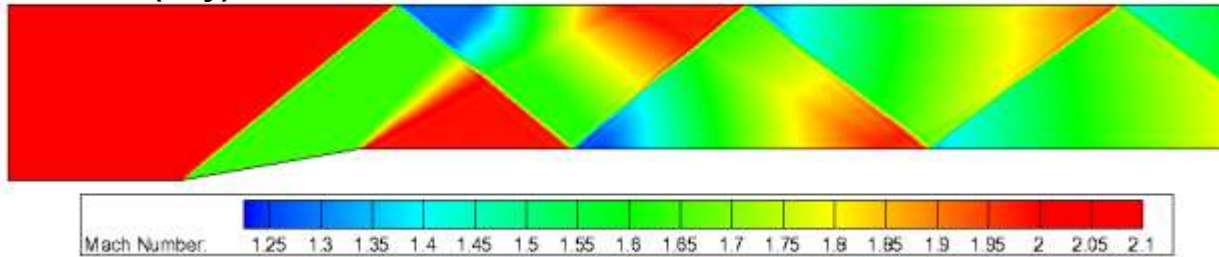


Расчетная сетка: тетраэдральная, неструктурированная, 116586 узлов, 570000 тетраэдров, 84600 граничных граней.

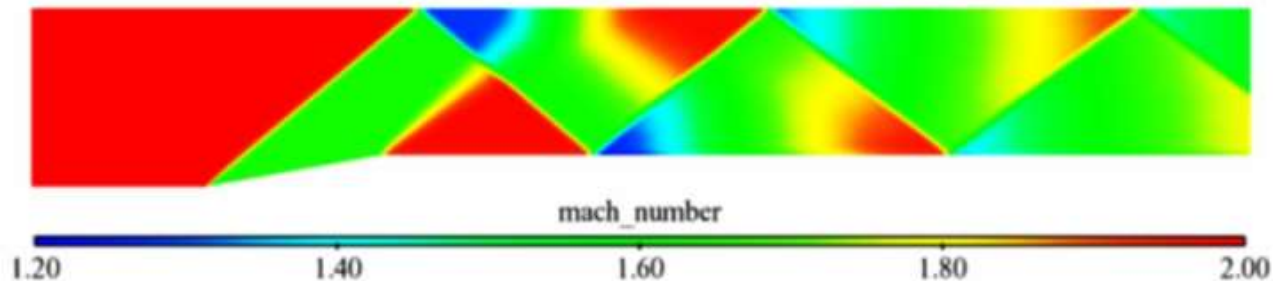
Задача A2: Расчет характеристик течения газа в плоском канале с клином при $M=2$

Сравнение полей числа Маха

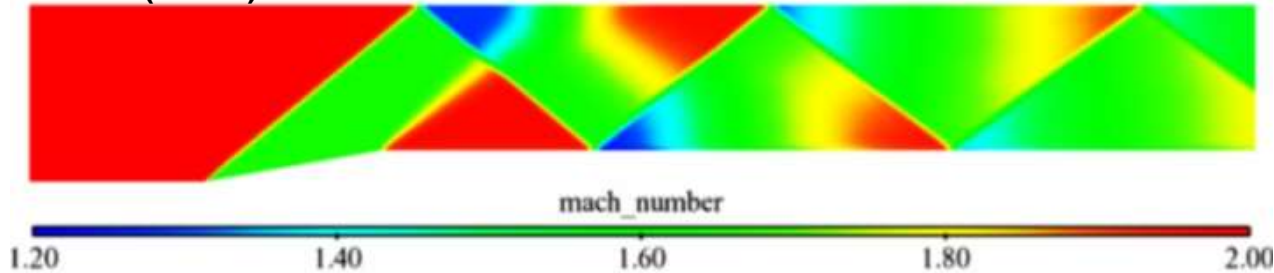
Noisette (Poy)



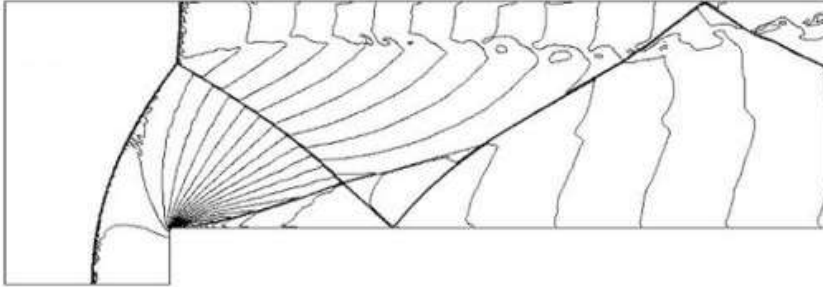
Fluent (Poy)



Fluent (AUSM)



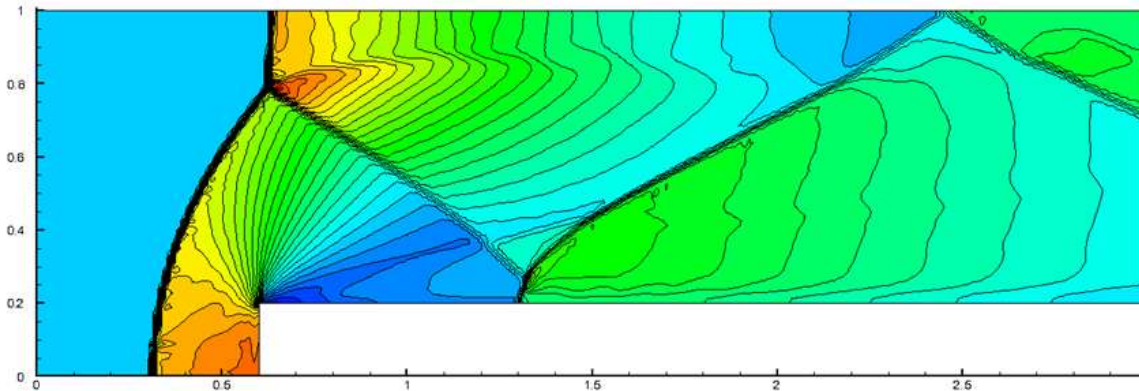
2D течение с числом Маха 3 в канале с уступом



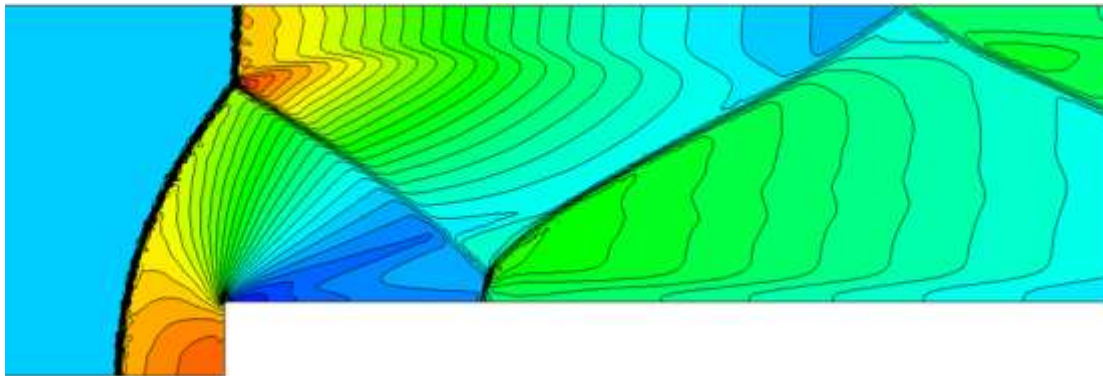
Постановка задачи

- Уравнения Эйлера ($\gamma = 7/5$)
- Начальные условия
 $\rho = 1.4$ $p = 1$ $u = 3$ $v = 0$
 $\gamma = 1.4$ $T_{max} = 4$

Woodward P., Colella P. The numerical simulation of two-dimensional fluid flow with strong shocks // Journal of Computational Physics. 1984. V.54, PP.115-173.



Двухмерная треугольная сетка, производная от структурированной декартовой сетки



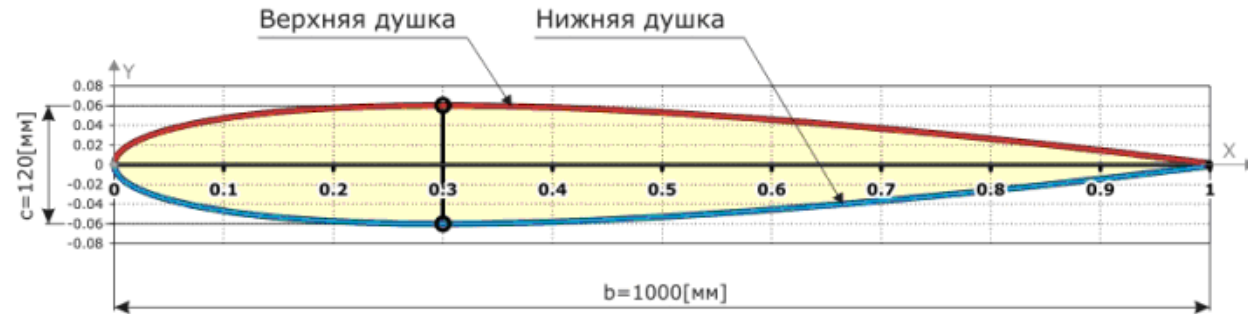
Трехмерная неструктурированная тетраэдральная сетка

Распределение плотности в центральном сечении

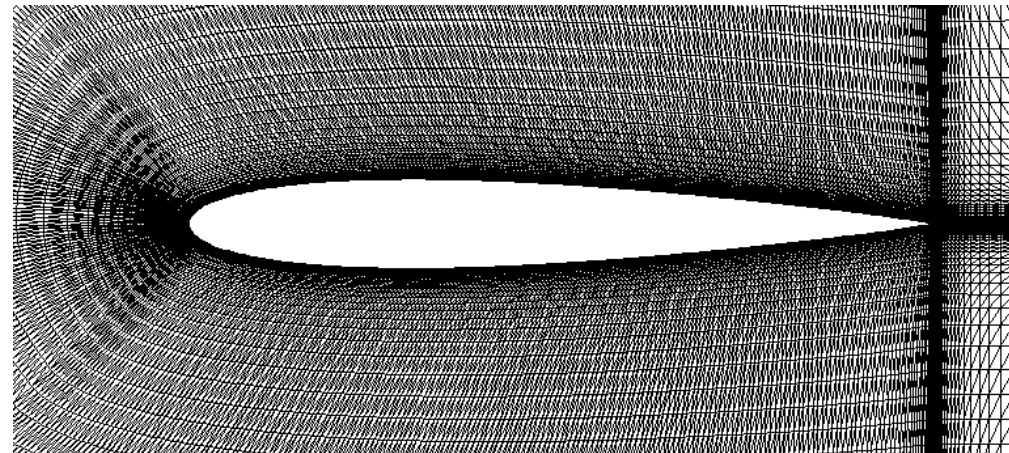
Задача А3: Расчет аэродинамических характеристик профиля NASA 0012

Исходные данные

- Число Маха $M = 0.7$
- Число Рейнольдса $Re = 16112112$
(по хорде профиля)
- Углы атаки: 0, 1.5, 3, 4, 4.8
- Параметры численного метода:
 - Схема повышенного порядка с центрами в узлах
 - Неявный метод интегрирования по времени, линеаризация по Ньютону, 2-й порядок точности, $CFL = 1000$
 - Модель турбулентности RANS SA

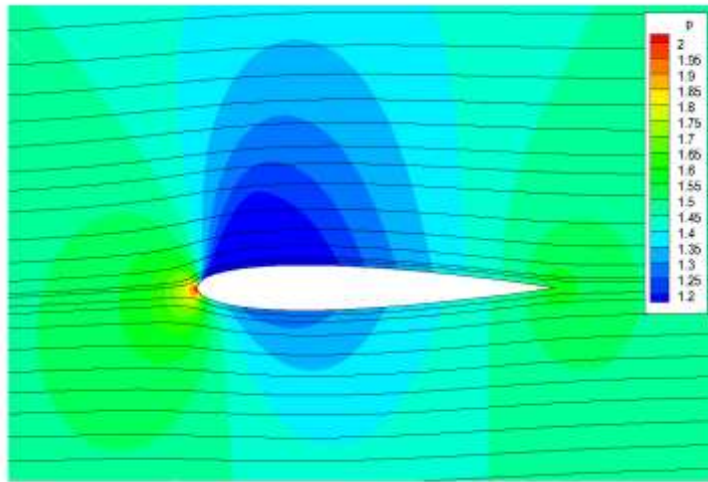
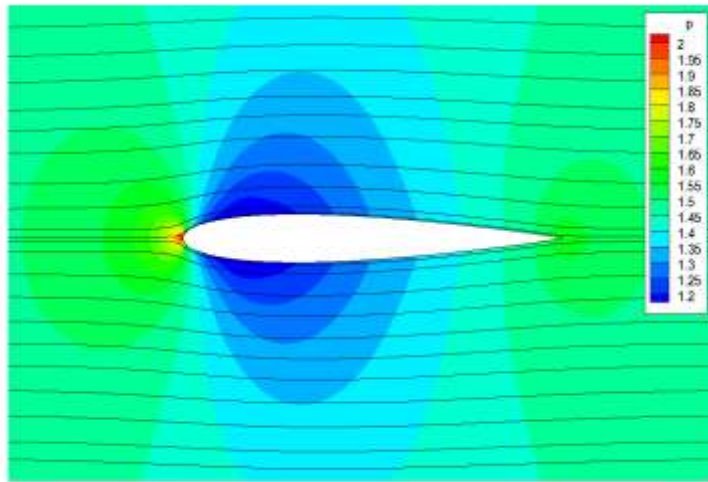


Геометрия расчетной области

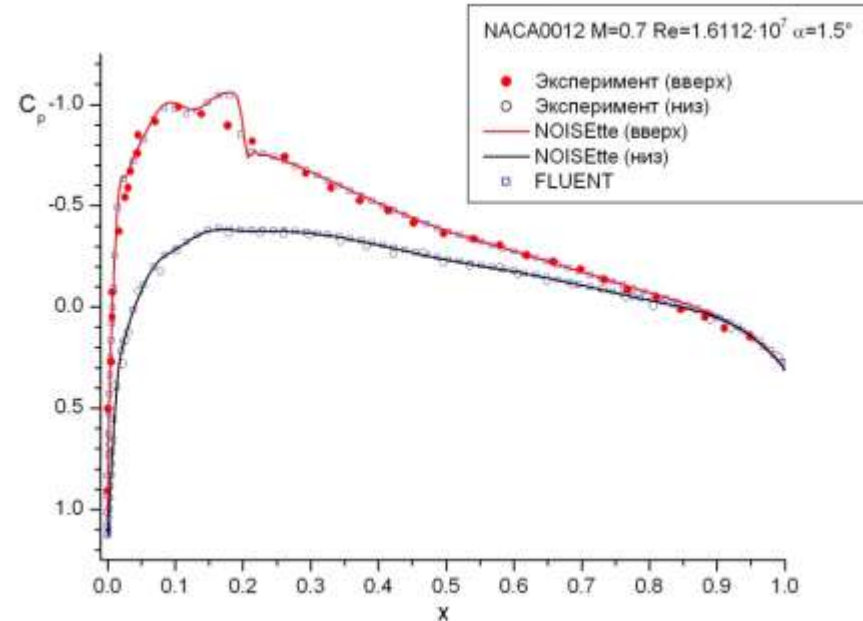


Расчетная сетка: двумерная, треугольная, неструктурированная, 53249 узлов, 105276 треугольников, 1222 граничных сегментов.

