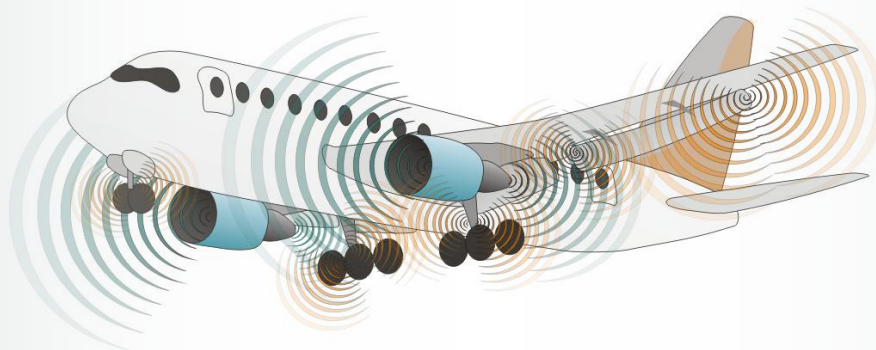


КОМПЛЕКС ПРОГРАММ NOISETTE ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ И АЭРОАКУСТИКИ

ПРОГРЕСС ЗА 2015



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



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



**Решение задач вычислительной аэродинамики и аэроакустики
на основе алгоритмов повышенной точности
на неструктурированных сетках**

Моделирование сжимаемых турбулентных течений

Коллектив разработчиков

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
- А. Климов, студент МФТИ
- С. Суков, к. ф.-м. н., с.н.с.

Заказчики и партнеры по научной работе

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



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}_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
- NLDE – уравнения Эйлера, нелинейные для возмущений

• 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

• Стохастические методы генерации входного сигнала и турбулентных полей

- Белый шум, заданный спектр
- SNGR модель

Численные методы

• Неструктурированные сетки

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

• Схемы повышенной точности

- EBR схемы с квазиодномерной реконструкцией
- Полиномиальная конечно-объемная схема

• Римановские солверы:

- Годунов, Роу, Хуанг

• Маломаховые течения

- Предобуславливатель Туркеля

• Разрывные решения

- WENO-EBR схемы
- MUSCL-TVD EBR схемы

• Интегрирование по времени

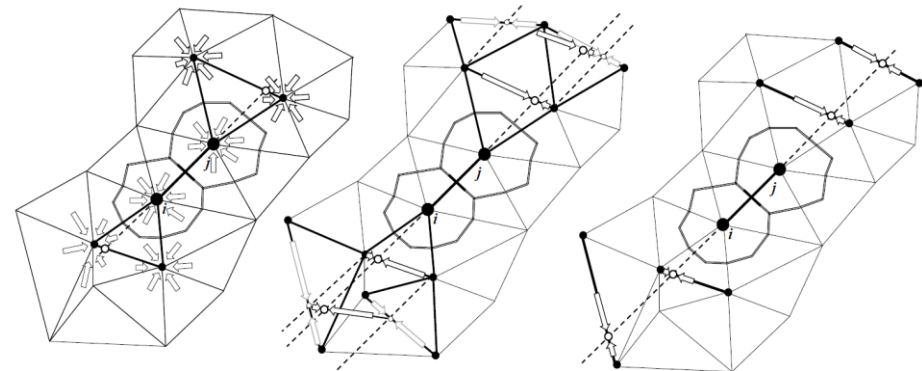
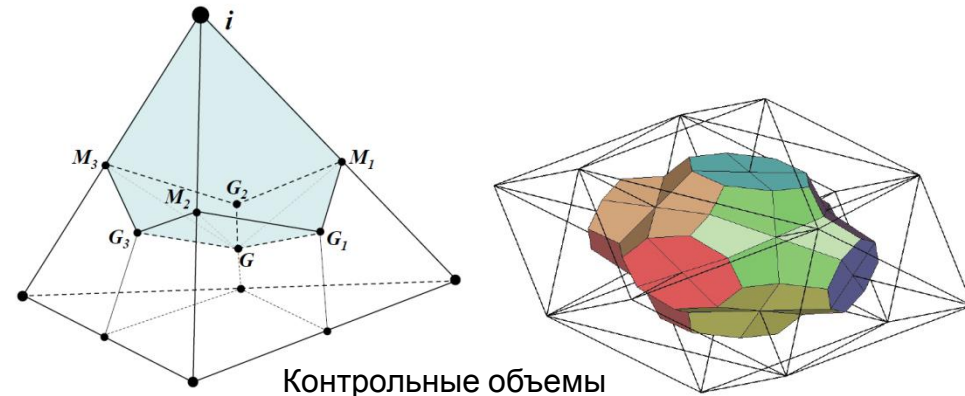
- Явная схема (Рунге-Кутта 1 – 4-го порядка)
- Неявная схема 1-2 порядка с линеаризацией по Ньютону разностной системы уравнений

• Решатели СЛАУ

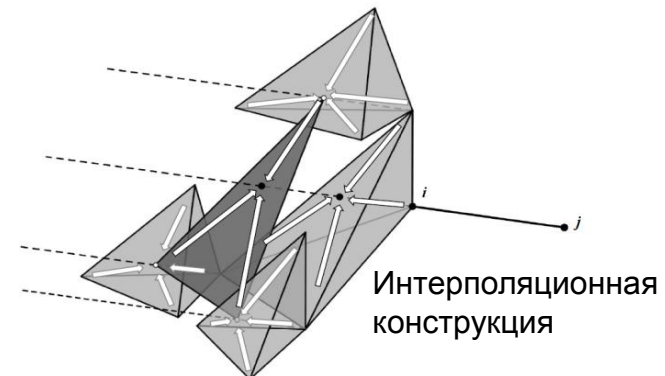
- BICG-Stab с локальными блочными предобуславливателями
- Мультисистемный режим

• Граничные условия

- Твердые стенки – отражение, прилипание
- Неотражающие граничные условия
- Периодические условия - с топологическим замыканием



Шаблоны реконструкции



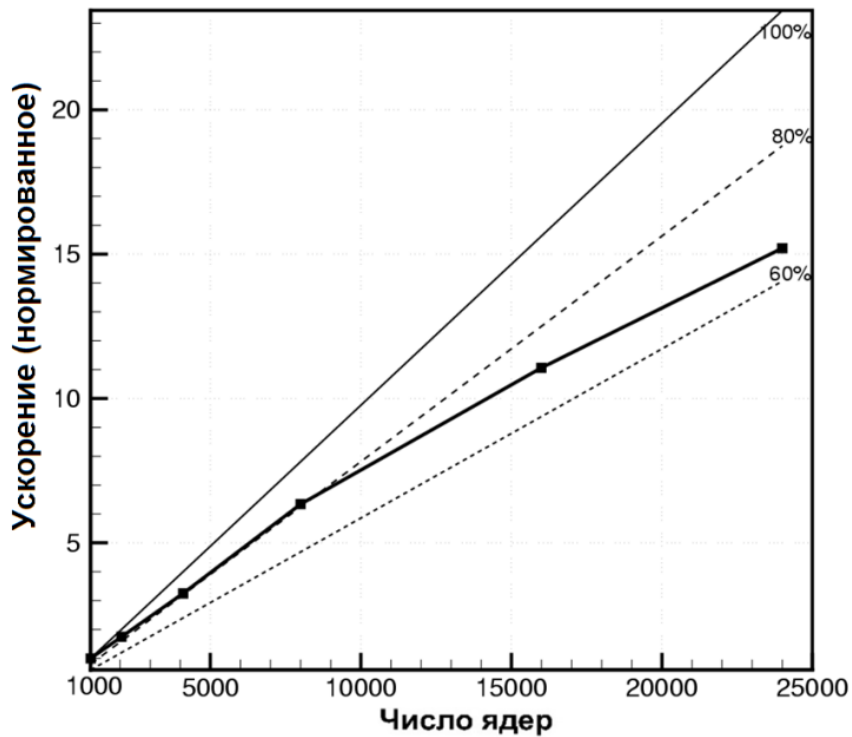
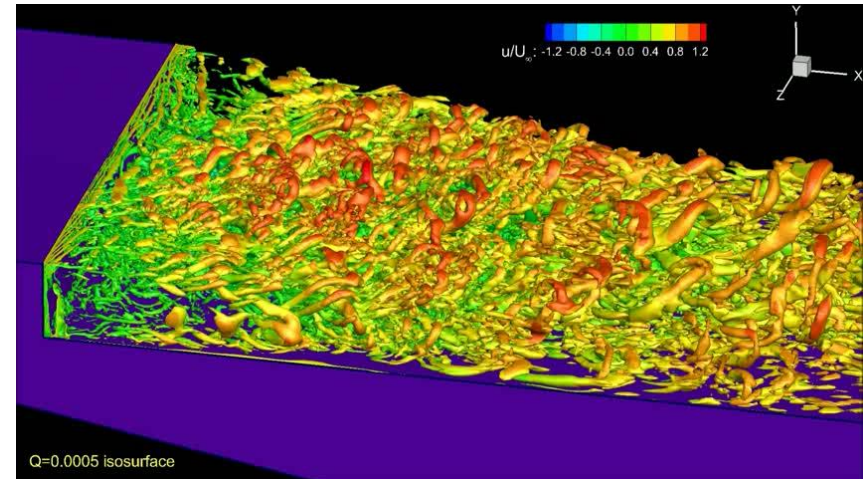
Интерполяционная конструкция

