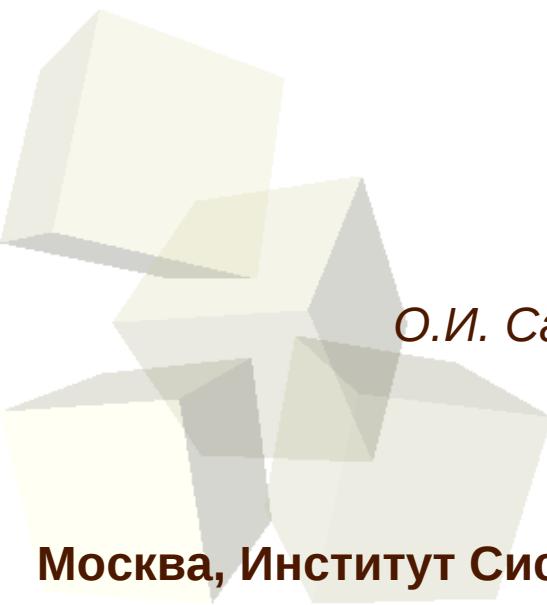




# Школа-семинар «Основы использования OpenFOAM, SALOME и ParaView»

## ВВЕДЕНИЕ



М.В. Крапошин (НИЦ Курчатовский институт)

О.И. Самоваров (Институт системного программирования РАН)

С.В. Стрижак (ГОУ ВПО МГТУ им. Баумана)



## ВВЕДЕНИЕ. СОДЕРЖАНИЕ

- Цели и задачи курса, структура материала
- Современное развитие открытых технологий для решения прикладных задач тепло- массообмена и механики конструкций
- Стек процесса решения задач МСС в среде UniHUB
  1. Технологическая платформа UniHUB
  2. Основы системного окружения ОС Linux для решения инженерных задач
  3. Работа с геометрией и расчетной сеткой в SALOME
  4. Решение задач методом К.О. в OpenFOAM
  5. Анализ результатов с помощью пакета ParaVIEW
- Другие примеры использования свободного инженерного ПО в промышленных расчетах



## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСА

### Цели:

- I. Современные методы пространственного гидродинамического и теплового анализа
- II. Использование свободного программного обеспечения при решении задач численного моделирования в ВГД
- III. Ознакомление со средствами, предоставляемыми инфраструктурами облачных вычислений

### Задачи:

- 1) Получение навыков работы с открытыми пакетами SALOME (работа с геометрией и сеткой), OpenFOAM (решение задач ВГД), ParaView (визуализация и анализ расчетных данных)
- 2) Стек инженера — SALOME — OPENFOAM — PARAVIEW.
- 3) Освоение возможностей кооперативной работы в среде web-лаборатории UniHUB
- 4) Знакомство с POSIX-совместимыми ОС (Linux)
- 5) Практикум проведения параллельных расчетов



## СТРУКТУРА КУРСА

### День I

1. Введение, обзор курса

2.1 Технологическая платформа UniHUB

2.2 Системное окружение

2.3 Подготовка геометрии и  
сетки - SALOME

2.4 Решение задач - OpenFOAM

2.5 Анализ результатов - ParaView

3. Лабораторные работы —  
разбор примеров  
SALOME, OpenFOAM

### День II

Лабораторные  
работы — разбор  
примеров типичных  
задач:

- а) обтекание бруса
  - б) обтекание  
цилиндра
  - в) обтекание сферы
  - г) течение в канале с  
поворотом
- Завершение



## ВВЕДЕНИЕ. СОДЕРЖАНИЕ

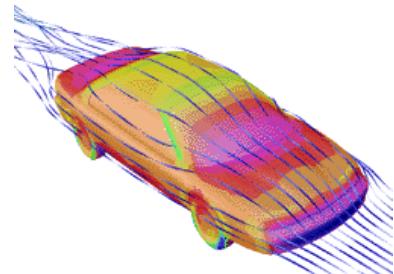
- Цели и задачи курса, структура материала
- Современное развитие открытых технологий для решения прикладных задач тепло-массообмена и механики конструкций
- Стек процесса решения задач МСС в среде UniHUB
  1. Технологическая платформа UniHUB
  2. Основы системного окружения ОС Linux для решения инженерных задач
  3. Работа с геометрией и расчетной сеткой в SALOME
  4. Решение задач методом К.О. в OpenFOAM
  5. Анализ результатов с помощью пакета ParaVIEW
- Другие примеры использования свободного инженерного ПО в промышленных расчетах



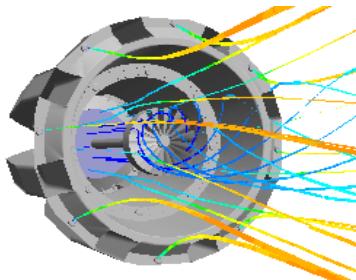
## СТЕК ПРОЦЕССА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МСС