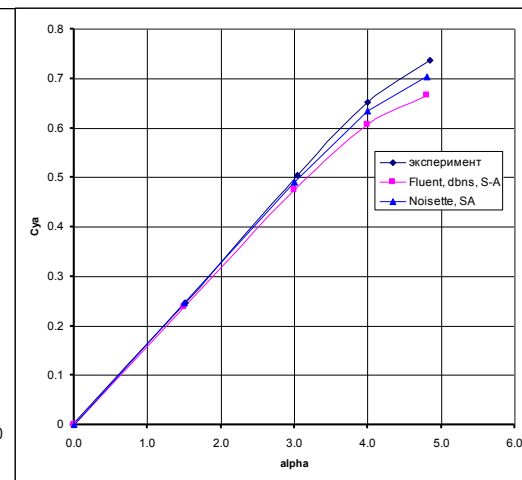
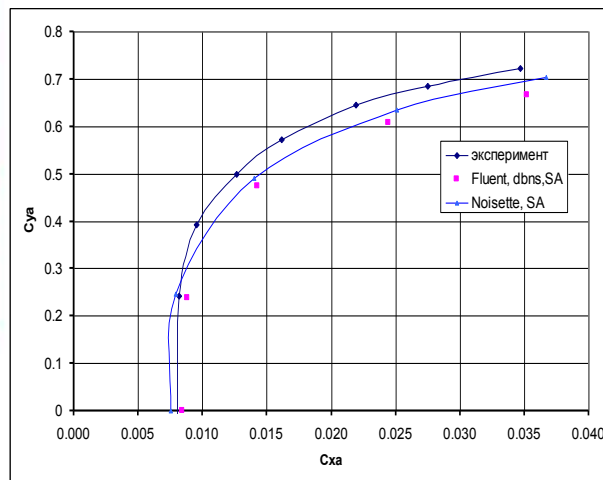
Задача А3: Расчет аэродинамических характеристик профиля NASA 0012



Поле давления (безразмерное) и линии тока для угла атаки 0 (сверху) и 1.5 (снизу)



Сравнение профилей давления на поверхности для угла атаки 1.5, $M=0.7$



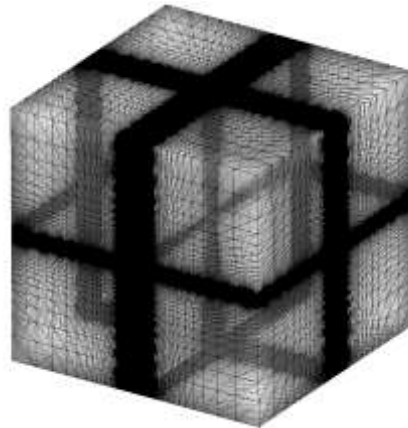
Задача A4: Расчет аэродинамических характеристик крыла ONERA M6

Исходные данные

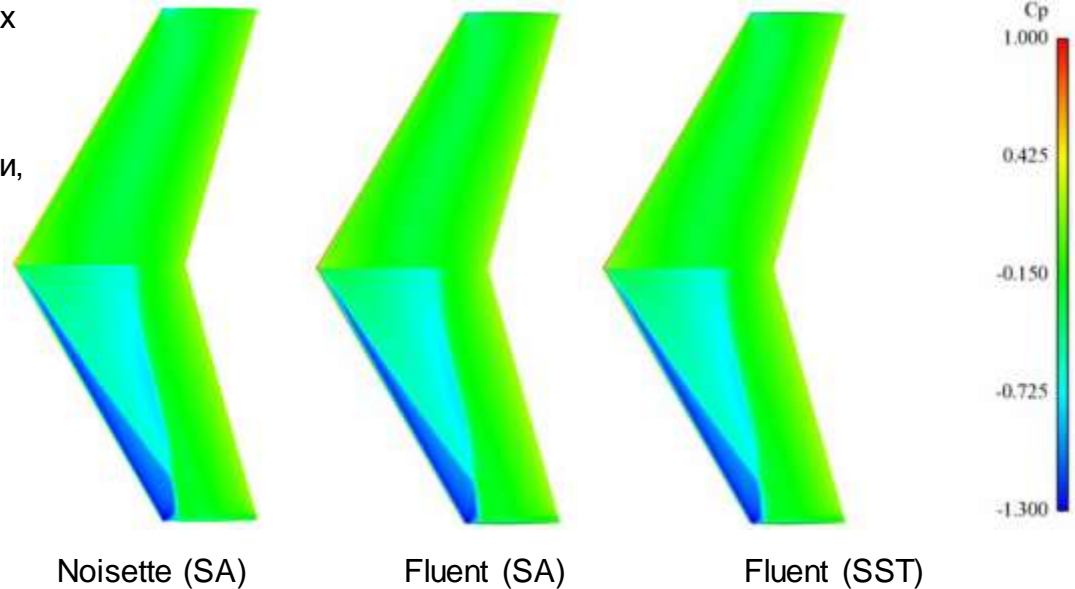
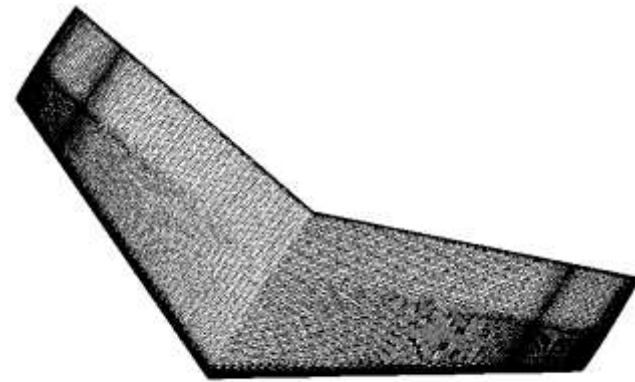
- Число Маха $M = 0.8395$
- Число Рейнольдса (по хорде профиля)
 $Re = 19024540$
- Углы атаки: 3.06°
- Параметры численного метода:
 - Схема повышенного порядка с центрами в узлах
 - MUSCL аппроксимация, лимитеры
 - Неявный метод интегрирования по времени, линеаризация по Ньютону, 2-й порядок точности, $CFL = 5000$
 - Модель турбулентности RANS SA

Расчетная сетка: трехмерная, тетраэдральная, неструктурированная, 1946085 узлов, 11393760 тетраэдров, 187392 граничных граней.

Общий вид расчетной области



Поверхностная сетка на крыле

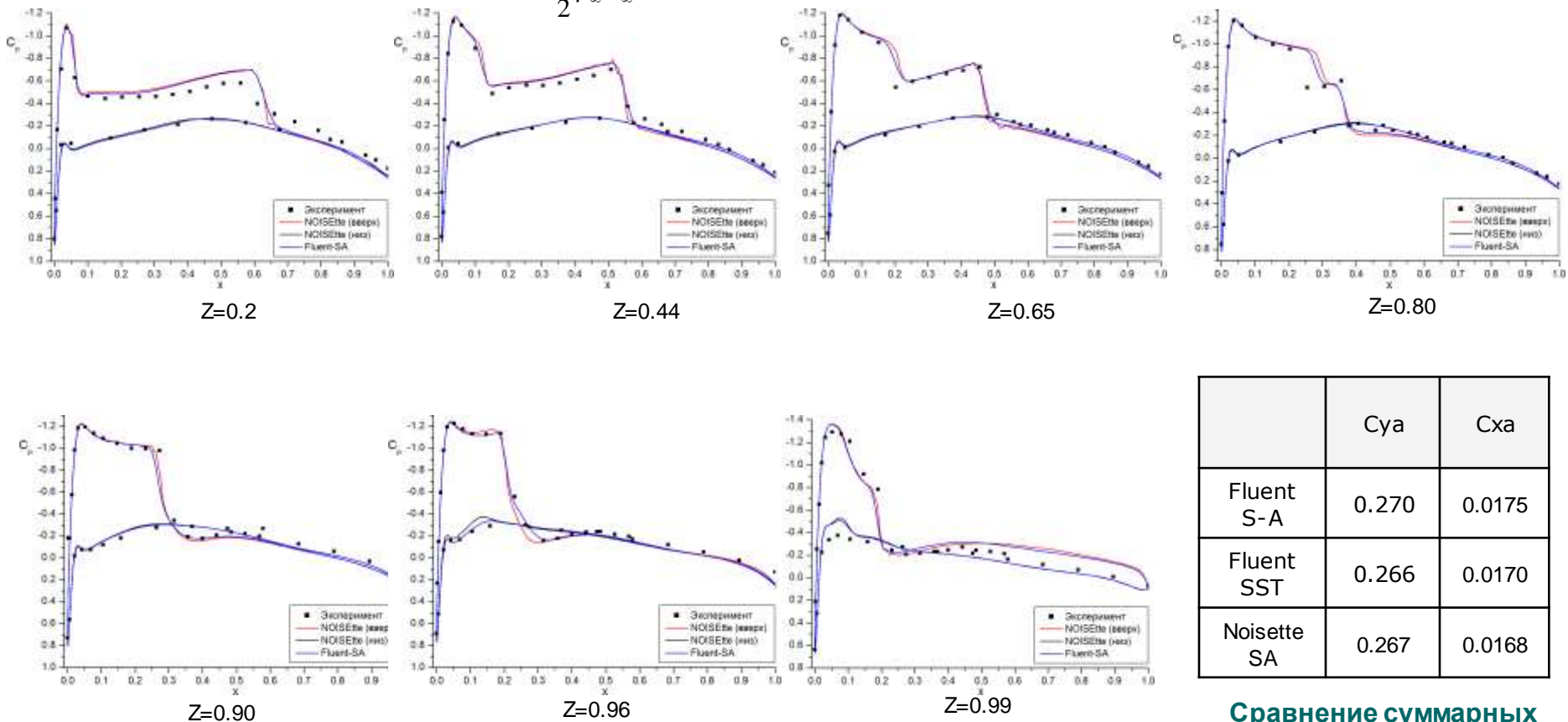


Сравнение коэффициента давления на верхней и нижней поверхностях крыла (соответственно левая и правая консоли).

Задача A4: Расчет аэродинамических характеристик крыла ONERA M6

Сравнение профилей коэффициента давления на поверхности

Распределение коэффициента давления $C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2}$



	Cya	Cxa
Fluent S-A	0.270	0.0175
Fluent SST	0.266	0.0170
Noisette SA	0.267	0.0168

Сравнение суммарных аэродинамических коэффициентов

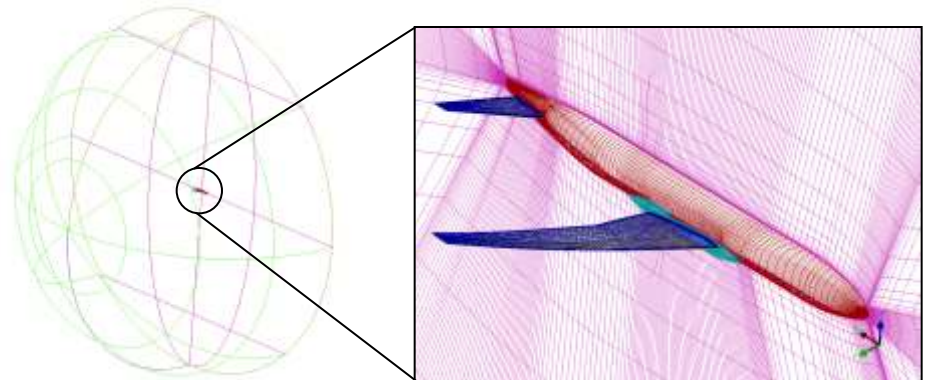
Задача A5: Расчет аэродинамических характеристик модели DPW4

Исходные данные

- Число Маха $M = 0.8395$
- Число Рейнольдса $Re = 197000$
(по хорде профиля, заданной в дюймах)
- Углы атаки: 0, 1, 2, 3, 4
- Параметры численного метода:
 - Схема повышенного порядка с центрами в узлах
 - MUSCL аппроксимация, лимитеры
 - Неявный метод интегрирования по времени, линеаризация по Ньютону, 2-й порядок точности
 - Модель турбулентности RANS SA