Параллельные технологии

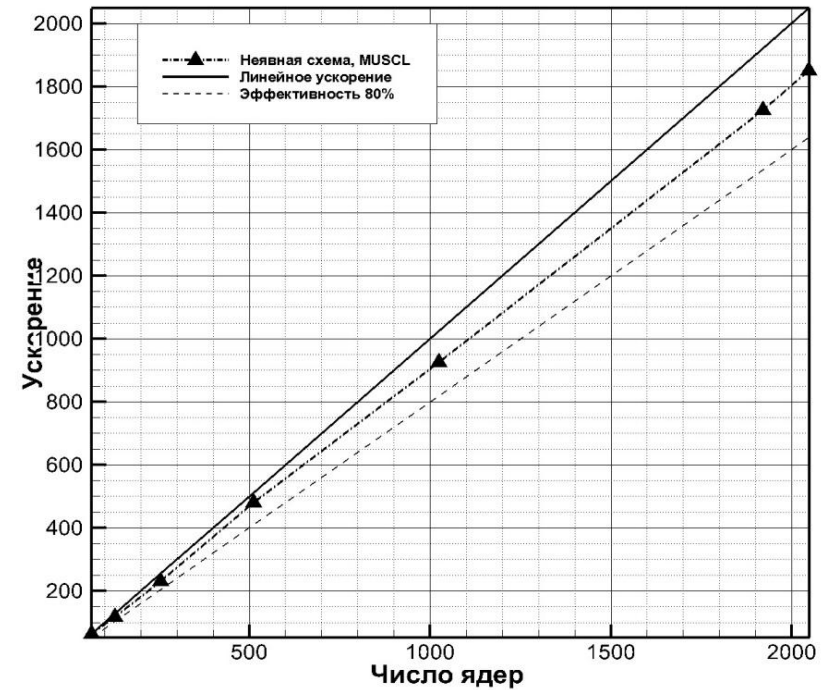
- Многоуровневое распараллеливание MPI+OpenMP для систем с числом ядер более **100000**
- Существенно-многопоточное распараллеливание с общей памятью **на сотни нитей**
- Полная адаптация алгоритма к потоковой обработке совместимость с массивно-параллельными ускорителями.
- Гетерогенные вычисления
Использование ускорителей **Intel Xeon Phi** в симметричном режиме
- Параллельная инфраструктура пре- и постпроцессора
распределенная обработка данных сверхбольшого объема, неструктурированные сетки с числом элементов **более миллиарда**.
- Высокая производительность вычислений
явная схема **~15-20%** от пика CPU ядра, расход памяти **~2** КБ на узел;
неявная схема **~10-15%** (в тестах на Intel Xeon X5670), **4 ~ 5** КБ узел.
- Встроенные средства:
инструментальное профилирование, менеджер памяти, контроль стека, счетчик фактической производительности



Параллельные технологии

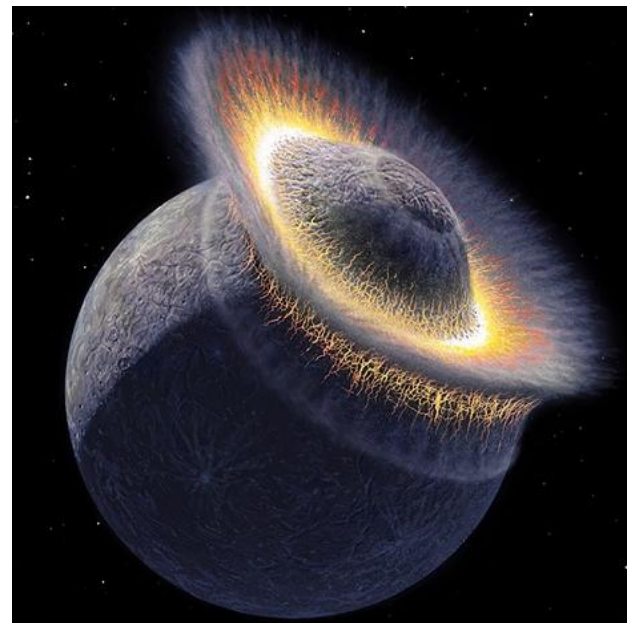


Ломоносов. Явная схема, сетка 16М узлов



МВС-10П. Ускорение в режиме "всё включено"
на реальной задаче, сетка 13М узлов

Слияние вершино- и элементарно-центрированных подходов



- Единое вычислительное ядро для вершинно- и элементарно-центрированных схем
- Единый сеточный формат и унифицированный набор средств инфраструктуры

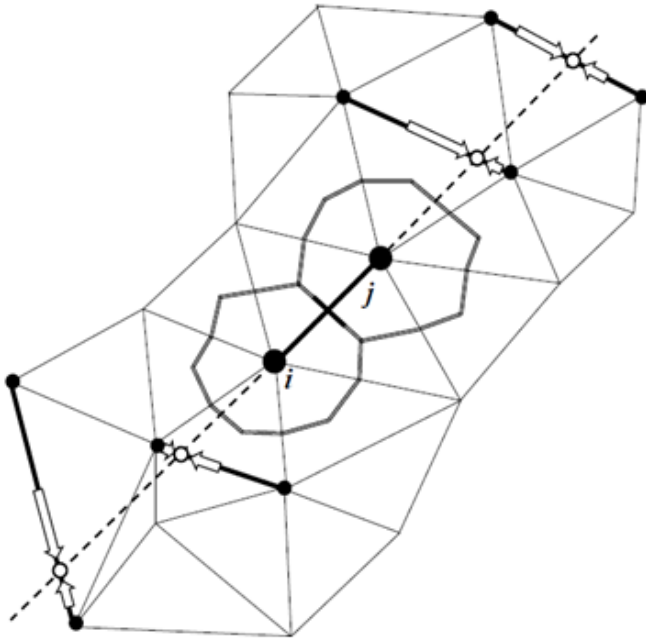
NOISEtte

Stiefel

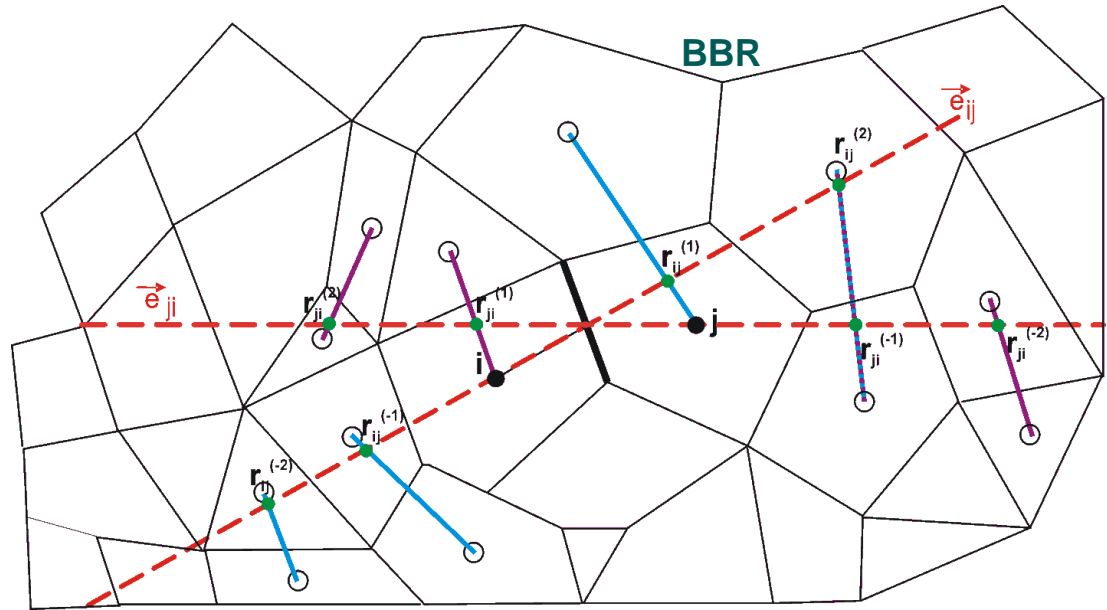
Элементно-центрированные схемы

- Схема BBR с определением переменных на сеточных элементах, построенная по аналогии с EBR-схемами
- 2-й порядок точности на неструктурированной сетке
- 3-й или 5-й порядок точности на декартовой сетке
- Монотонизация: TVD или WENO подходы

EBR



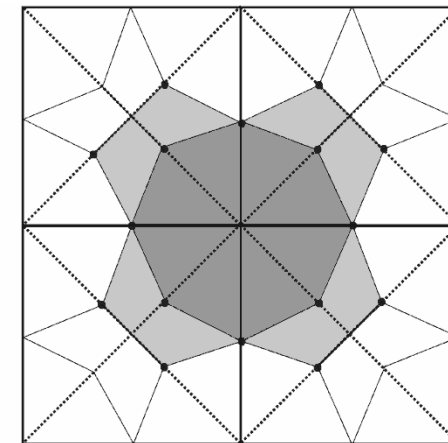
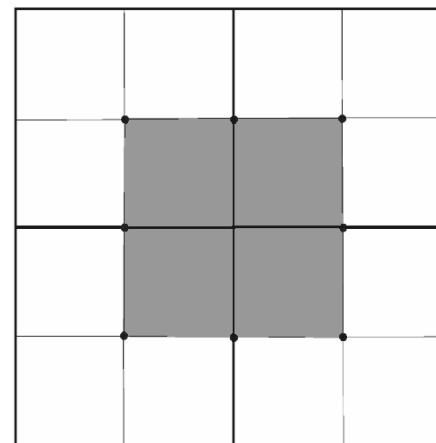
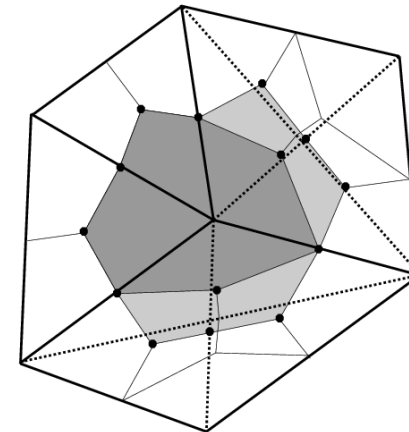
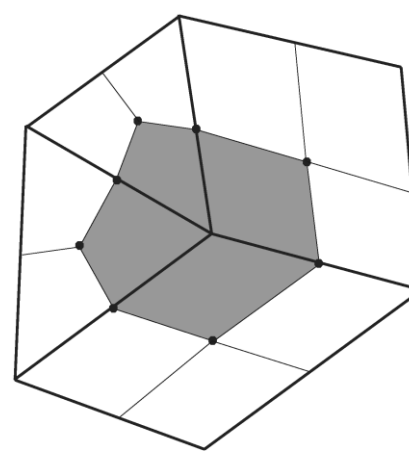
BBR



П.А. Бахвалов. Схема с квазиодномерной реконструкцией переменных на сетках из выпуклых многоугольников для решения задач аэроакустики, Математическое моделирование, том 25, № 9, (2013), стр. 95-108

Полупрозрачные контрольные объёмы для гибридных сеток

- **Цель:** обеспечение точности на линейной функции реберно-ориентированных схем с определением переменных в узлах для сеток, состоящих из элементов различных типов
- Характеристическая функция ячейки дуальной сетки может принимать значения не только 0 или 1, но и дискретный набор значений между 0 и 1.
- Поток определяются не только в центрах рёбер, но и в центрах диагоналей.
- Легко реализуется как в 2D, так и в 3D



Обычные ячейки

Полупрозрачные ячейки



Ilya Abalakin, Pavel Bakhvalov and Tatiana Kozubskaya. Edge-based reconstruction schemes for prediction of near field flow region in complex aeroacoustic problems, International Journal of Aeroacoustics , Vol.13, N 3&4, 2014, p. 207-234

Моделирование турбулентности

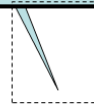
- LES модели: **S3PQ, S3QR, S3PR**, WALE, Sigma, Vreman, Verstappen ¹
 - автоматическая адаптация к стенкам
- RANS модели с двумя уравнениями: k-ε, k-ω (Wilcox), Menter SST
- Гибридные RANS-LES подходы: Partially-Averaged Navier-Stokes (PANS) [Girimaji, 2006]
- Развитие незонного метода (I)DDES: Accelerated DES ²
 - ускорение «численного перехода» в слоях смешения
 - новое определение подсеточного масштаба: $\Delta = \Delta_{SLA} = \Delta_{\omega} \cdot F_{KH}(< VTM >)$
 - Δ_{ω} - максимальный размер ячейки в направлении, перпендикулярном вектору завихренности
 - VTM - индикатор квазидвумерных областей потока

1. F.X. Trias, D. Folch, A. Gorobets, and A. Oliva. "Building proper invariants for eddy-viscosity subgrid-scale models", Physics of Fluids, 27:065103, 2015.