Поверхностная сетка



Общий вид расчетной области

http://aaac.larc.nasa.gov/tsab/cfdlarc/aiaa-dpw/Workshop4/test_cases_4.html

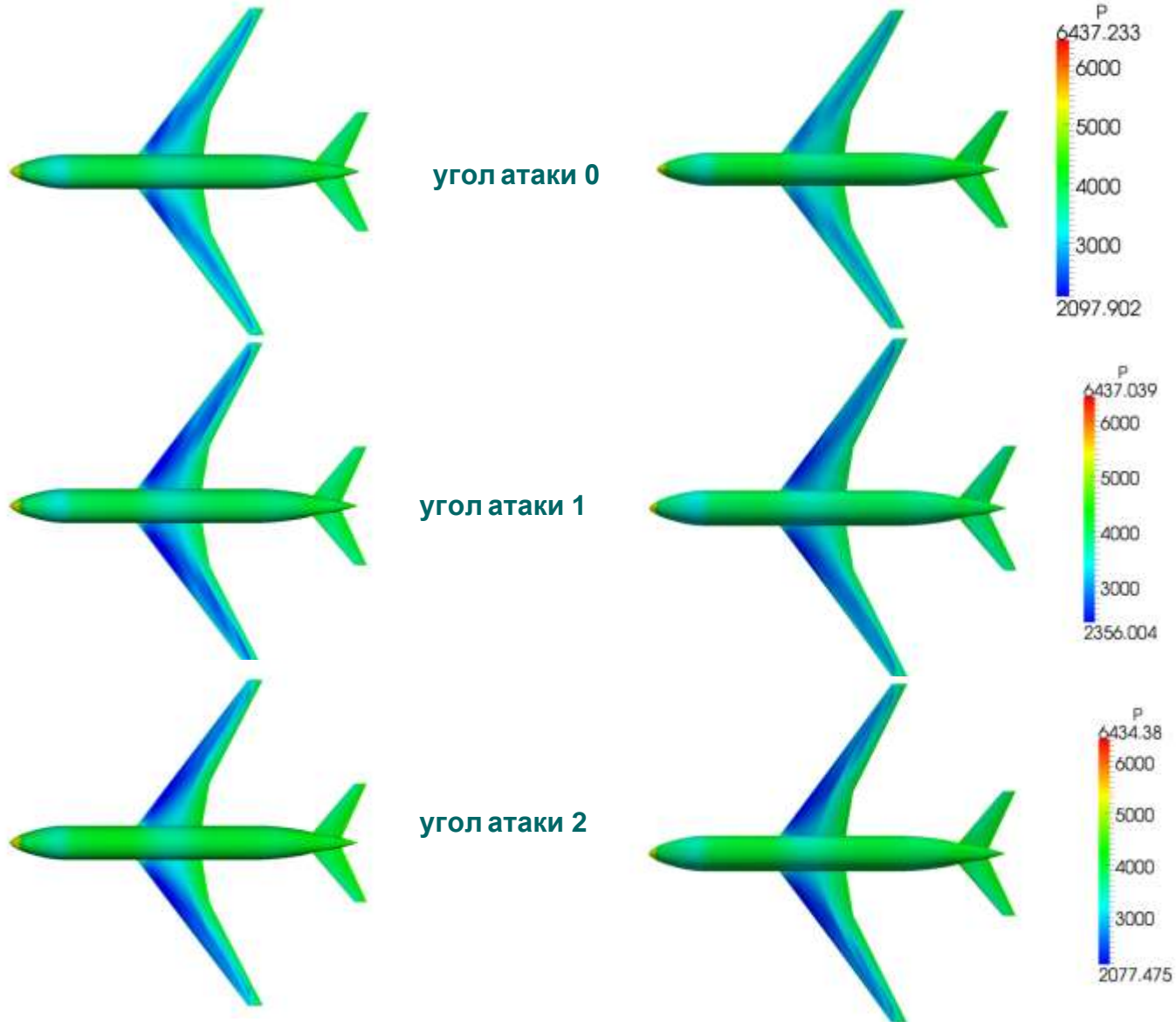
Расчетная сетка: трехмерная, тетраэдральная, неструктурированная, 10951602 узлов, 64761354 тетраэдров, 630324 граничных граней.

Задача A5: Расчет аэродинамических характеристик модели DPW4

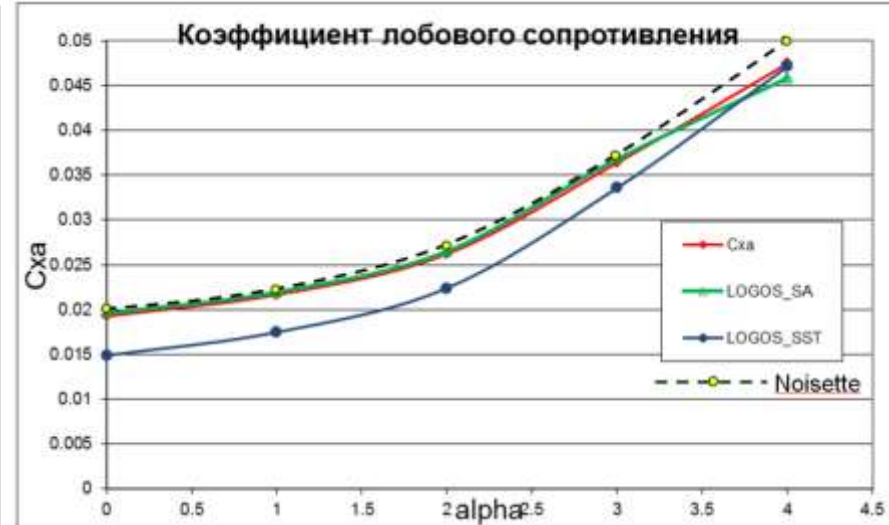
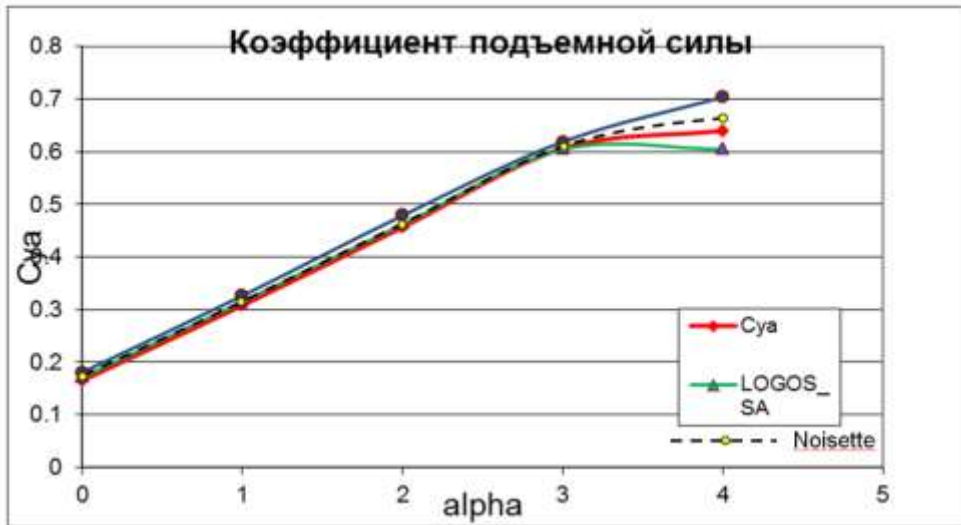
Сравнение распределения поверхностного давления

Noisette

LOGOS



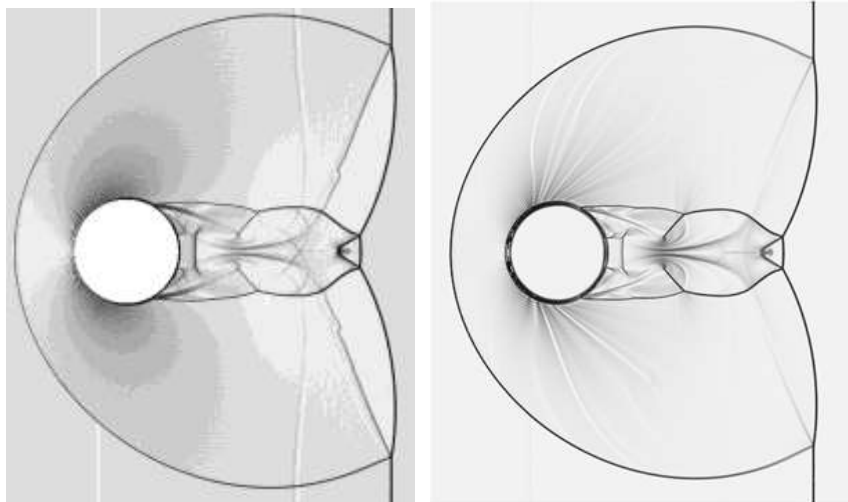
Задача A5: Расчет аэродинамических характеристик модели DPW4



	Cya	Cxa
AOA 0	0.171	0.0203
AOA 1	0.315	0.0227
AOA 2	0.461	0.0273
AOA 3	0.609	0.0375
AOA 4	0.662	0.051

Расчеты с IBC

Взаимодействие ударной волны и цилиндра



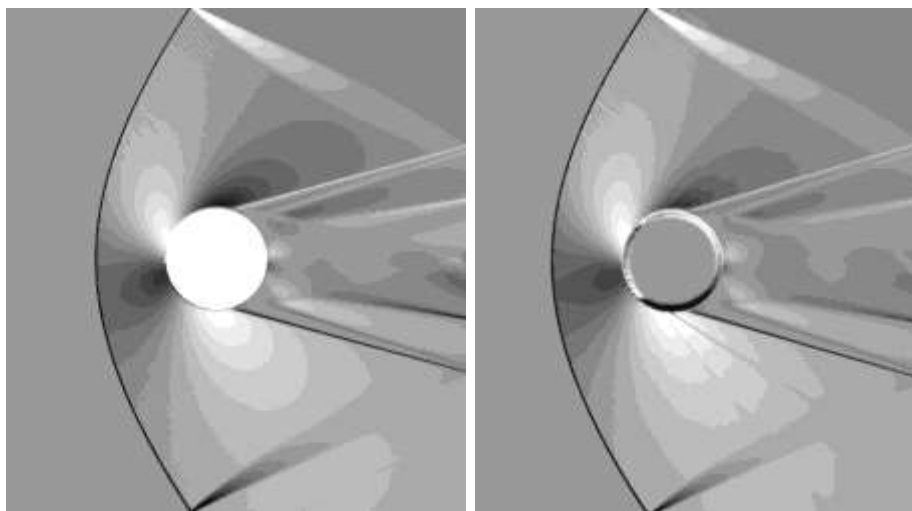
Body-fit

IBC

Моделирование течения вокруг подвижного препятствия, $M=0.5$



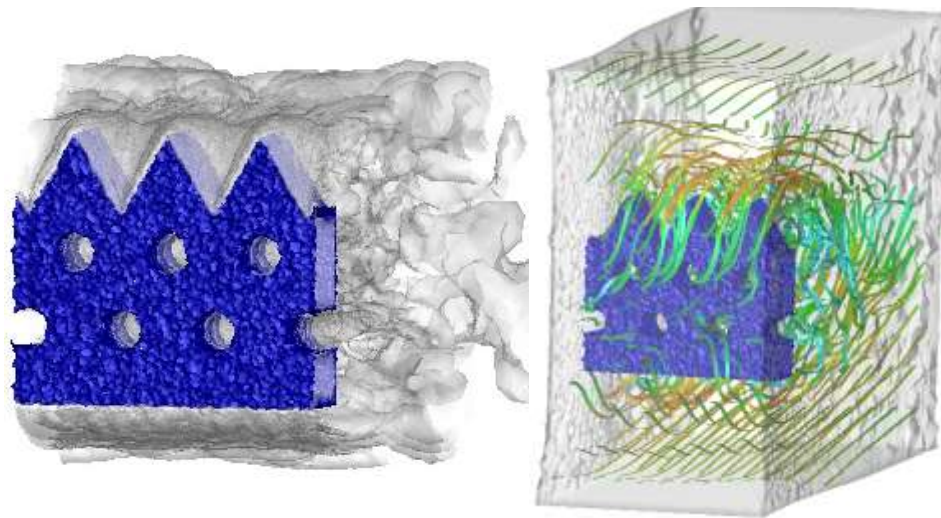
Сверхзвуковое обтекание цилиндра ($M_\infty = 2$)



Body-fit

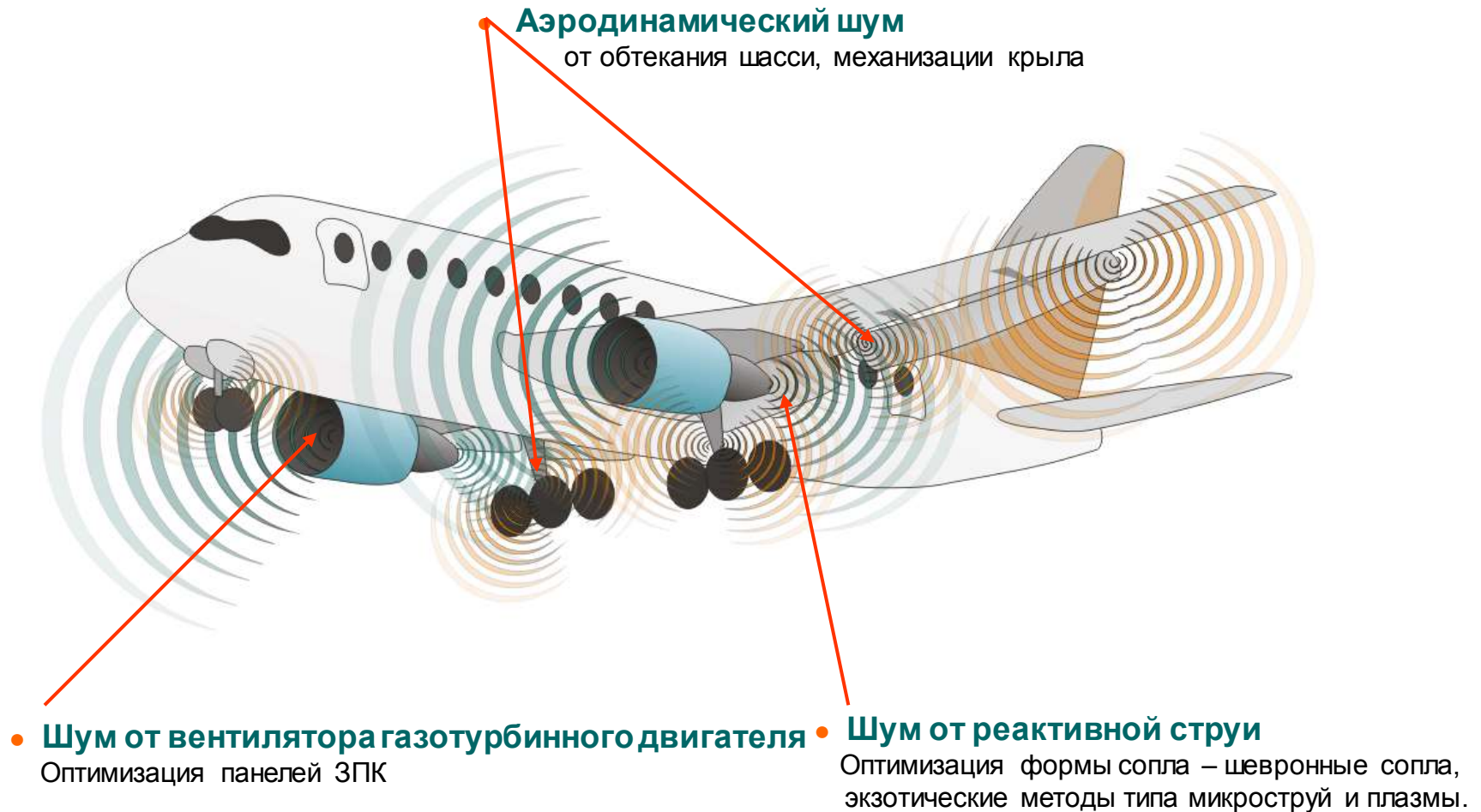
IBC

3D обтекание дефлектора ($M=0.5$)



Приложения вычислительной аэроакустики

Исследования направлены на изучение акустических источников и механизмов снижения шума самолетов

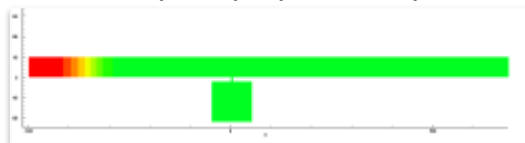


Численные исследования звукопоглощающих конструкций (ЗПК) авиадвигателей

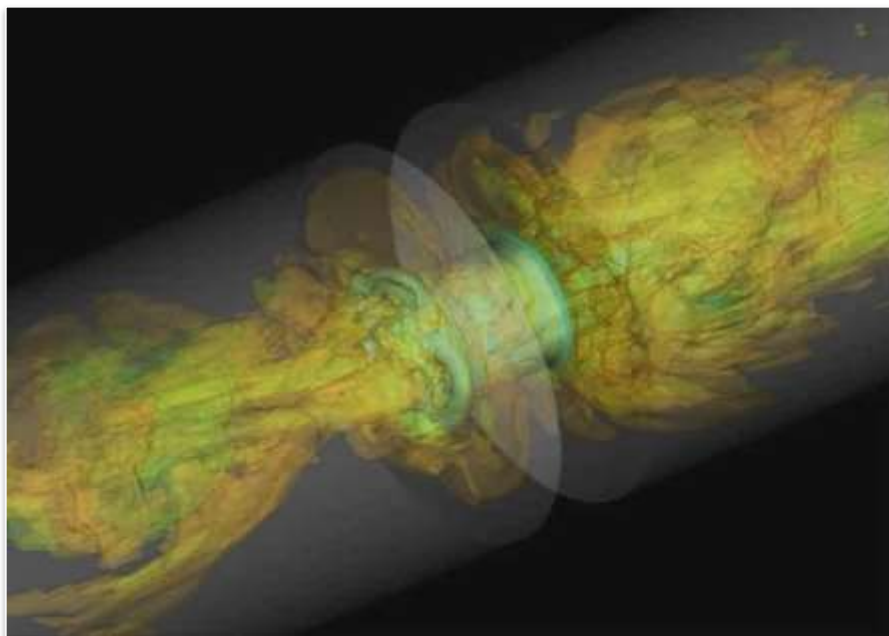
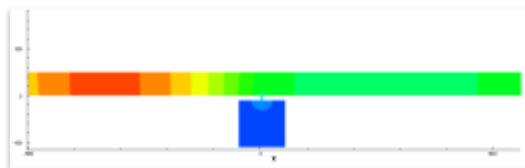
Совместно с ОАО «Авиадвигатель», Пермь

Принцип работы ЗПК – на примере резонатора Гельмгольца

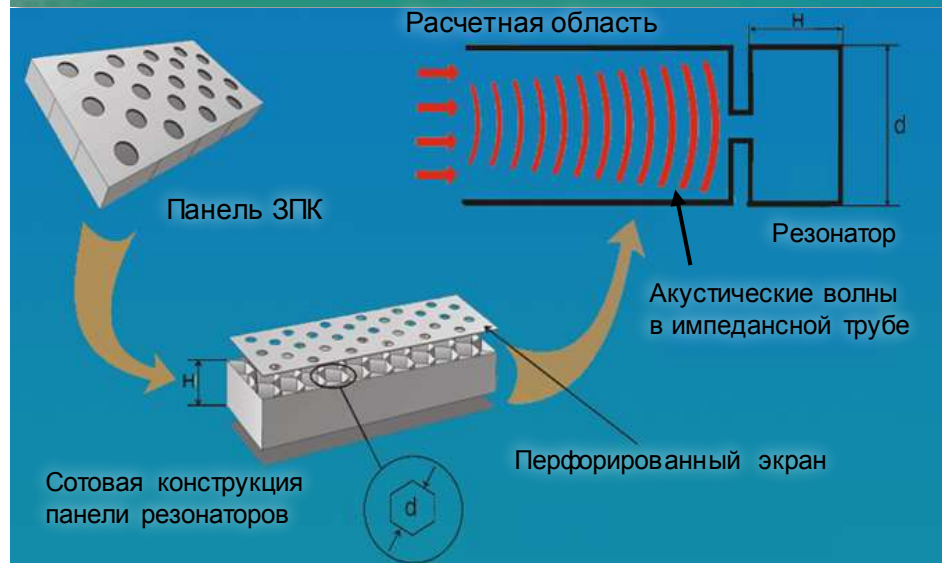
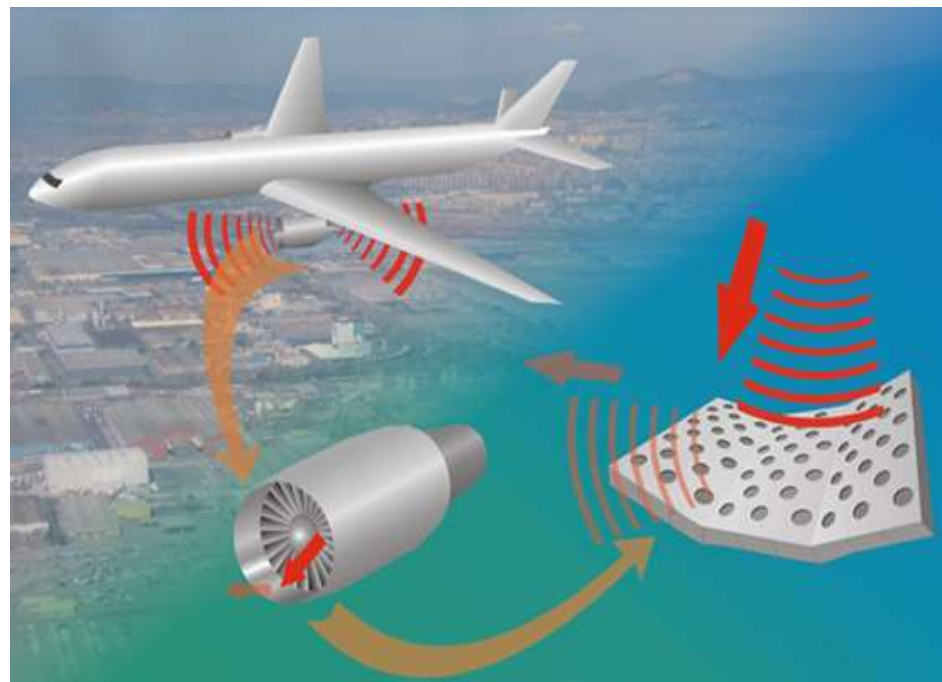
Нерезонансная частота



Резонансная частота



Эксперимент в импедансной трубе



Численные исследования звукопоглощающих конструкций (ЗПК) авиадвигателей

Совместно с ОАО "Авиадвигатель", Пермь

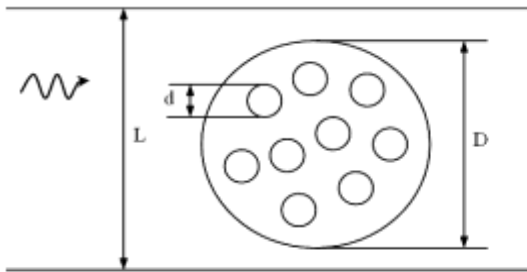
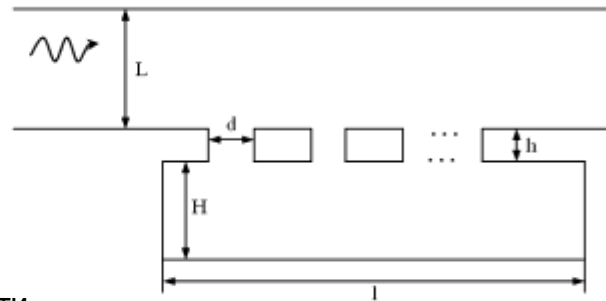
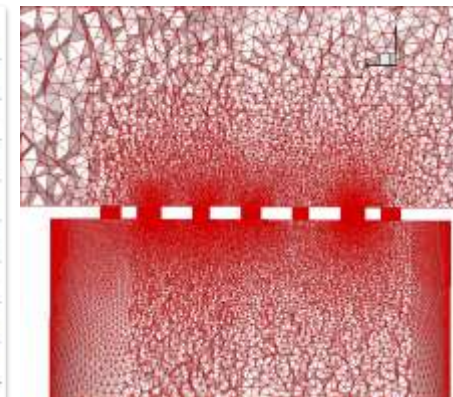
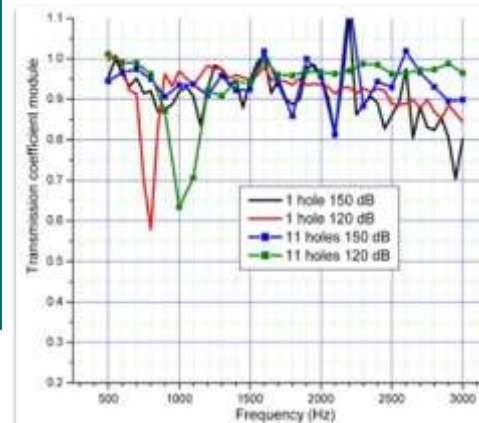
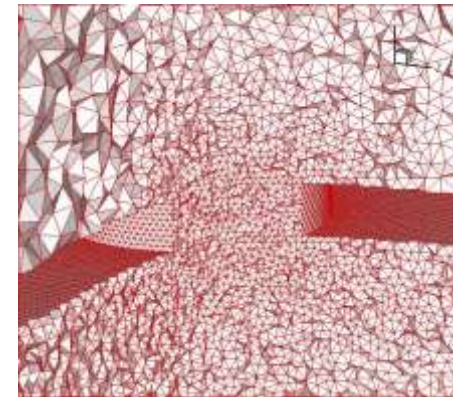
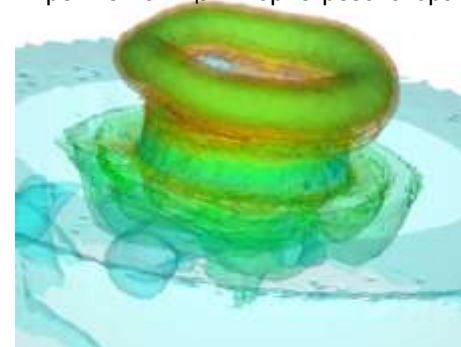


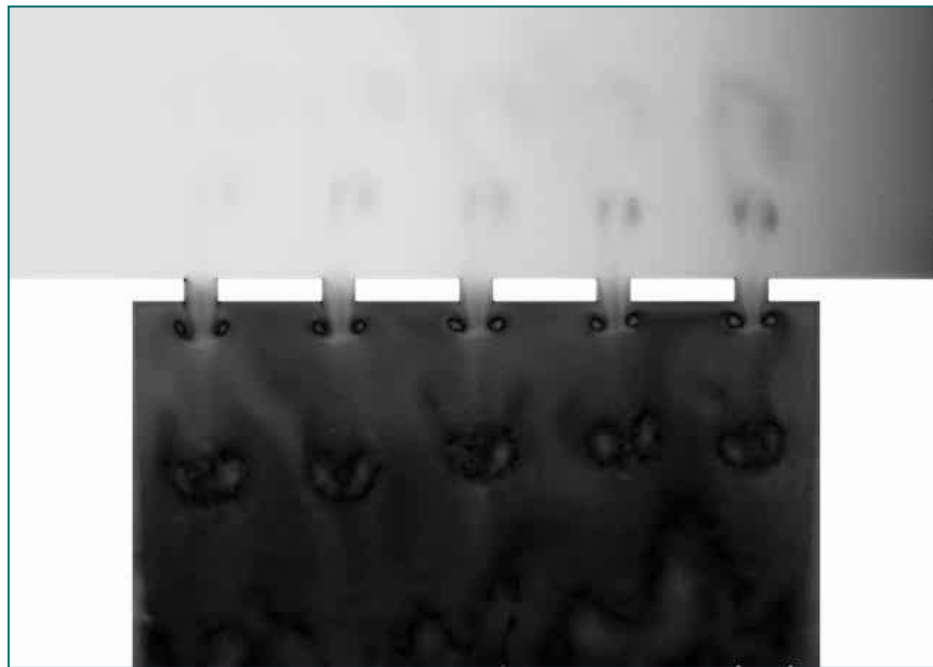
Схема расчетной области



Вихревые кольца в горле резонатора



Вид сетки из 20 млн. тетраэдров для ячейки с 11 отверстиями



Прохождение акустической волны в канале с ячейкой ЗПК

Численные исследования аэродинамического шума

Совместно с ЦАГИ

Исследования направлены на изучение акустических источников и механизмов снижения шума самолетов

Моделирование механизмов генерации аэродинамического шума в турбулентном следе при обтекании шасси самолета и поиск путей воздействия на него.