2. Shur M., Spalart P., Strelets M., Travin A. An Enhanced Version of DES with Rapid Transition from RANS to LES in Separated Flows. // Flow, turbulence and combustion, Vol. 95, Issue 4, pp. 709-737 (2015)

Immersed boundary conditions (IBC)

Объект, которому требуется высокая точность – согласованная с границей сетка (погранслои и т.п.)



Подвижный объект,
точность не критична

Область повышенного разрешения – там,
где может быть объект

Метод погруженных граничных условий

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

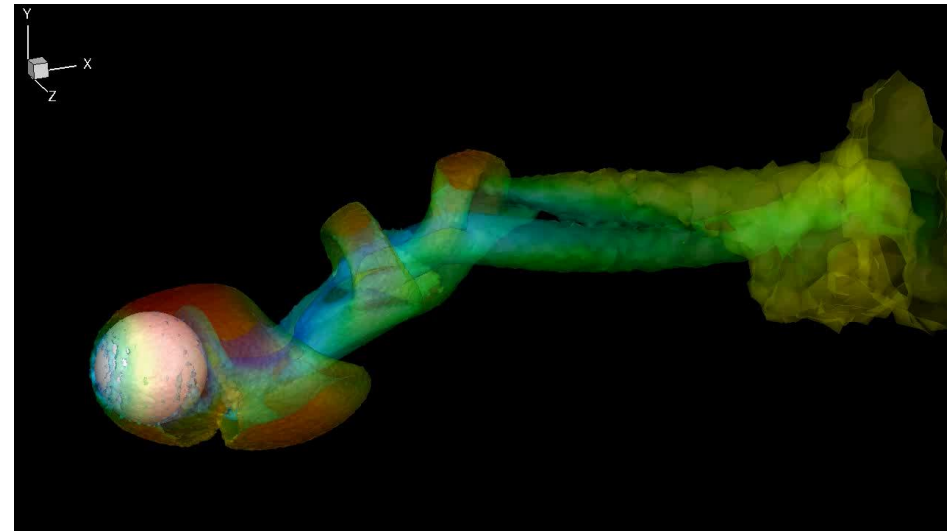
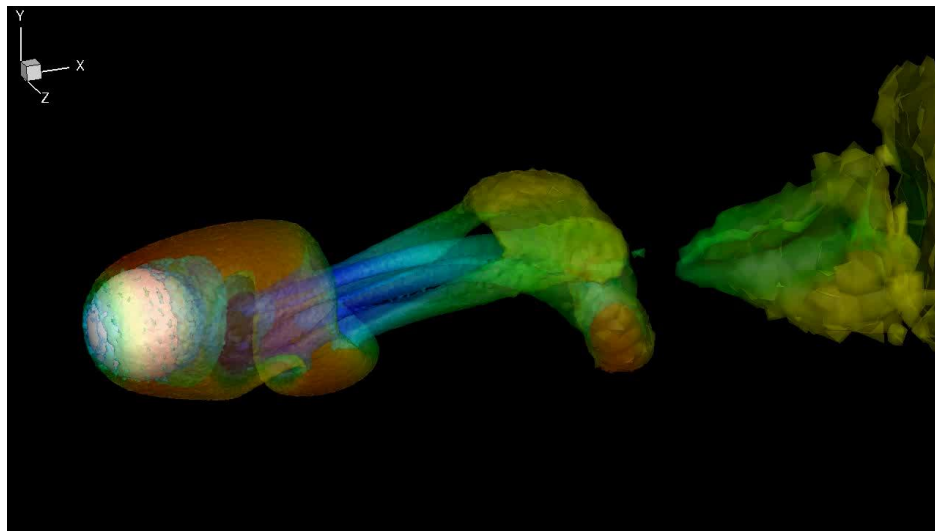
Объект, которому требуется высокая точность



И.В. Абалакин, Н.С. Жданова, Т.К. Козубская, Применение метода погруженных границ для моделирования задач внешней аэродинамики с различными граничными условиями // Доклады академии наук, 01/2015; 461(4):379-382.

Абалакин И.В., Горобец А.В., Жданова Н.С., Козубская Т.К. Применение метода Бринкмана штрафных функций для численного моделирования обтекания препятствий вязким сжимаемым газом // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014, № 11. 14 с.

IBC: Моделирование обтекания сферы

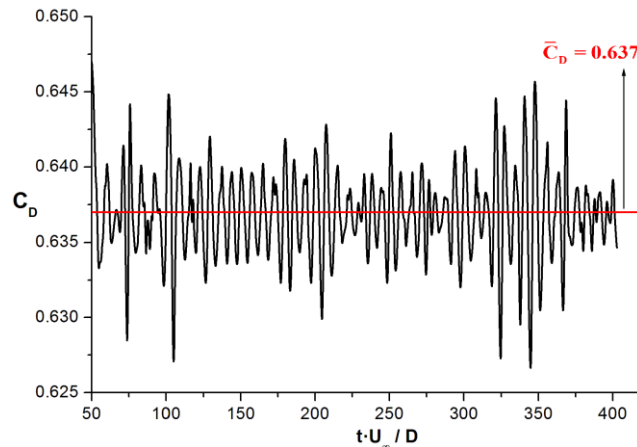


$Re = 350$

$M = 0.2$

$Sh = 0.143$

$C_D = 0.637$

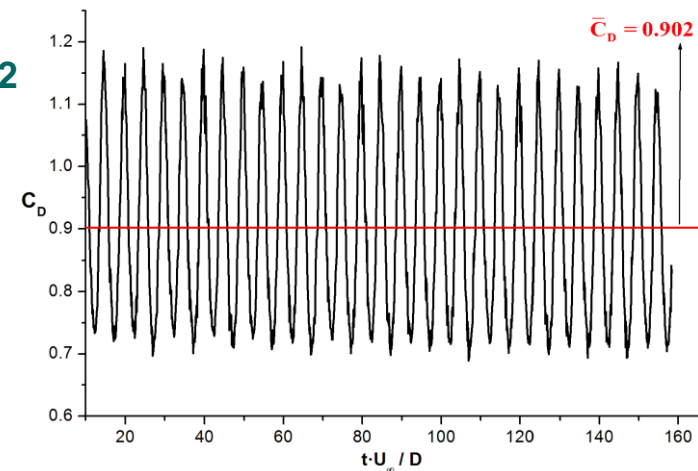


$$y = y_0 + \frac{1}{2} \sin(2\pi f_0 t)$$

$$v = \pi f_0 \cos(2\pi f_0 t)$$

$Sh = 0.2$

$C_D = 0.902$



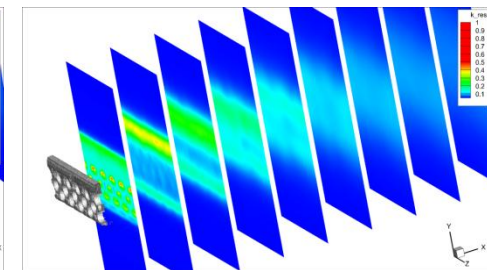
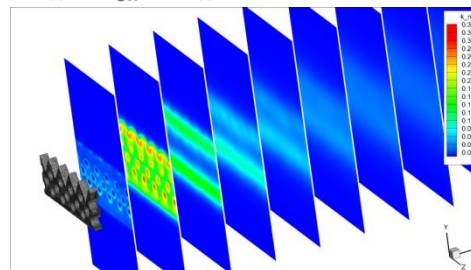
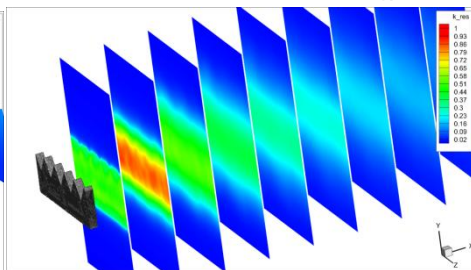
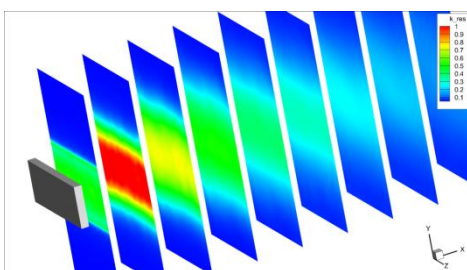
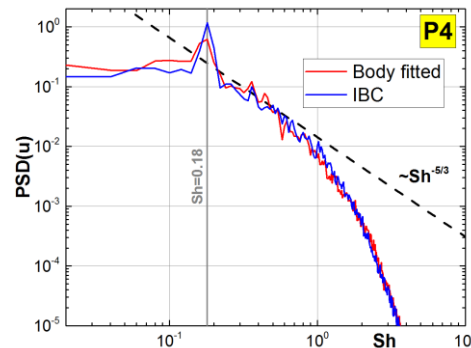
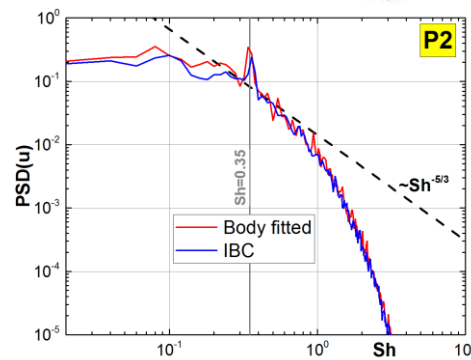
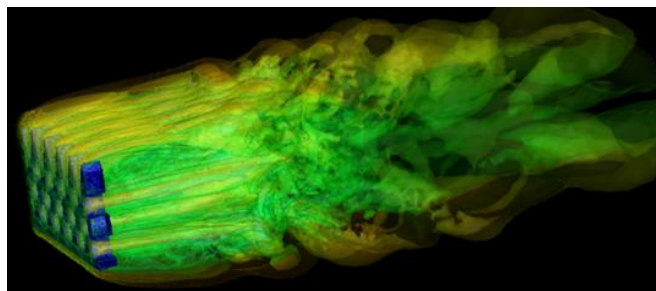
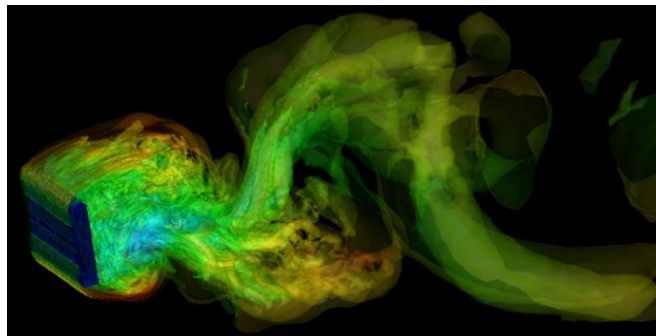
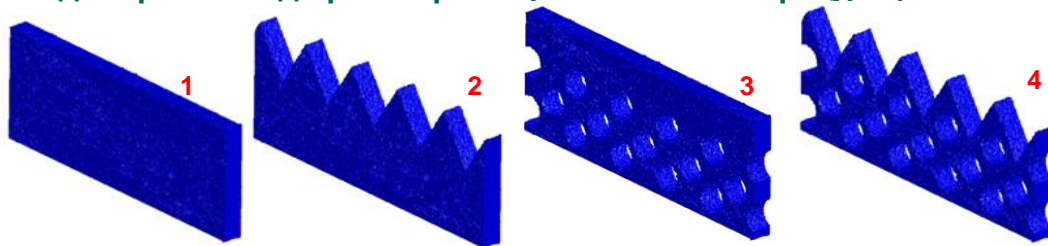
Матюшин П.В.

Численное моделирование пространственных отрывных течений однородной несжимаемой вязкой жидкости около сферы: дис. канд. ф.-м. наук (2003)

$C_D = 0.636$ $Sh = 0.141$

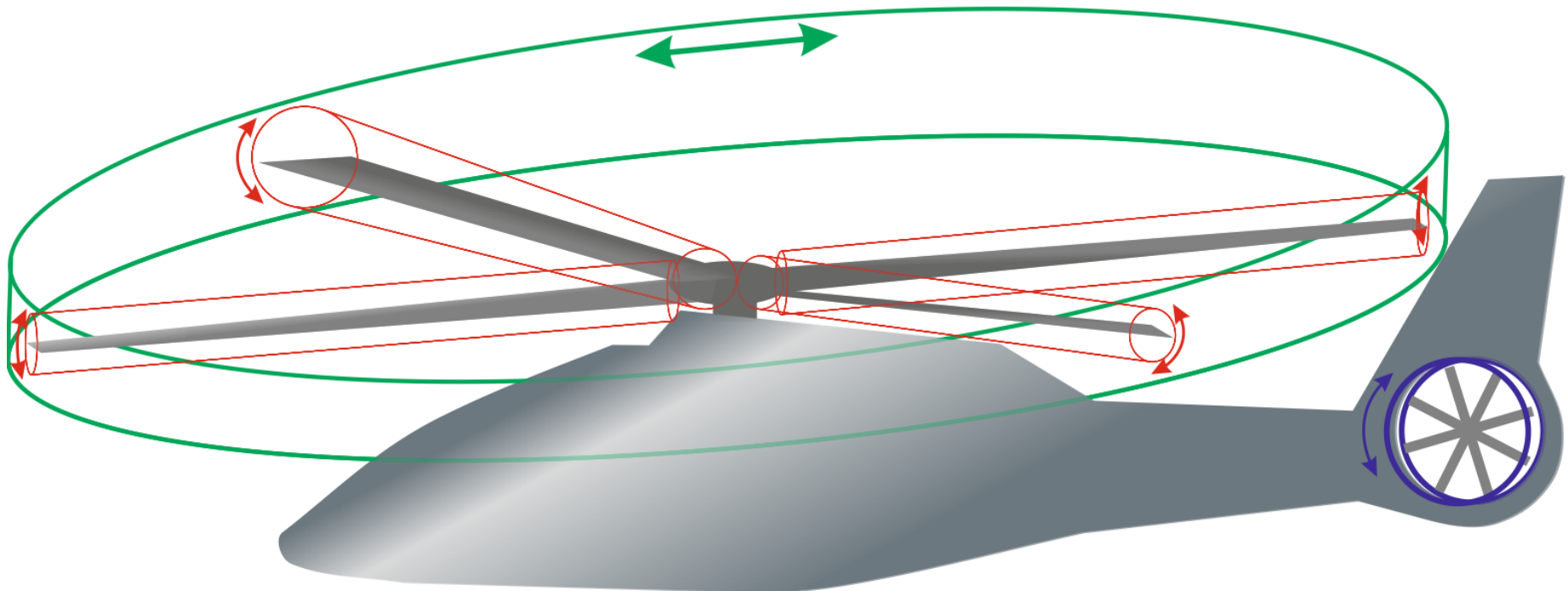
IBC: Исследование турбулентного течения и акустических нагрузок

• Моделирование дефлекторов в различных конфигурациях

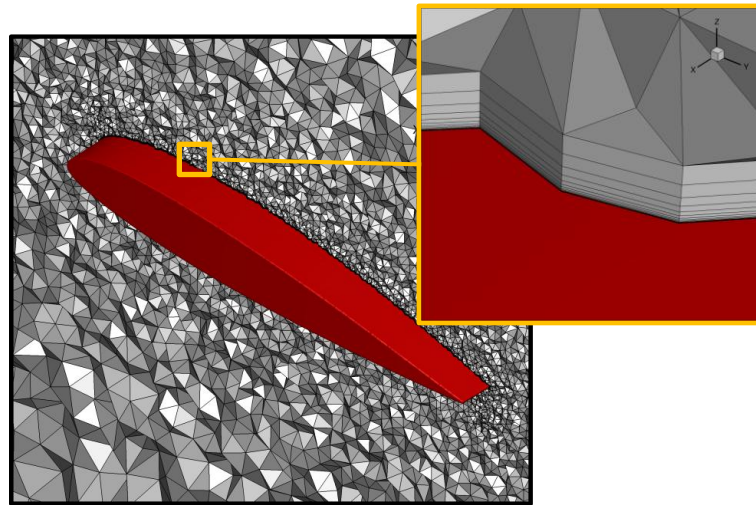
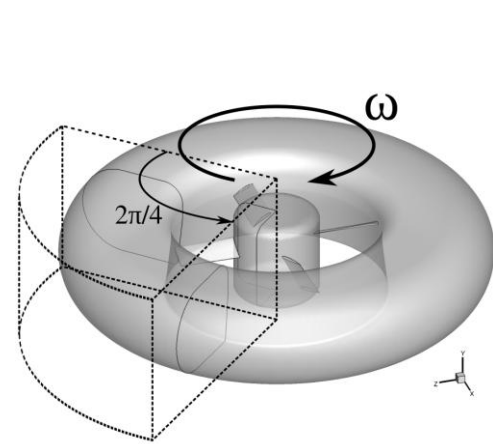


Скользящий интерфейс Scheiben

- Адаптация объёмно-центрированных схем с квазиодномерной реконструкцией переменных для расчётов на скользящих сетках
- Форма вращающихся подобластей цилиндрическая
- Допускаются вложенные подобласти, вращающиеся вокруг разных осей
- Реализовано для уравнений Эйлера и Навье-Стокса с сохранением 2-го порядка точности
- Корректная работа при применении лимитеров, технология WENO не поддерживается