• Параметры задачи

Число Маха: $M=0.206$

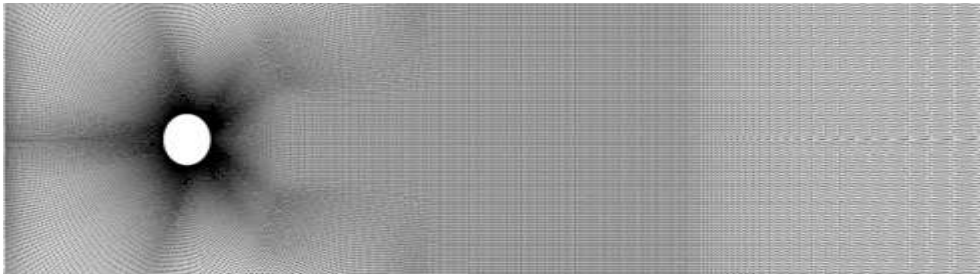
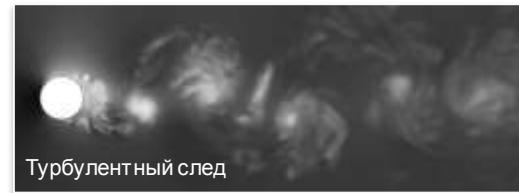
Число Рейнольдса: $Re = 14000$

Размер сетки: до 16 млн. узлов, 100 млн. тетраэдров

Период интегрирования по времени: 1700

Количество контрольных точек: 1400

Задействовано процессоров: до 12800

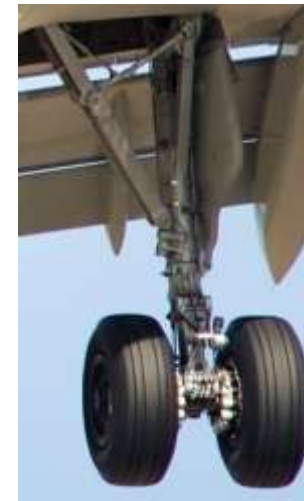


Численные исследования аэродинамического шума

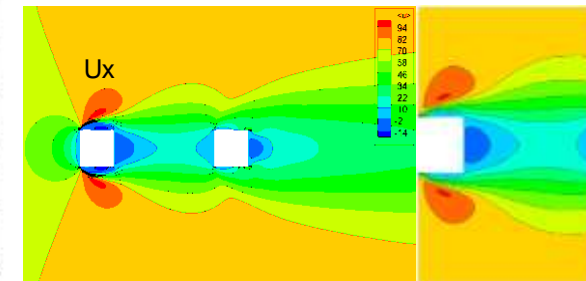
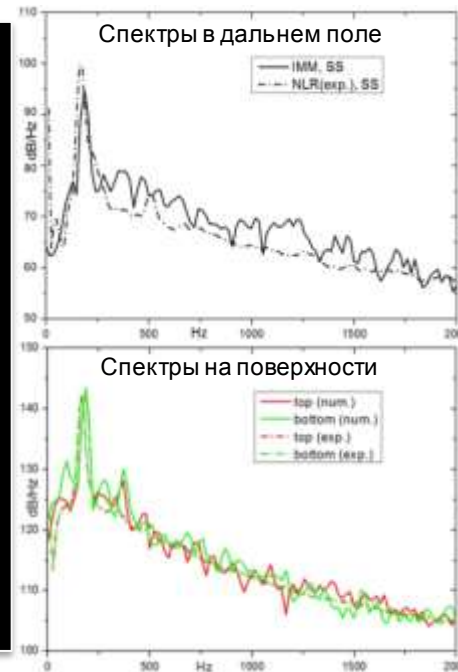
Механизмы возникновения шума при обтекании стоек шасси самолета

- Работа в рамках европейского проекта FP7 VALIANT
- Экспериментальные исследования в NLR, Голландия
- Расчеты: ИПМ РАН, TUB (Германия), NUMECA (Бельгия)

Углы атаки 0° , 10° , 15° ,
сетки до 15 млн. узлов / 80 млн. тетраэдров,
до 2048 CPU.

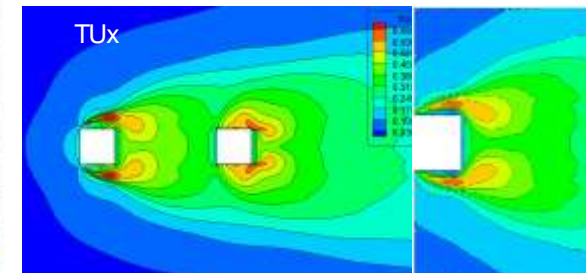


Установка в NLR



Расчет

Эксперимент (PIV)

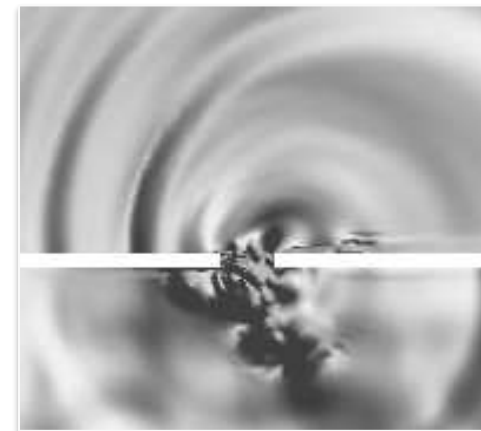


Сравнение с экспериментом

Численные исследования аэродинамического шума

Механизмы возникновения шума от зазоров в конструкции планера

- Исследования в рамках европейского проекта FP7 VALIANT
- Экспериментальные исследования выполнены в ЦАГИ
- Численные исследования: ИПМ РАН, TUV (Германия)



Генерация звуковых волн

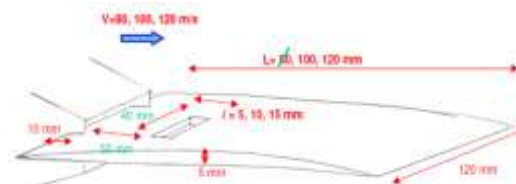
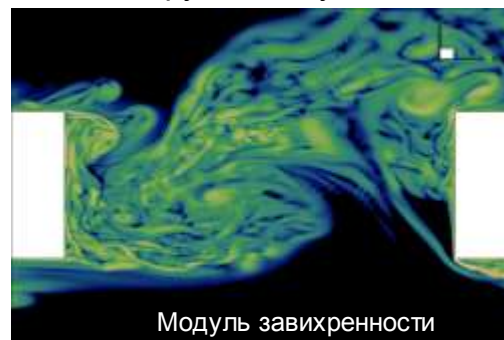
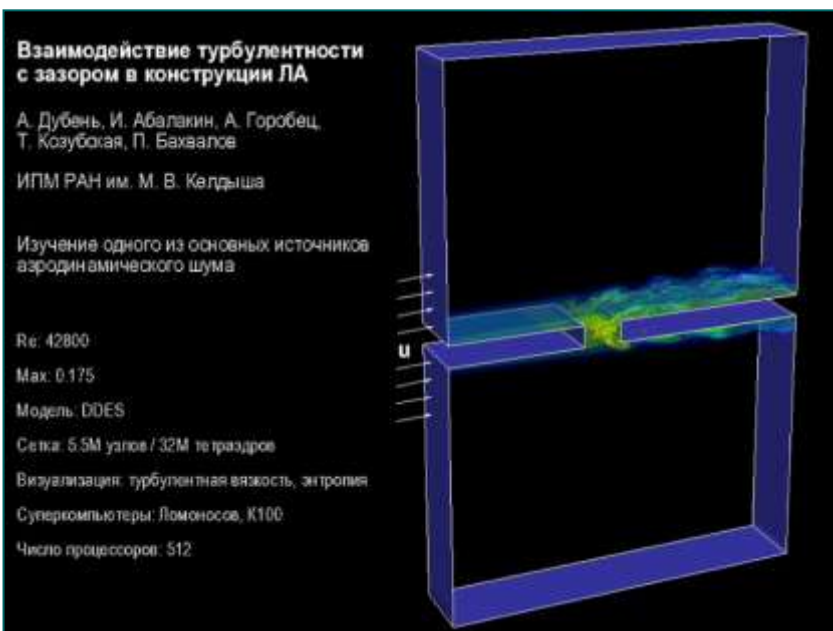
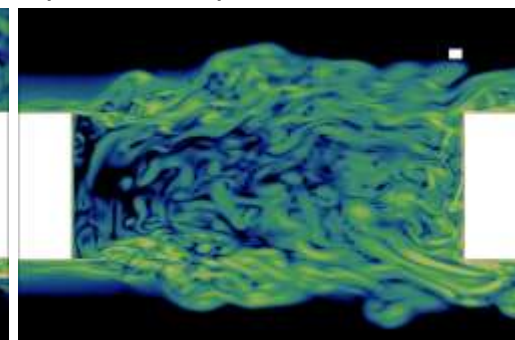


Схема эксперимента ЦАГИ

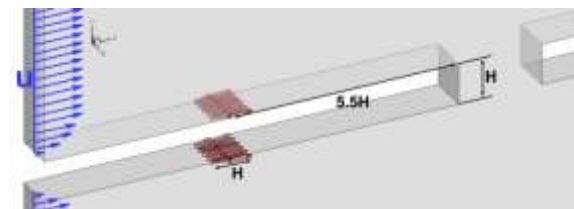
Обнаружена неустойчивость и различные режимы течения



Модуль завихренности



Мгновенная картина течения

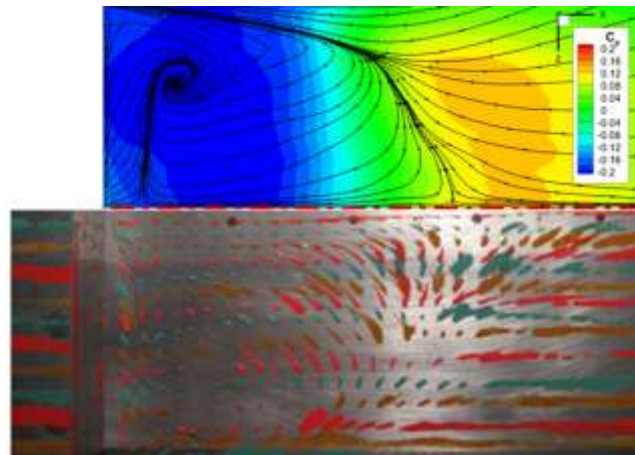


Моделирование турбулизаторов

Исследование турбулентного течения и акустических нагрузок

Совместно с ЦНИИМаш для ОКБ Сухого

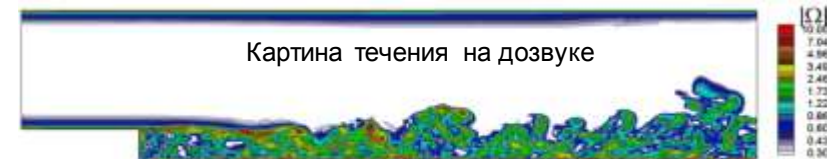
- Модельные конфигурации: каверны, обратные уступы, клиновидные тела
- Отработка методик расчета трансзвуковых течений в отсеках на крейсерских режимах полета боевых самолетов