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



Сетки до 6.4M узлов / 21M элементов

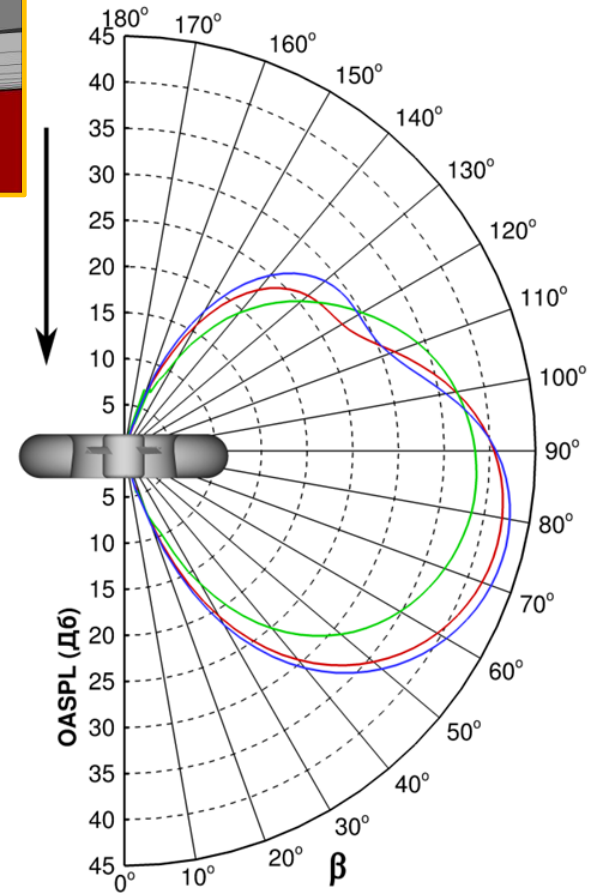
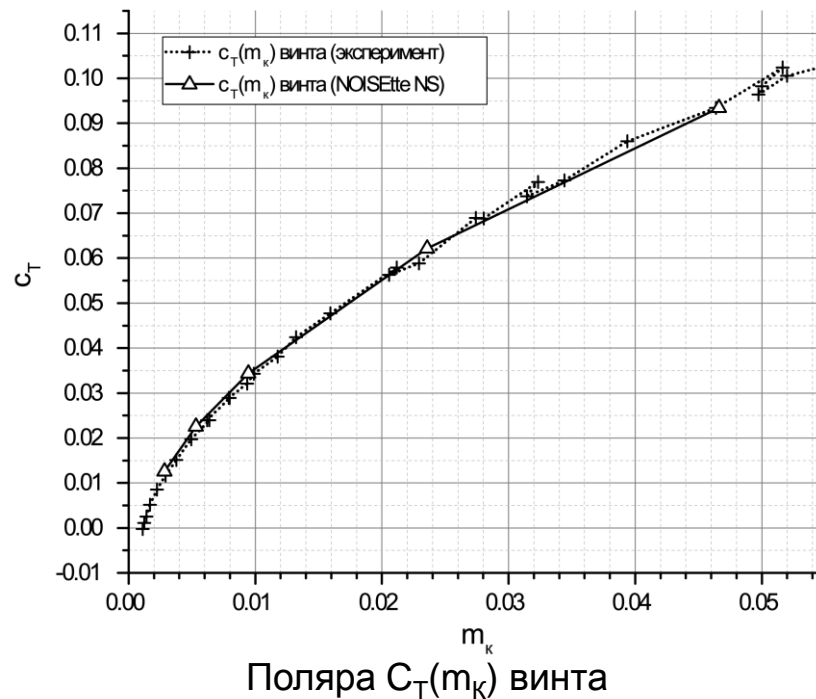
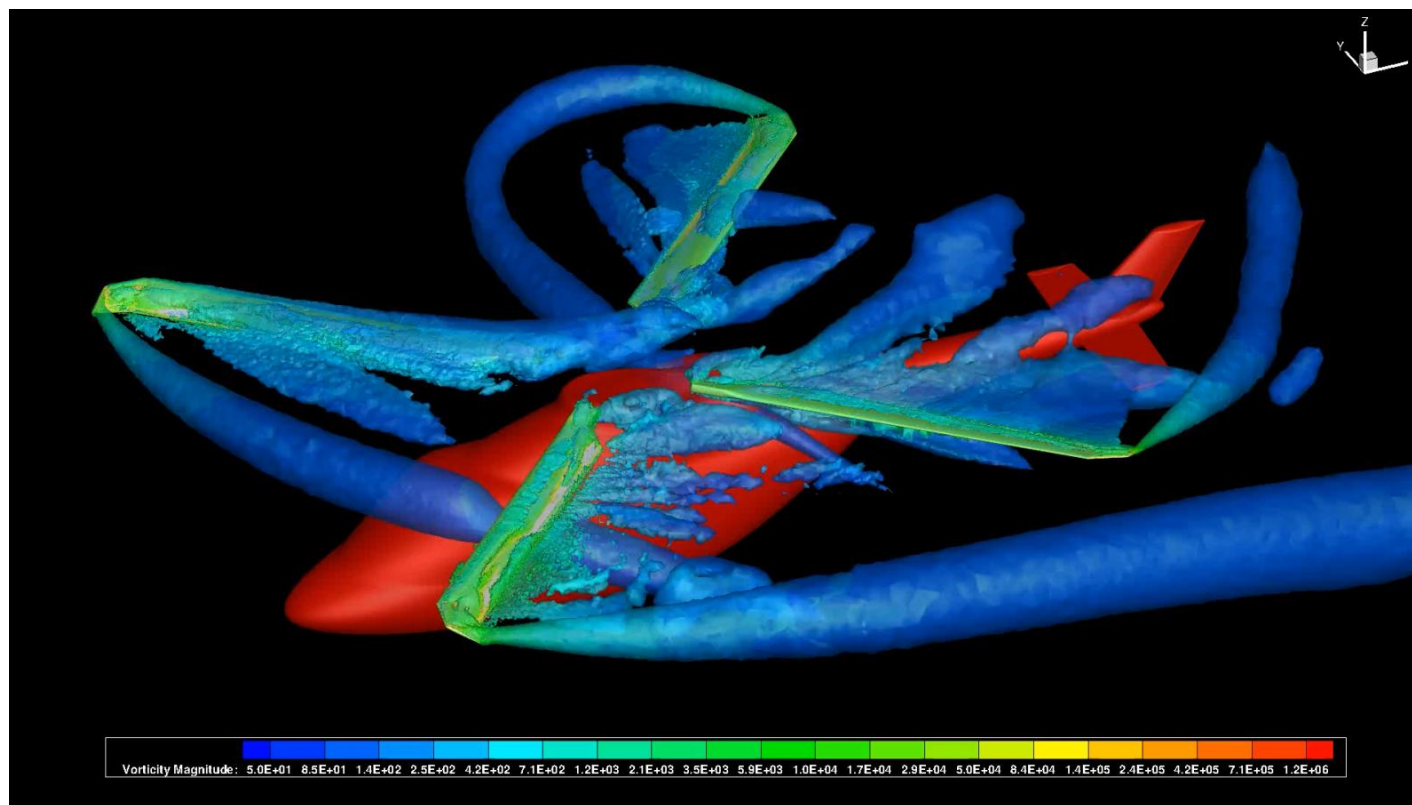


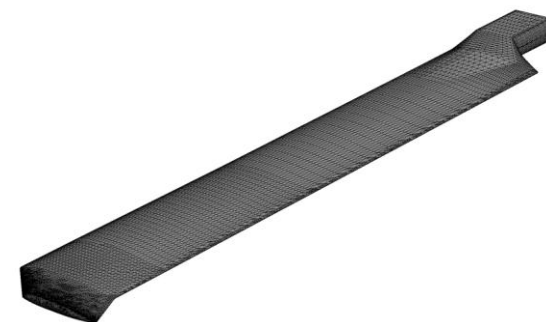
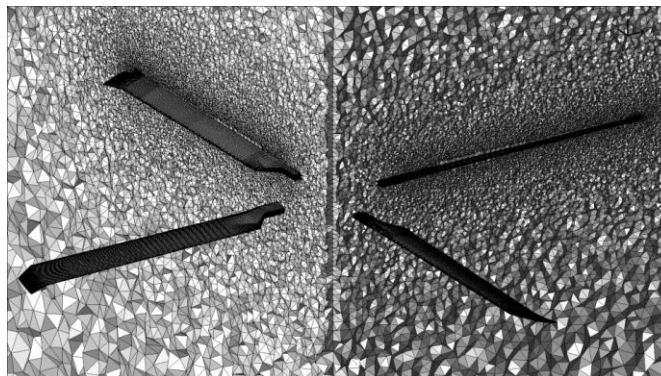
Диаграмма направленности, угол установки лопасти 30°

Исследование аэродинамики несущего винта (ПСВ)

4-лопастной винт, $R = 1.95$ м, хорда 0.18м, вращение 668 об/мин, $M=0.2$



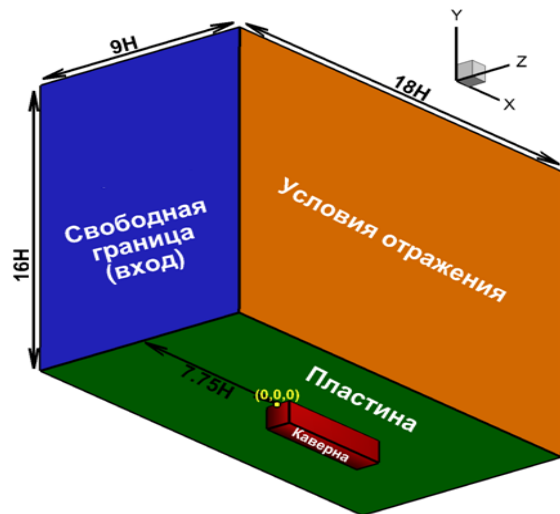
Угол установки лопасти	Число узлов	Число элементов
10°	2 833 910	12 212 904
10°	4 917 414	24 436 612



Исследование турбулентного течения и акустических нагрузок

Совместно с ЦНИИМаш для ОКБ Сухого

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

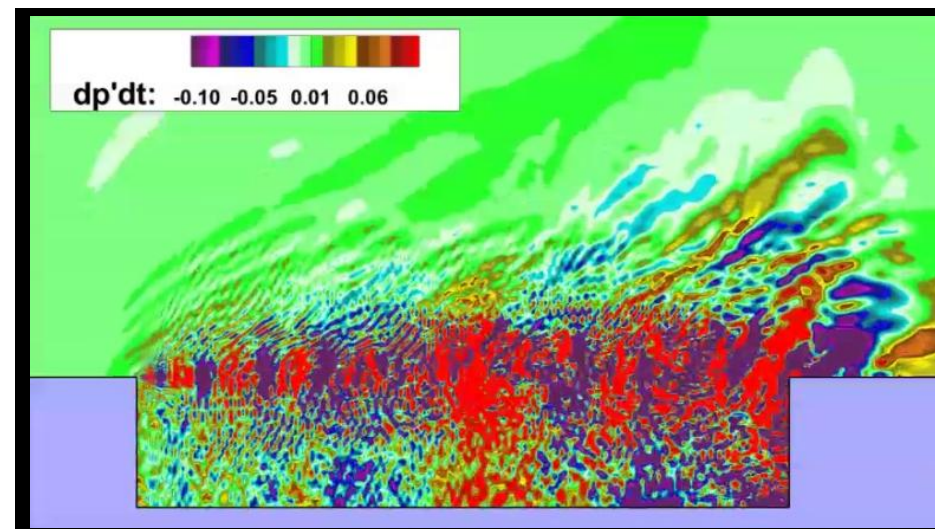
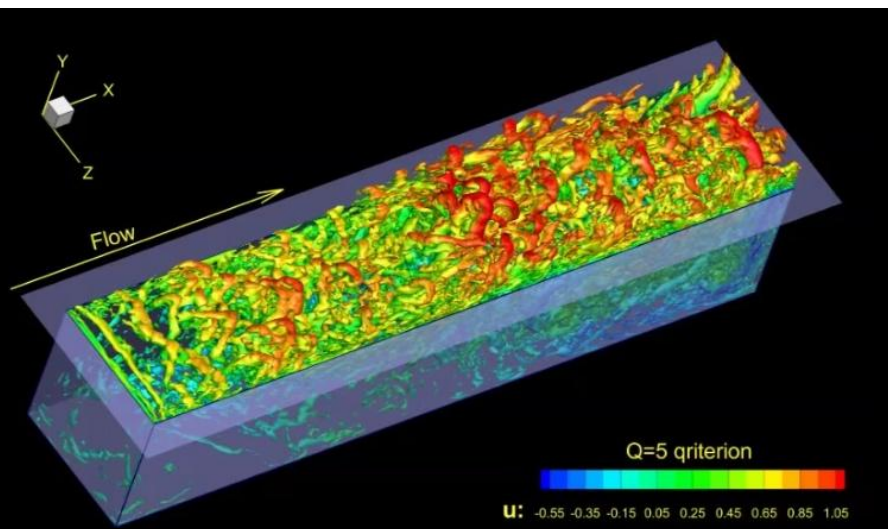