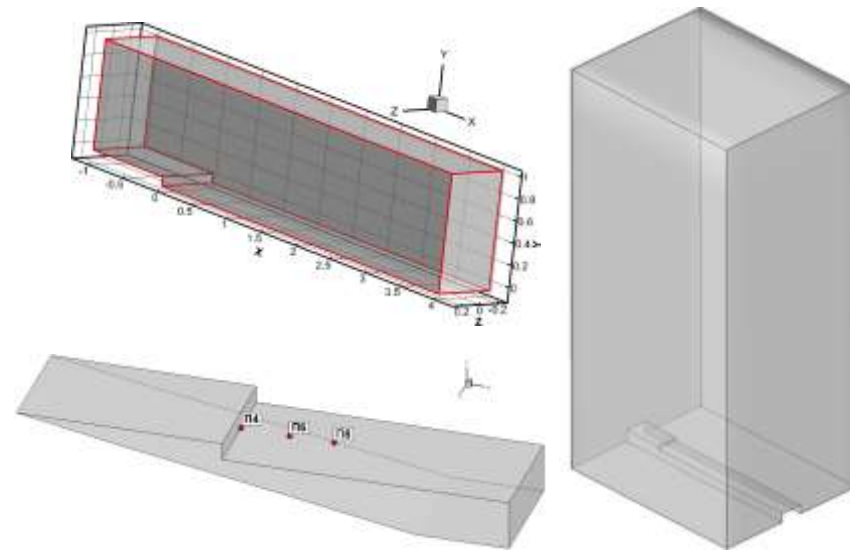
Сравнение с экспериментом



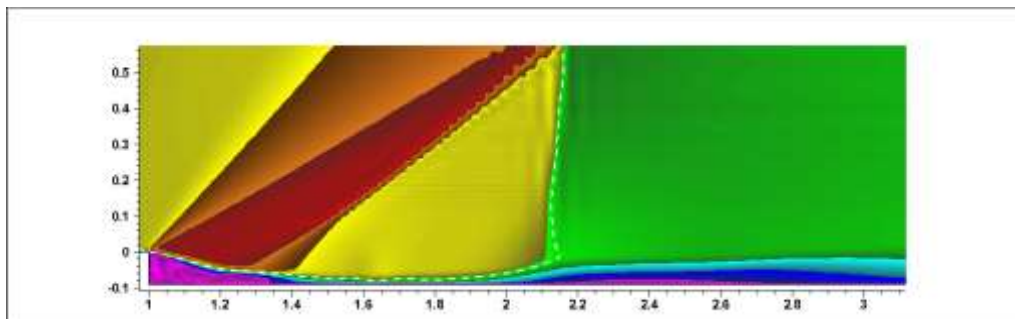
Турбулентность и акустика



Картина течения на дозвуке

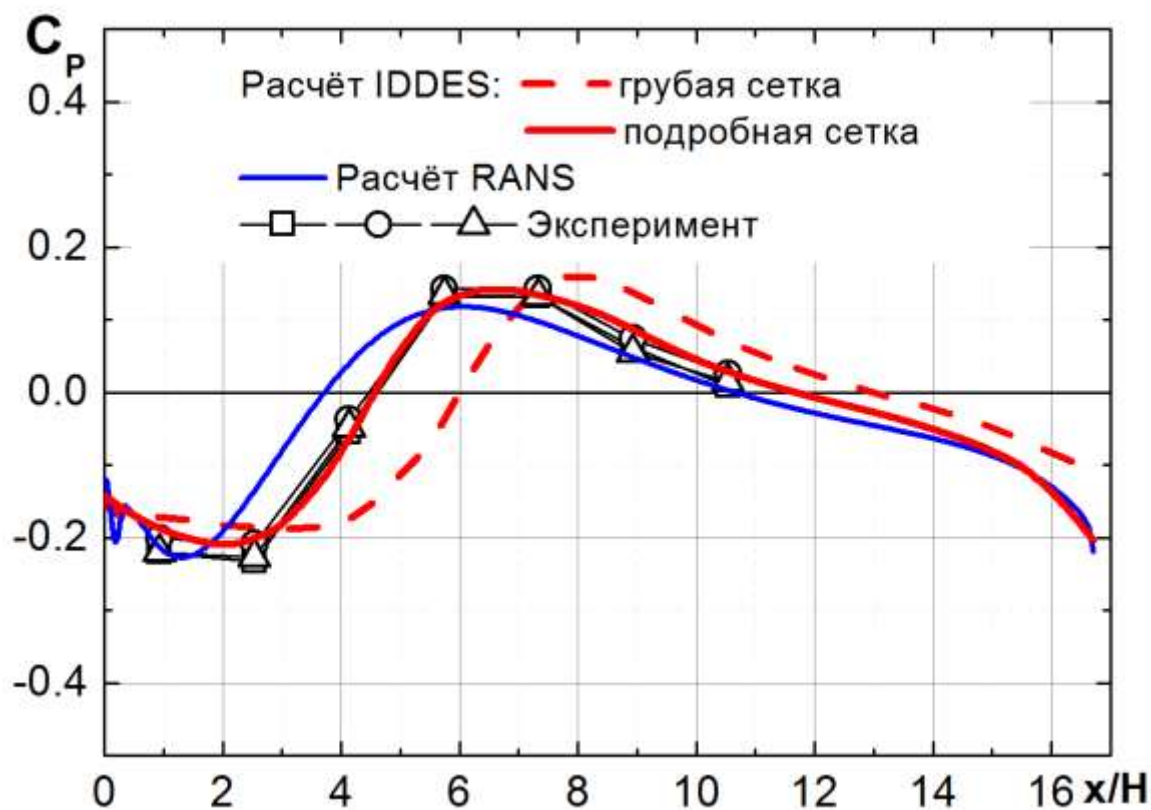
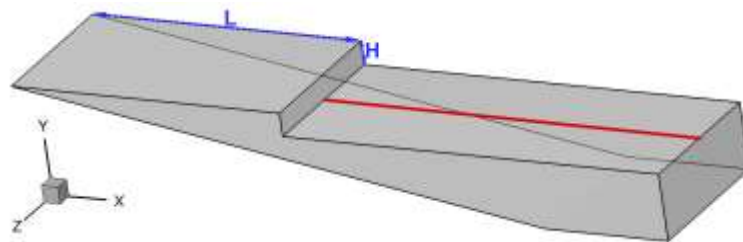


Различные модельные конфигурации



Нестационарное течение за уступом (сверхзвук, Мах 1.3)

Исследование турбулентного течения и акустических нагрузок



Согласование с экспериментом по C_p

Исследование турбулентного течения и акустических нагрузок

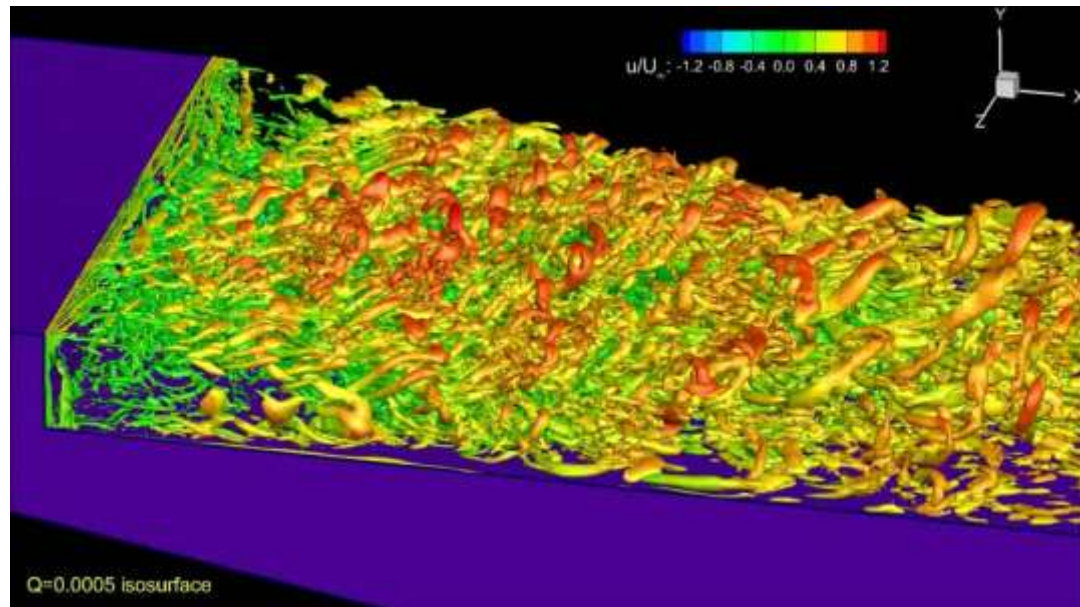
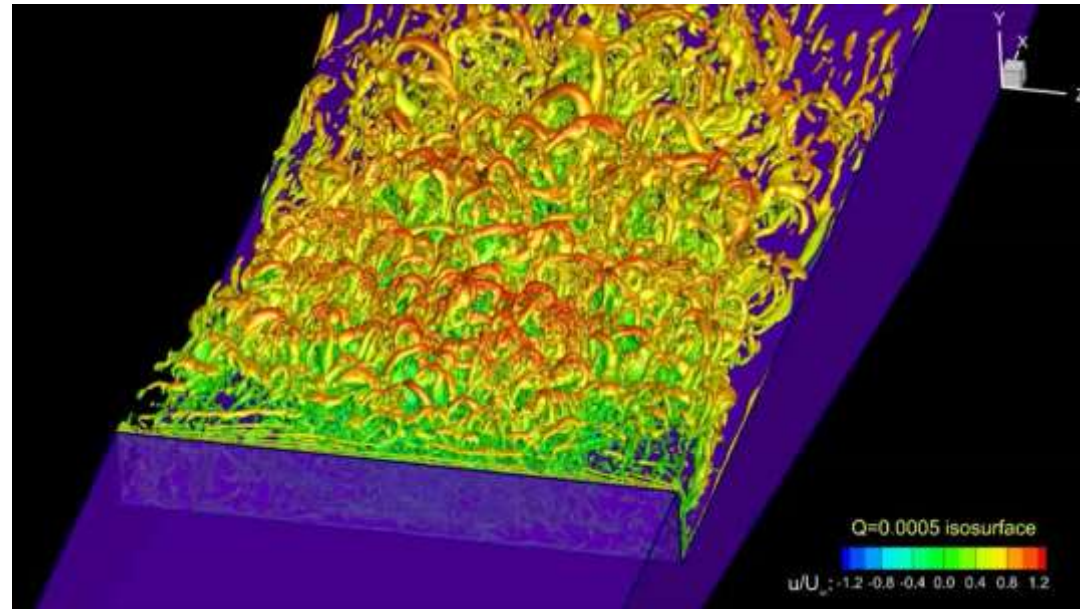
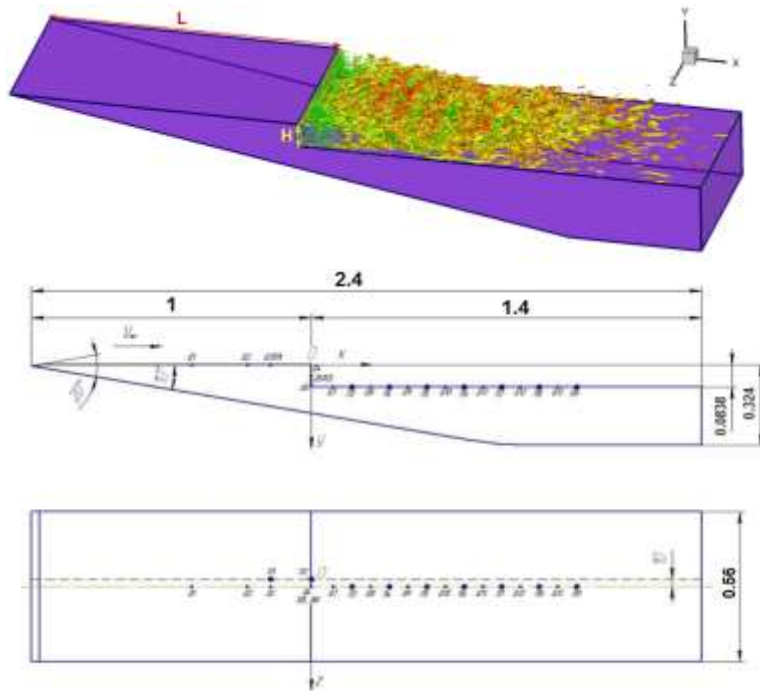
Клиновидное тело с обратным уступом
 $Re=7.2 \cdot 10^6$, $M=0.913$

Эксперимент в ЦНИИМаш

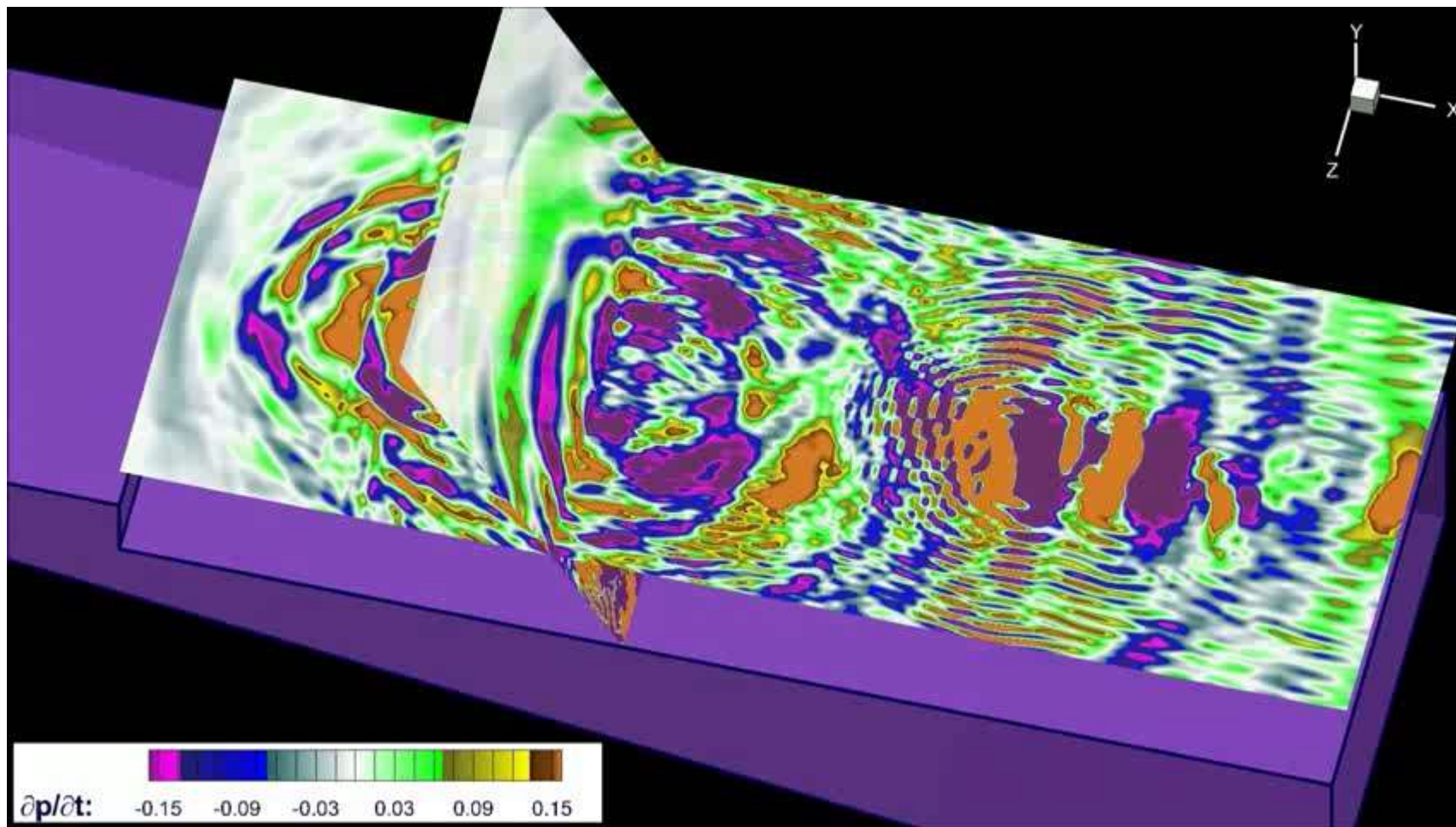
Сетки до 26М узлов, 149М тетраэдров

Турбулентности - IDDES

Использовались суперкомпьютеры
 Ломоносов и МВС10П



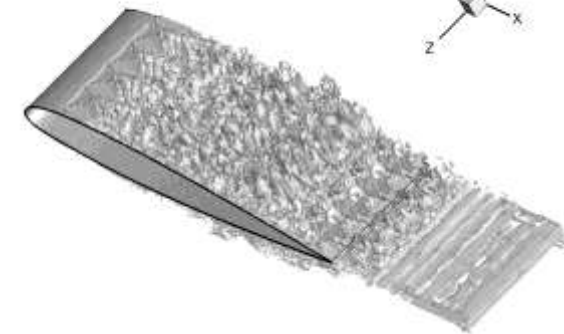
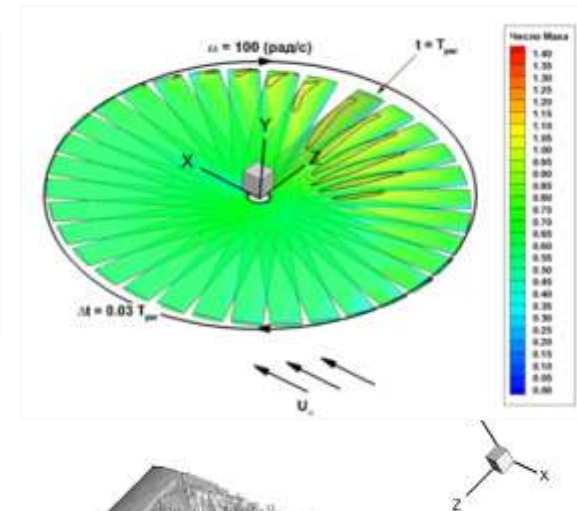
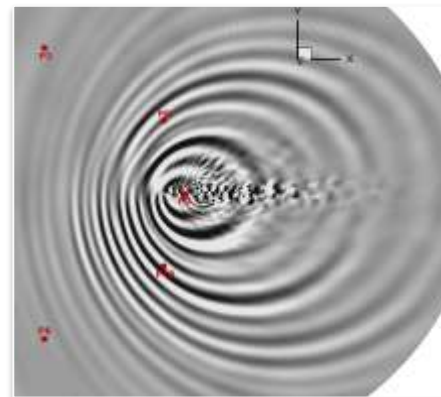
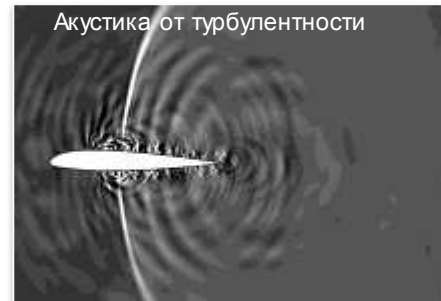
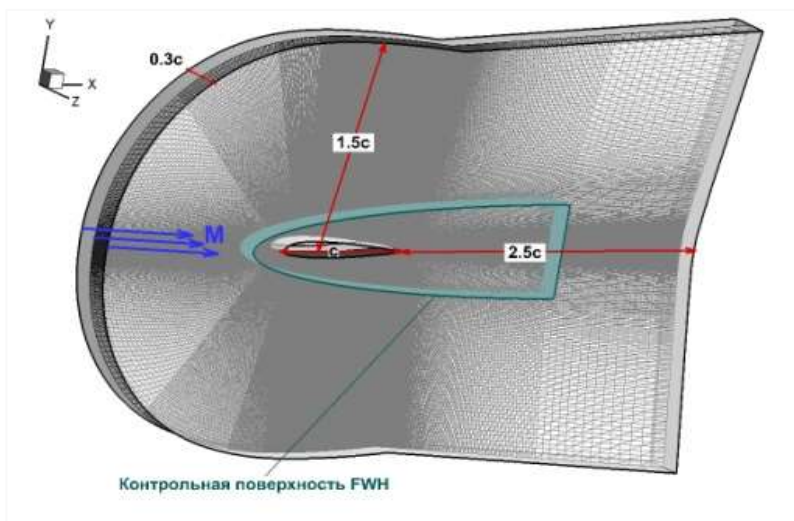
Исследование турбулентного течения и акустических нагрузок



Исследование аэродинамики и аэроакустики несущего винта вертолета

Совместно с ОАО “Камов”

- Турбулентное течение и акустика, ударные волны при трансзвуковом обтекании



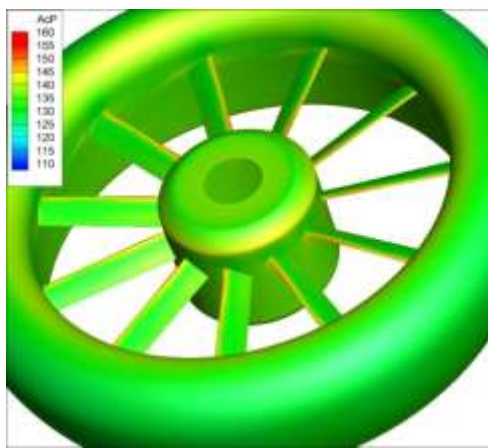
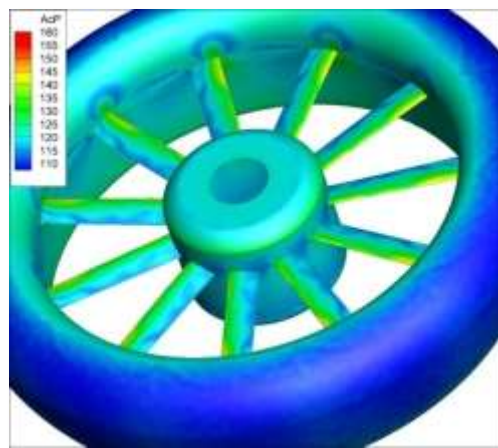
Турбулентный след за лопастью



Ударная волна от лопасти вертолета

Исследование аэродинамики и аэроакустики винта в кольце (Ка-62)

Совместно с ОАО «Камов»



Акустические нагрузки при углах установки 10° (слева) и 30° (справа)

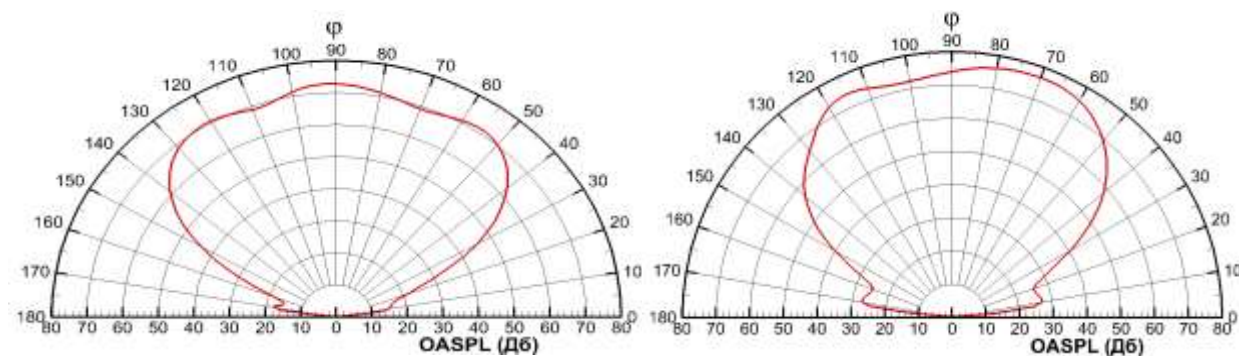
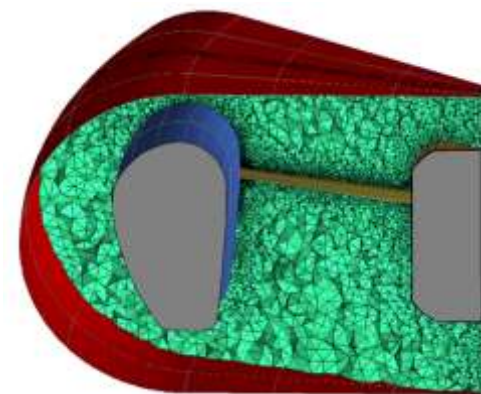


Диаграмма направленности акустического излучения для углов 10° (слева) и 30° (справа)

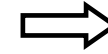


Фрагмент сетки

Расчет 11-лопастного винта в кольце (ОАО “Камов”)

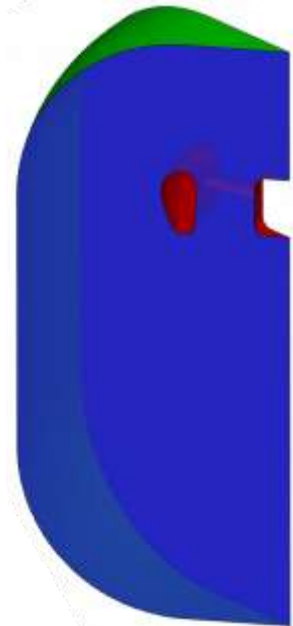
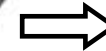
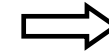
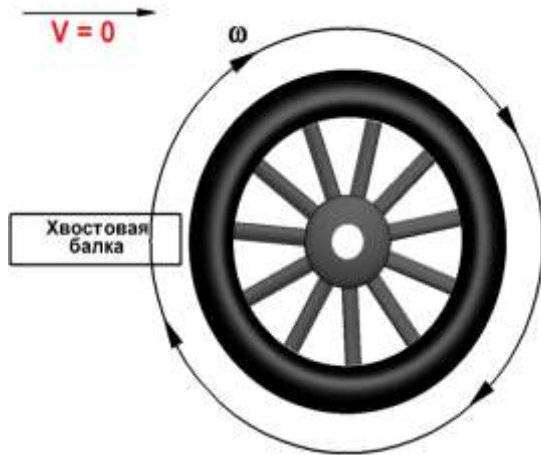
11-лопастной винт в кольце Радиус винта — 0.7 м

Набегающий поток: $V = 0 \text{ m/s}$



Осевая симметрия

1. Моделирование одиночной лопасти в секторе 32.72°
2. Периодические граничные условия в азимутальном направлении



Углы установки лопасти: $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$

	1 вариант	2 вариант
Частота вращения	$f = 46.6 \text{ Hz}$	$f \approx 40.926 \text{ Hz}$
Угловая частота	$\omega = 292.80 \text{ rad/s}$	$\omega \approx 257.14 \text{ rad/s}$
Скорость конца лопасти	$V_{tip} \approx 205 \text{ m/s}$	$V_{tip} = 180 \text{ m/s}$

Расчет 11-лопастного винта в кольце (ОАО “Камов”)

Математическая модель

Уравнения Эйлера во вращающейся со скоростью ω системе координат

$$\mathbf{V} = \omega \times \mathbf{r}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho(\mathbf{u} - \mathbf{V}) = 0$$

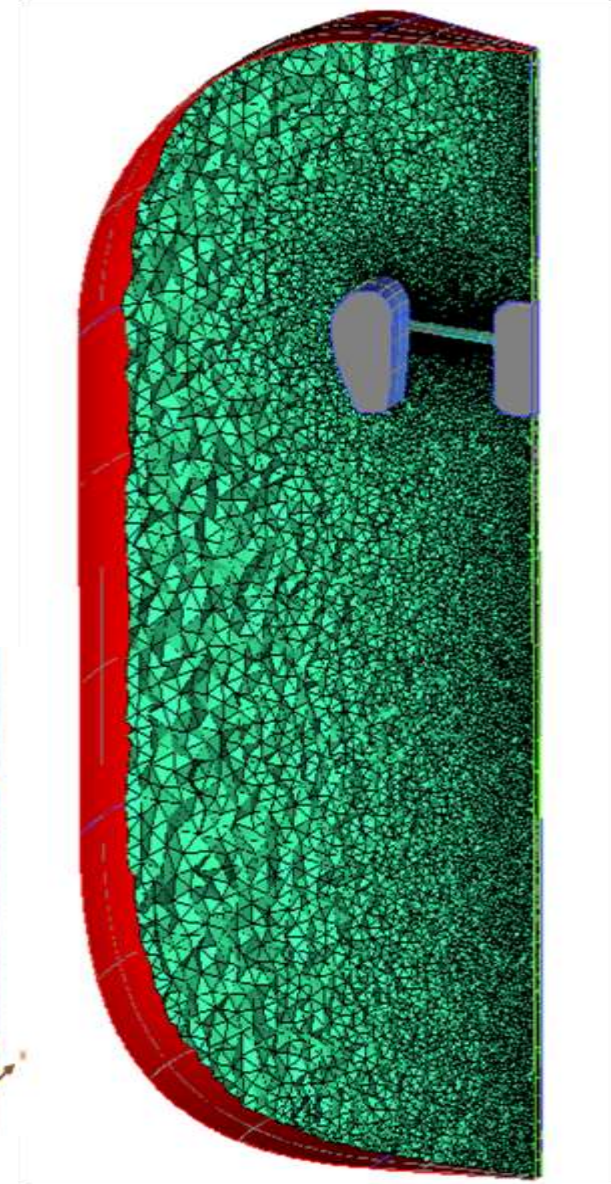
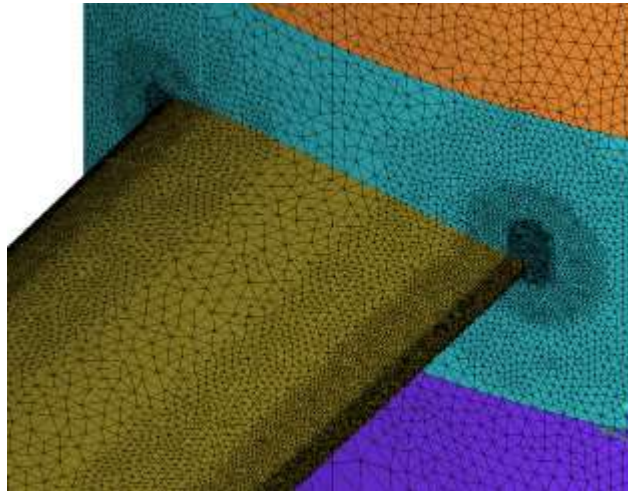
$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \operatorname{Div} \rho(\mathbf{u} - \mathbf{V}) \otimes \mathbf{u} + \nabla p = -\rho(\omega \times \mathbf{u})$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{u} - \mathbf{V})E + \operatorname{div} \mathbf{u} p = 0$$

Сетка:

2.3-2.7 млн узлов;