Нестационарное течение в каверне M219

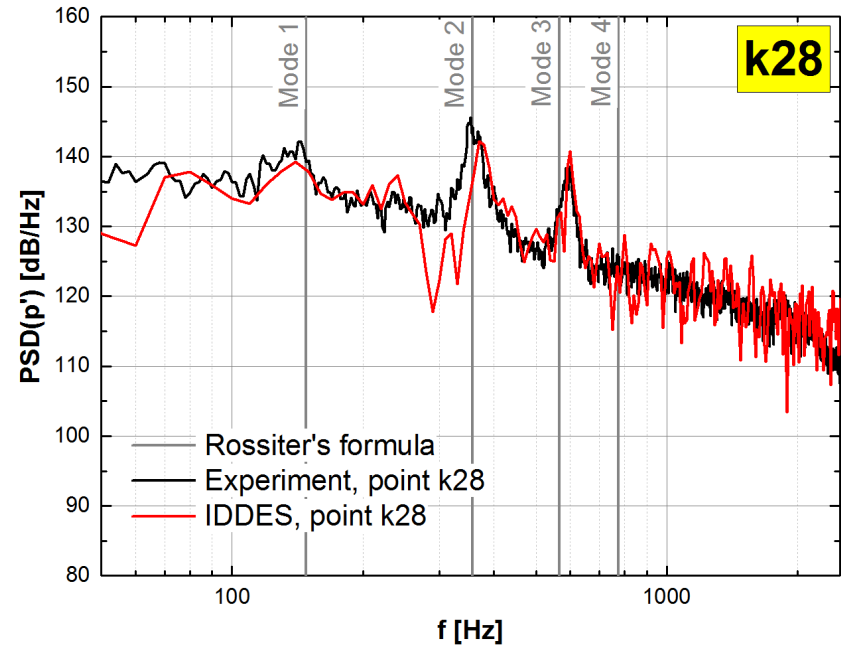
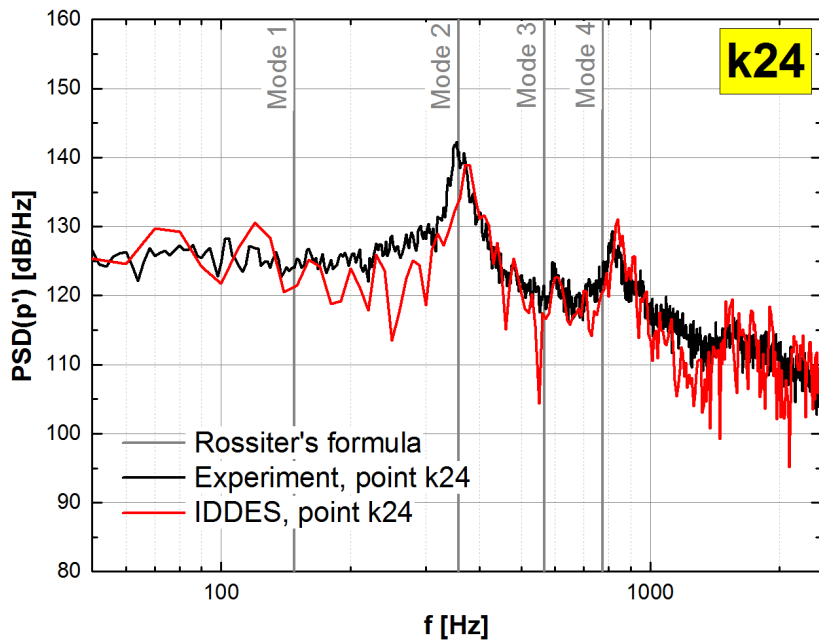
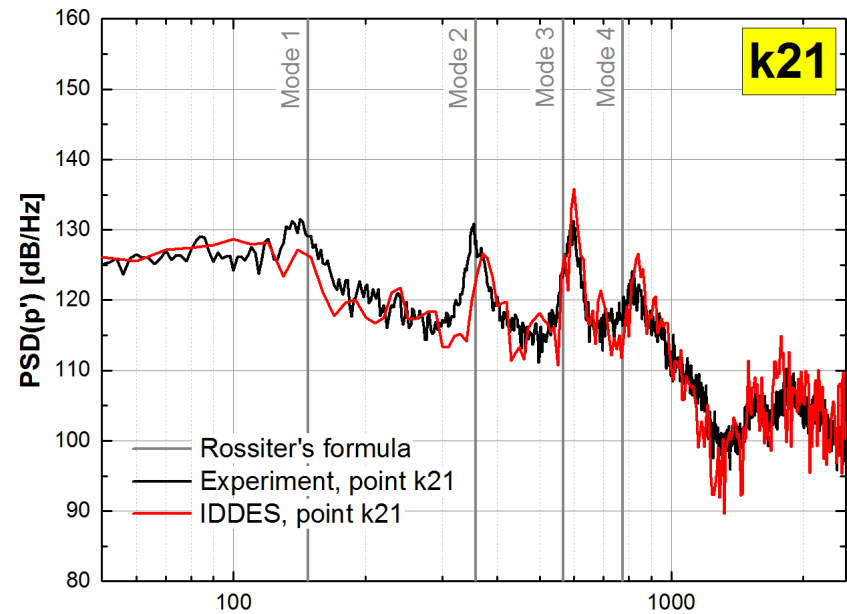
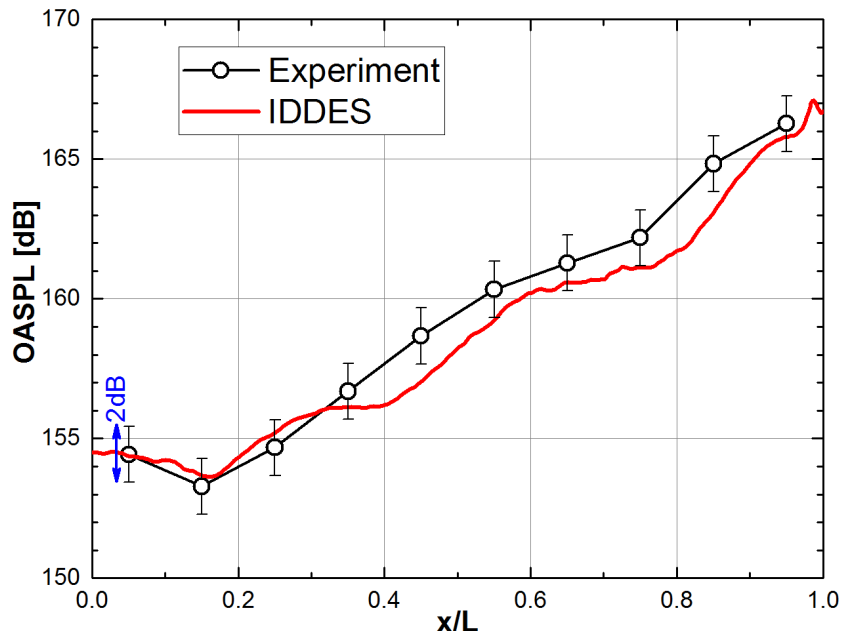
Параметры течения:

$Re = 13.47 \cdot 10^6$ $M_\infty = 0.85$

$H = 0.1016$ [м] $P_\infty = 6.21 \cdot 10^4$ [Па]

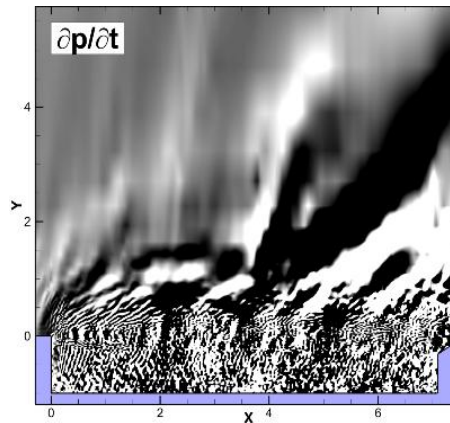
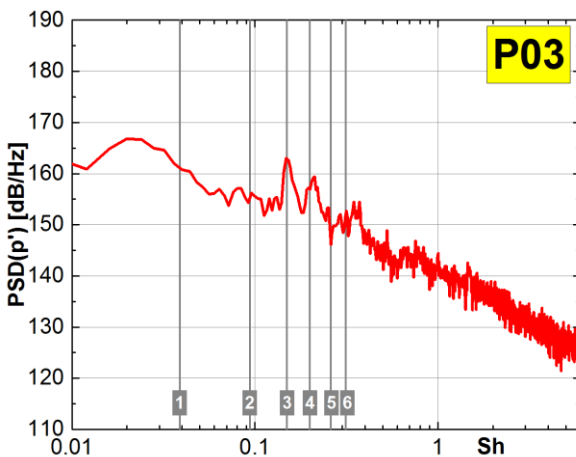
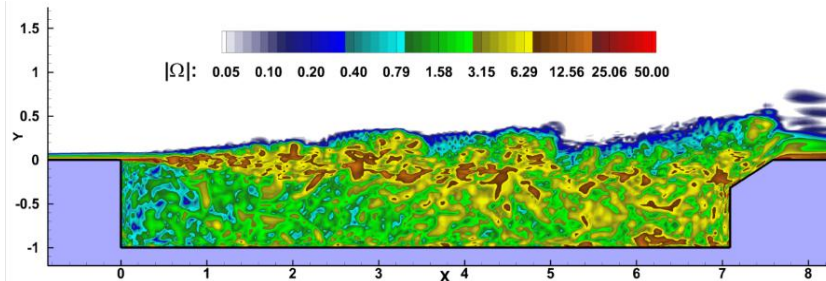
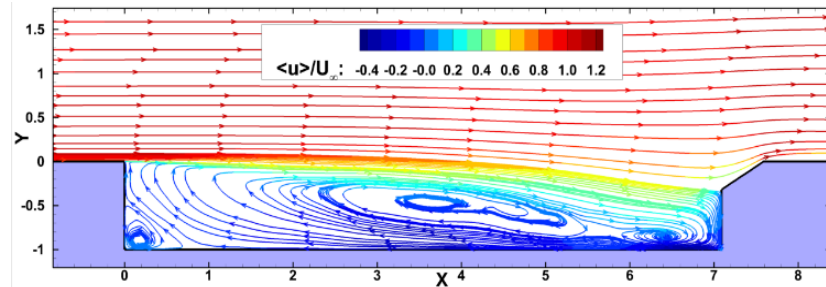
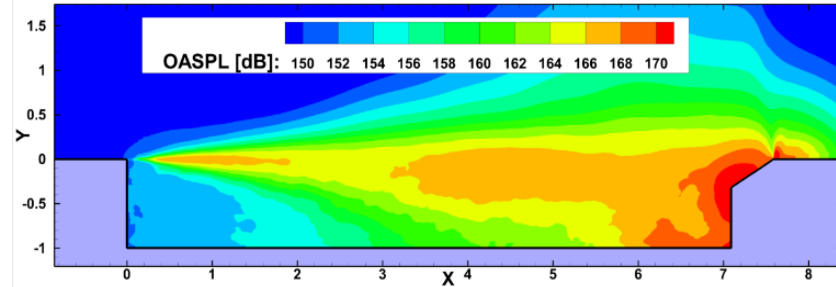
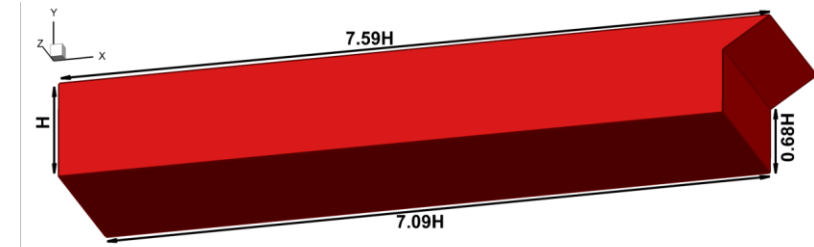
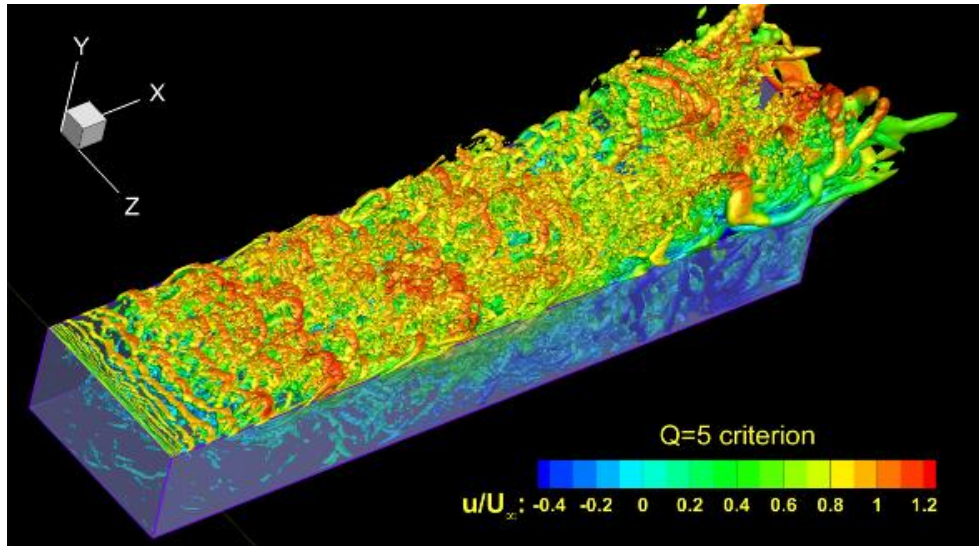


Задача о течении в каверне M219: сравнение с экспериментом



Задача о течении в каверне

Параметры течения: $Re_H=6.98 \cdot 10^6$, $M_\infty=0.8$



- Выявлены особенности и основные механизмы образования повышенных акустических нагрузок на стенки каверны
- Проводится моделирование течения возле каверны при наличии дефлектора на передней кромке каверны, изучается его влияние на акустические нагрузки

Дозвуковая струя

Параметры течения:

$$Re_D = 1.1 \cdot 10^6$$

$$M_{jet} = 0.9$$

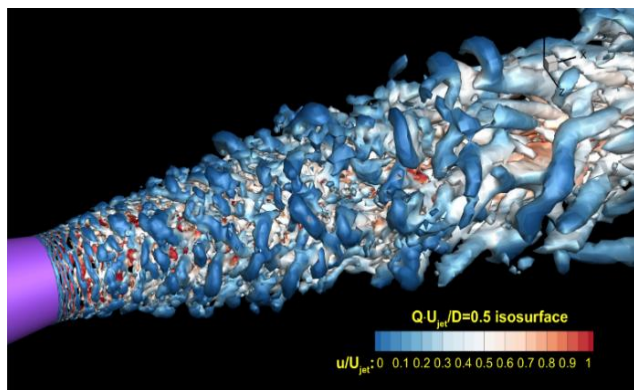
Цели:

- Тестирование новой версии вихреразрешающего подхода DDES (ADES)
- Доработка вычислительного алгоритма в рамках NOISEtte

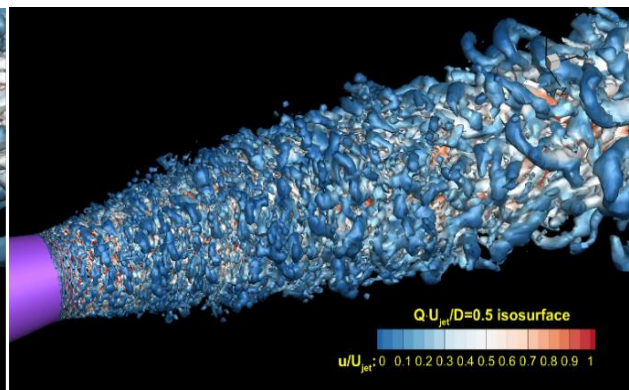
Параметры расчета:

- Сетки до 8.8 млн. узлов
- Одновременно задействовано 48-1024 ядер
- Суперкомпьютер: K100, Ломоносов

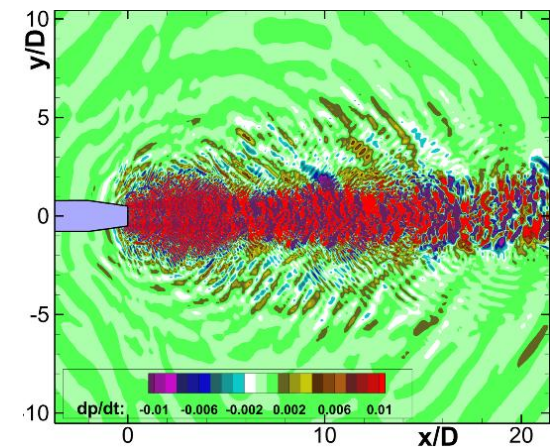
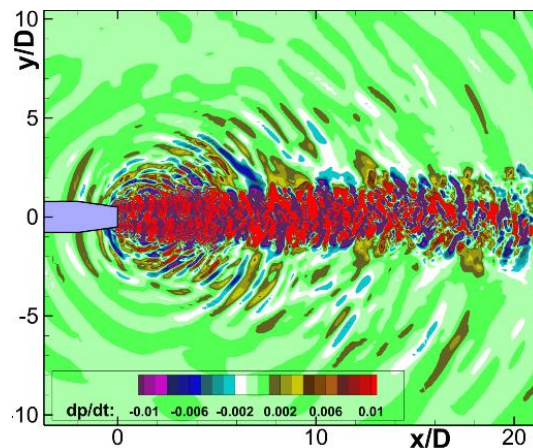
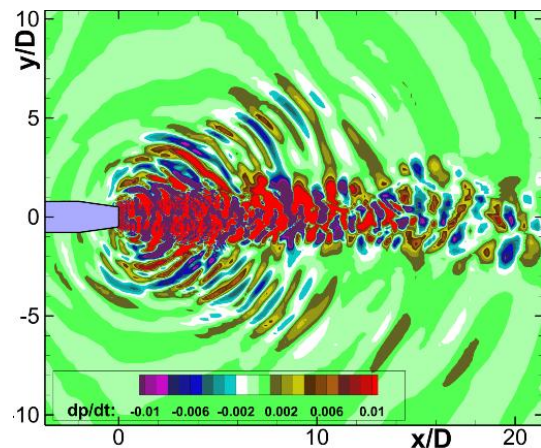
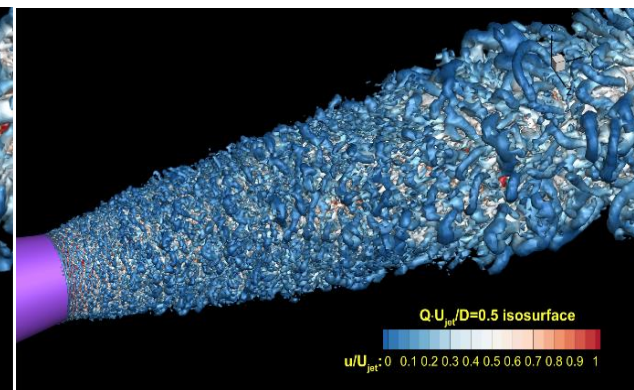
Сетка 1.5 млн:



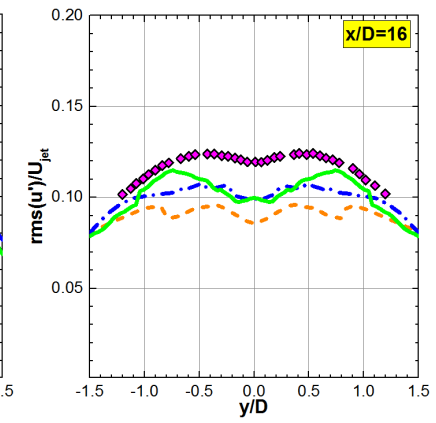
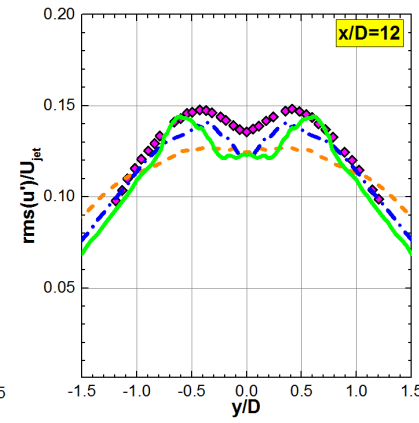
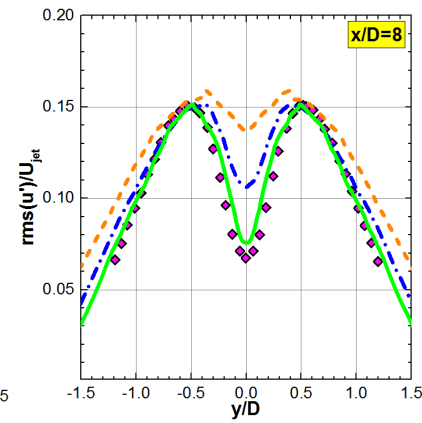
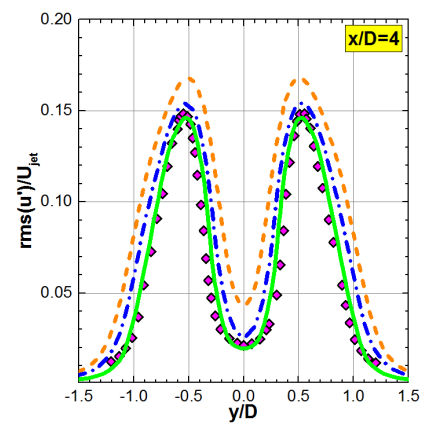
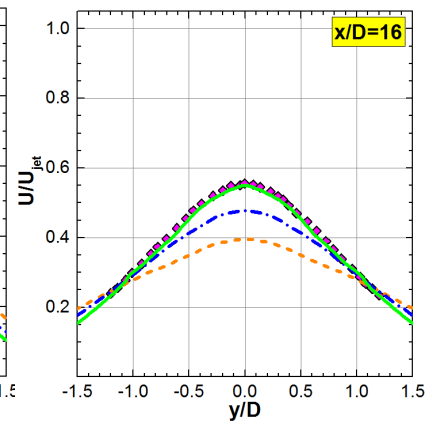
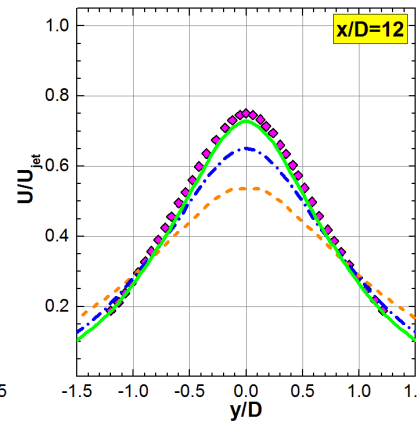
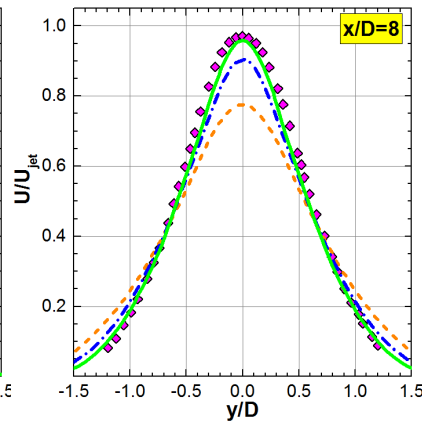
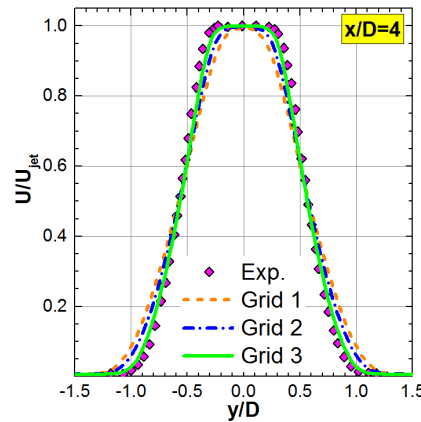
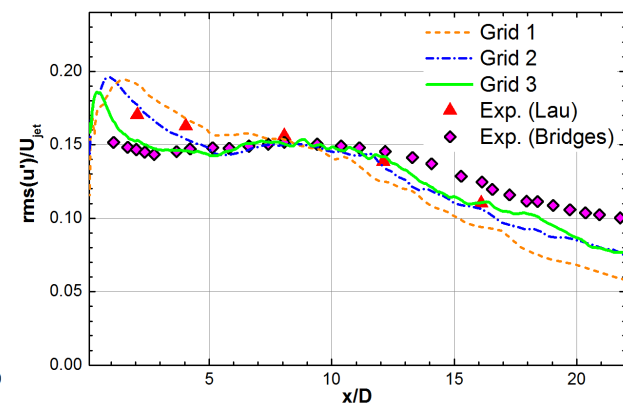
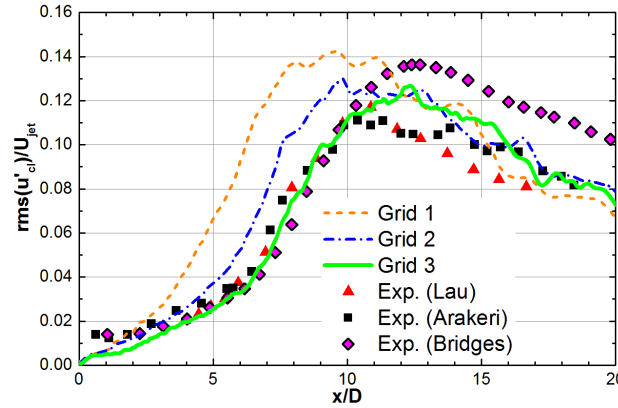
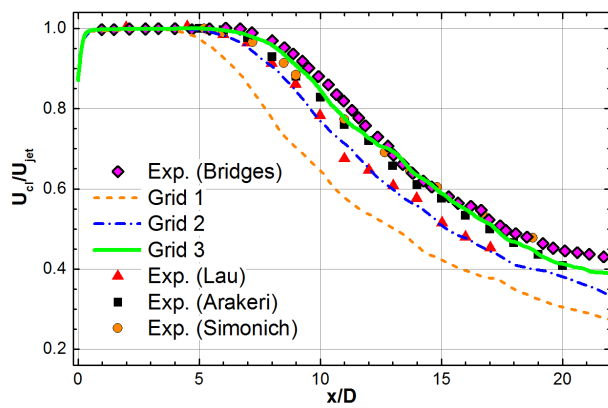
Сетка 4.1 млн:



Сетка 8.8 млн:

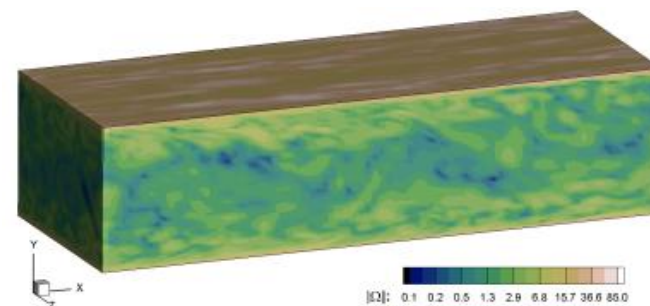


Дозвуковая струя: сравнение с экспериментом

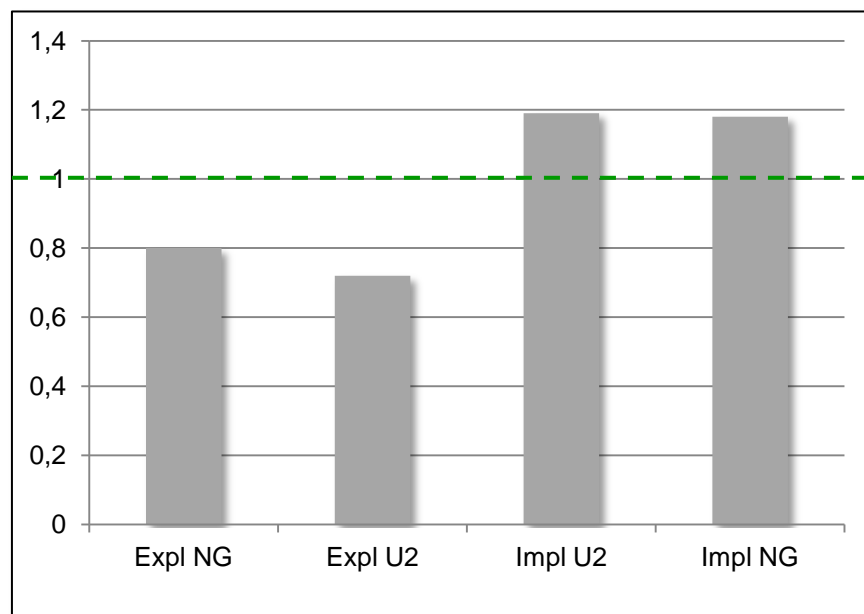


Новое многопоточное распараллеливание для Intel Xeon Phi

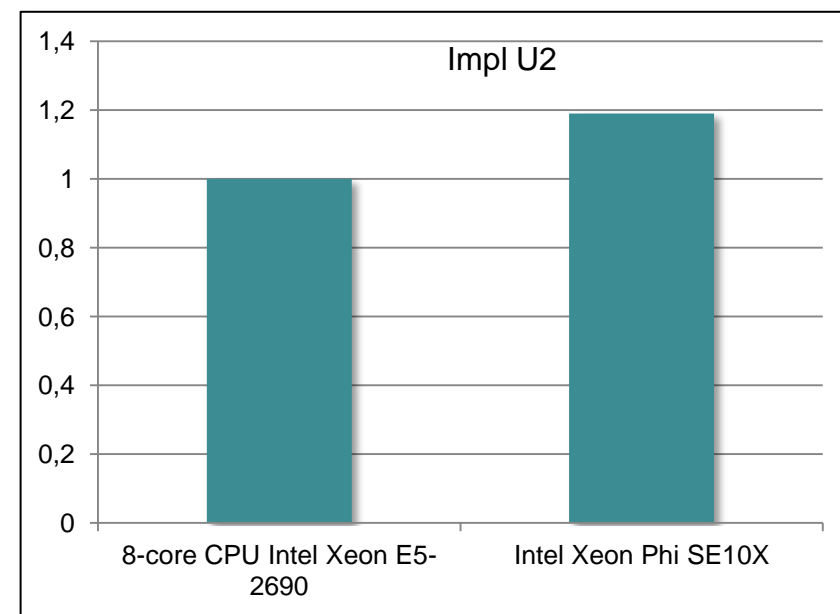
Операция	Внутреннее ускорение
Реконструкция конвективных потоков	124
Расчет диссипативных потоков	74
Расчет узловых градиентов	65
Общее	92



Установившееся течение в плоском канале



Сравнение относительной производительности для явных и неявных схем





Комплекс программ NOISEtte для CFD/CAA расчетов

NOISEtte 2016...

как мы доводили и отлаживали то, что понаделали в 2015 году ?

Спасибо за внимание!