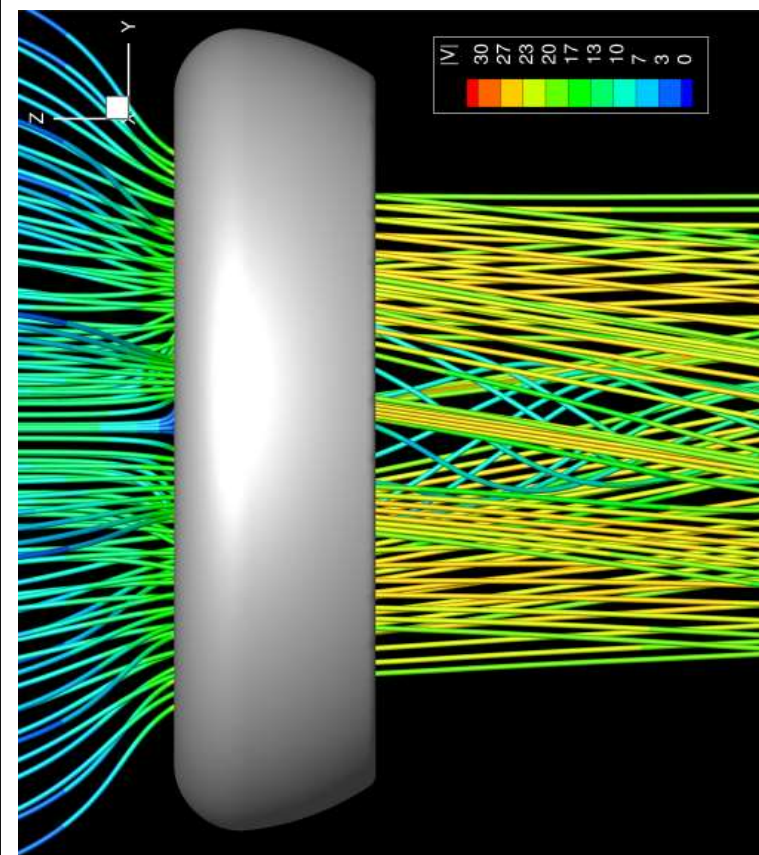
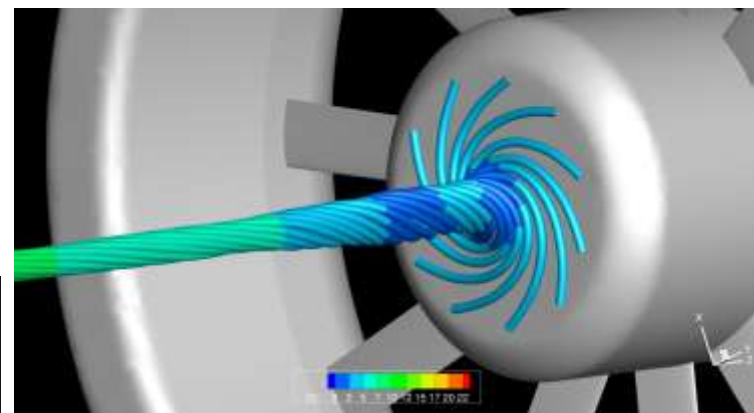
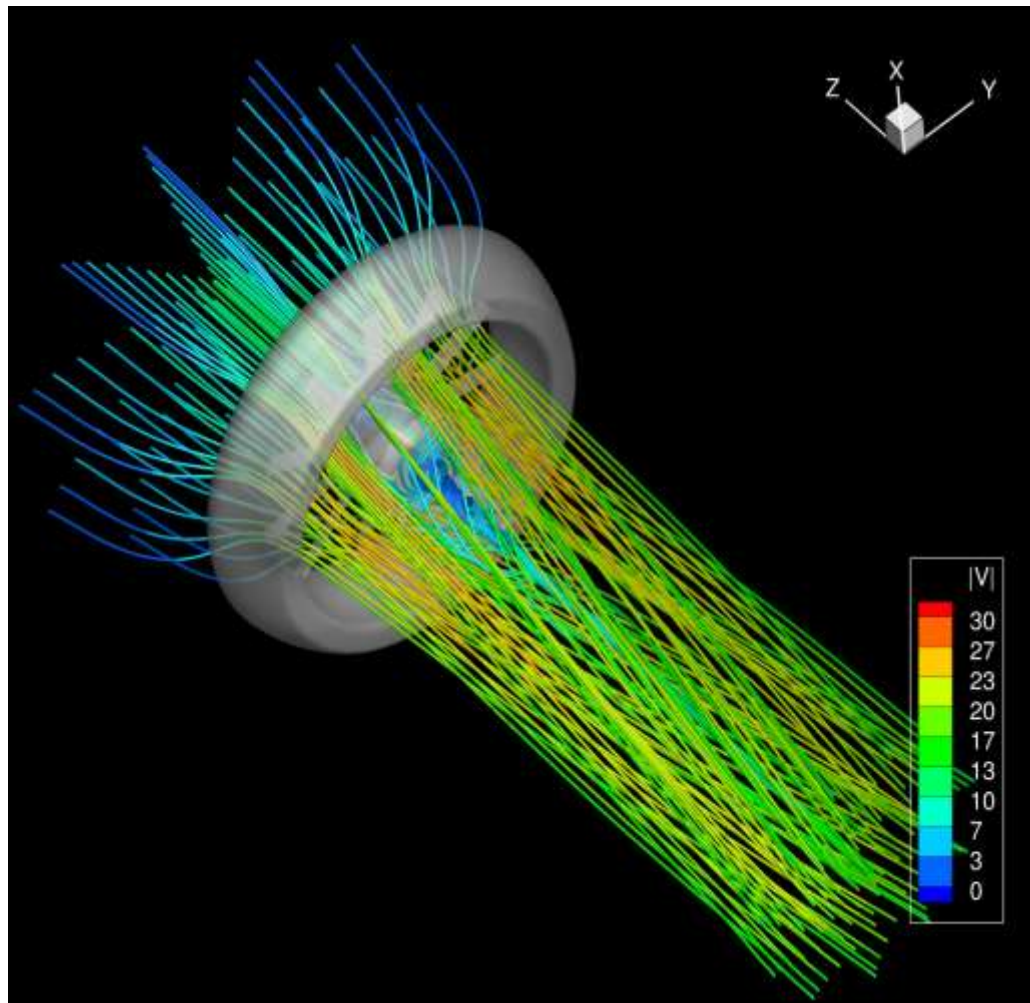
13.6-15.2 млн тетраэдров.



Расчет 11-лопастного винта в кольце (ОАО “Камов”)

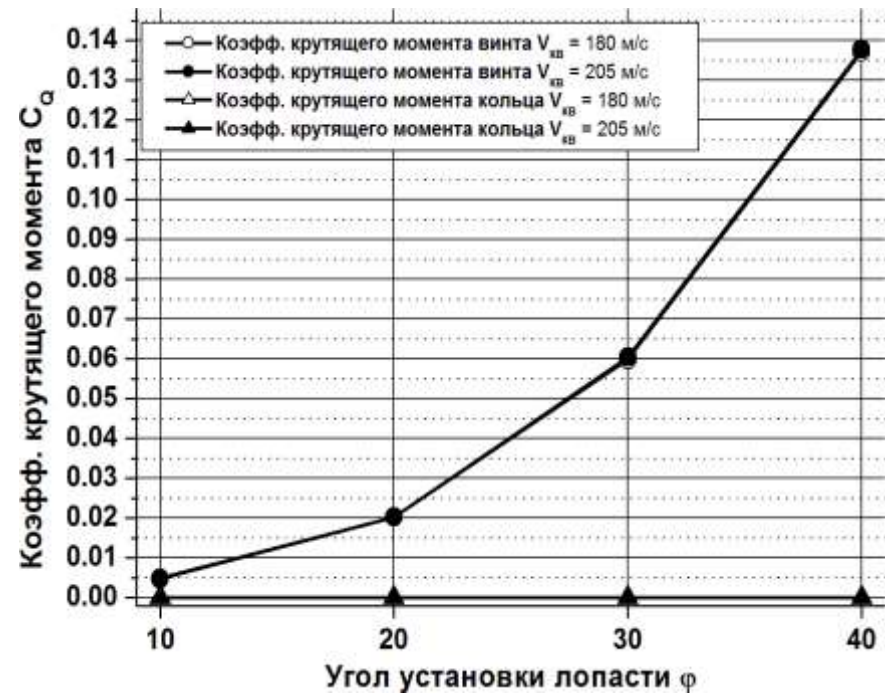
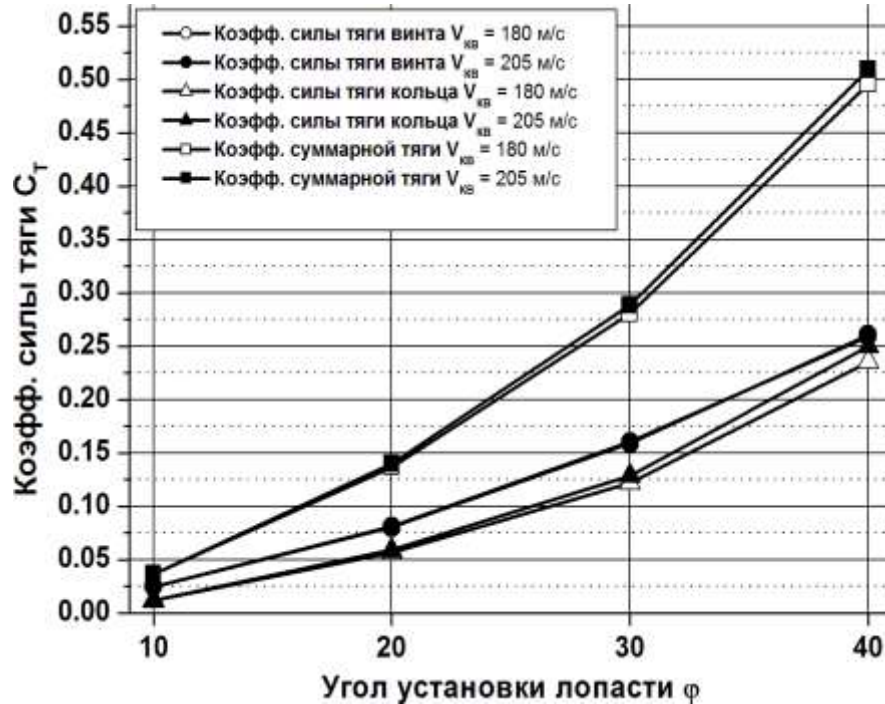
Численные результаты

Линии тока в окраске модуля скорости, стационарное течение, установившееся после 10 оборотов



Расчет 11-лопастного винта в кольце (ОАО “Камов”)

Аэродинамические силы



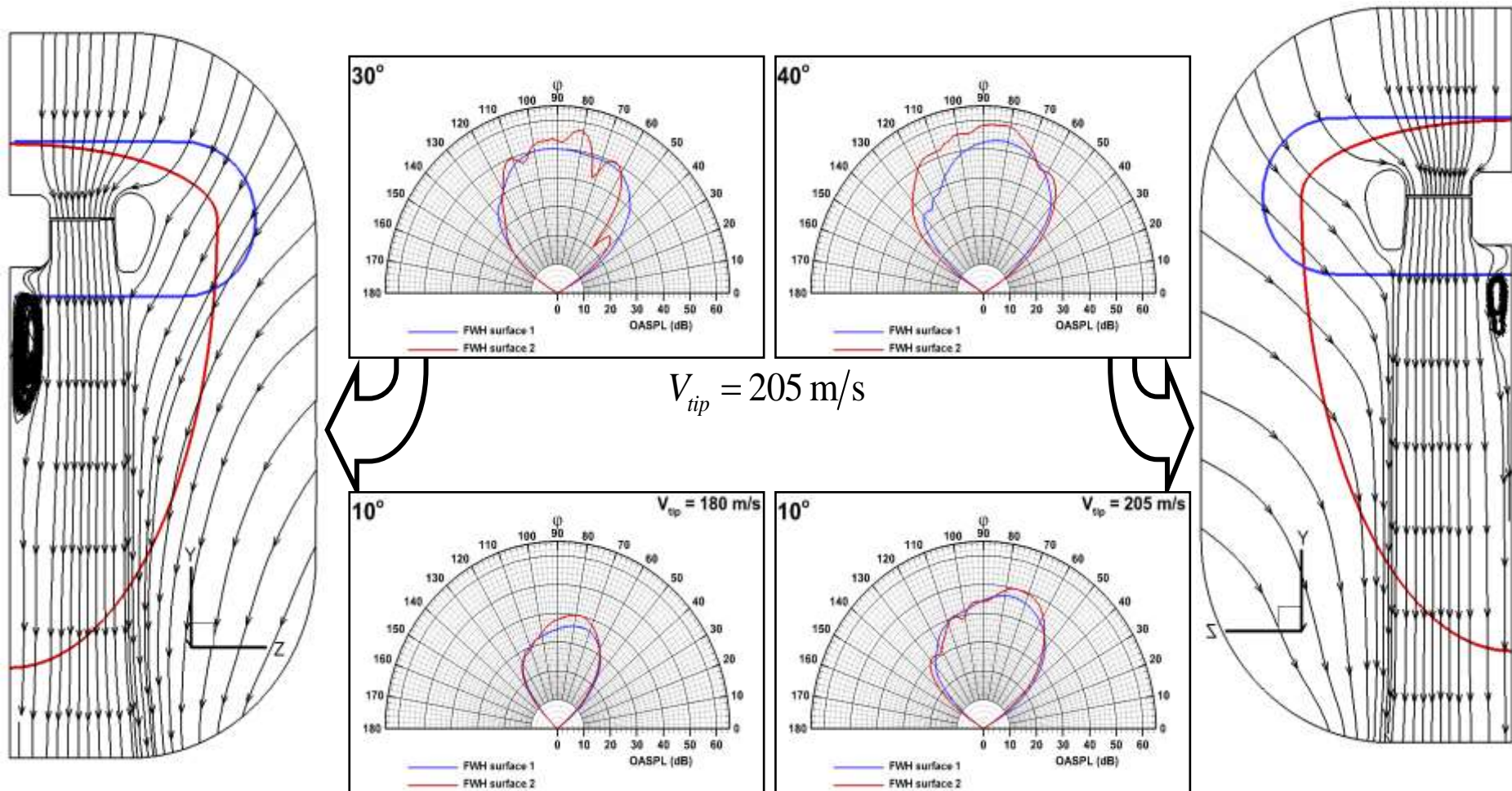
Коэффициенты силы тяги винта, кольца и суммарной силы

Коэффициенты аэродинамического крутящего момента винта, кольца и суммарного крутящего момента

Расчет 11-лопастного винта в кольце (ОАО “Камов”)

Пульсации давления в дальнем поле

Диаграммы направленности в зависимости от выбора контрольной поверхности



Общий уровень звукового давления (OASPL) на расстоянии 150 м



Комплекс программ NOISEtte для CFD/CAA расчетов

- Сжимаемые дозвуковые и сверхзвуковые течения, задачи аэродинамики и аэроакустики.
- Экономичный алгоритм повышенной точности на неструктурированных гибридных сетках (за счет оригинального квазиодномерного подхода)
- Высокая степень параллелизма

Спасибо за внимание!



НКВД СССР

НКВГД РФ

Народный Комиссариат
Вычислительной Газовой Динамики



Карающий меч валидации и верификации

Уголовный кодекс математического моделирования

- Статьи: 10 лет, 20 лет без права переписки, высшая мера – расстрел.



Комплекс программ NOISEtte для CFD/CAA расчетов

- Сжимаемые дозвуковые и сверхзвуковые течения, задачи аэродинамики и аэроакустики.
- Экономичный алгоритм повышенной точности на неструктурированных гибридных сетках (за счет оригинального квазиодномерного подхода)
- Высокая степень параллелизма

Спасибо за внимание!