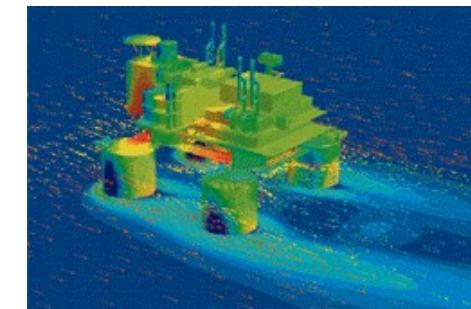
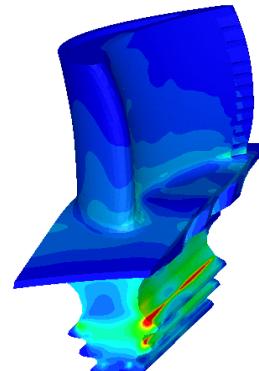
## Задачи МСС



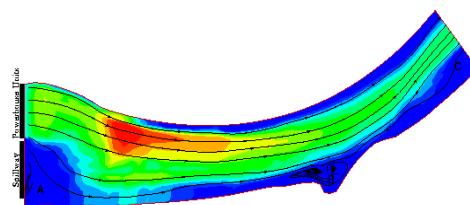
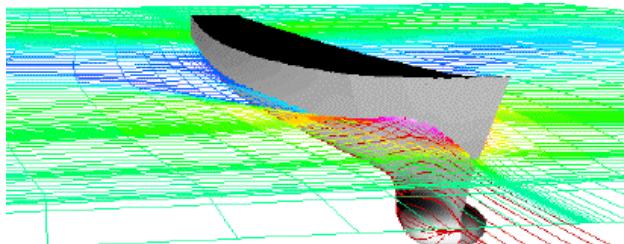
Автомобилестроение



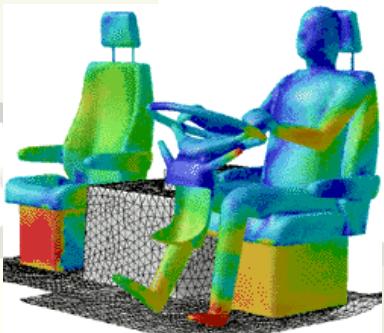
Энергомашиностроение



Нефтегазовая промышленность



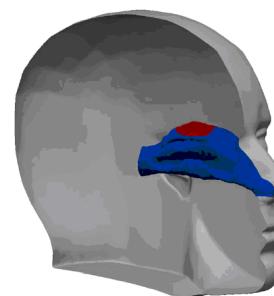
Гидродинамика судна



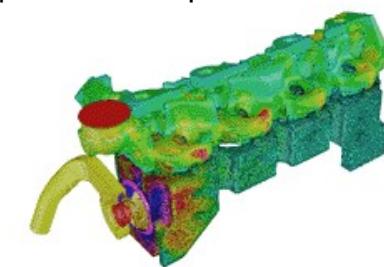
Климат контроль



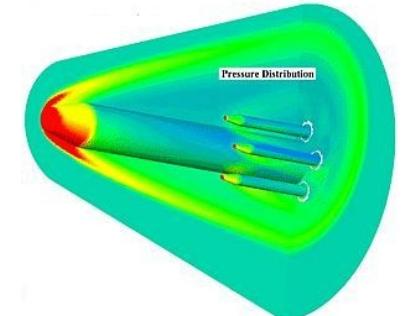
Ядерная энергетика



Биомеханика



Двигателестроение



Космонавтика



## Пакетизация идет с конца 80-х гг.

- Универсальные пакеты – PHOENICS, ANSYS, Nastran, FIDAP, StarCD, FIRE, FLUENT, CFX и др.
- Монополизация – слияние FLUENT и CFX на базе ANSYS
- **Ansys CFD** : Полная стоимость одного профессионального рабочего места в год составляет **55236 евро** с возможностью распараллеливания кода всего на 4 ядра, и далее:
  - 3-32 ядра за каждые 4: **1600** евро; 33-128 ядра за каждые 4: **540** евро;
  - Стоимость распараллеливания кода на 128 ядер составляет около 100 000 евро.
- **Российские пакеты:** FlowVision, SINF, GDT, VP2/3, SMILE
  - FlowVision - Коммерческая лицензия в год
  - Рабочее место 297000 руб.
  - Параллельный счет: 128 ядер= 3.2 млн руб.
  - Академическая лицензия: только бессрочная
  - Стоимость рабочего места 124000 руб.
  - Стоимость распараллеливания кода на 128 ядер составляет 795 000 руб.
- Кризис – Д. Б. Сполдинг (2007): «Коммерческий пакет – тормоз развития»!
- 2010-2011: Национальные программы по внедрению СПО (Великобритания, Голландия, Россия)



## Свободное Программное Обеспечение для задач МСС

### open-source „process chain“

- geometry modelling
  - Blender
  - Salome
- geometry import and surface meshing
  - Gmsh
  - NETGEN
- isentropic volume meshing (tetras)
  - NETGEN
  - Tetgen → ATTENTION: not allowed for commercial applications, NOT OPEN-SOURCE
- an-isotropic boundary layer grids
  - ... → Engrid
- solver
  - OpenFOAM
  - Code Saturne
  - Elmer
- visualisation
  - ParaView
  - Open Data Explorer



# День I, Модуль 1. Введение

## CAE Linux I

CAELinux 2010 базируется на Linux Ubuntu 10.04 LTS 64bit и содержит большое количество open source пакетов:

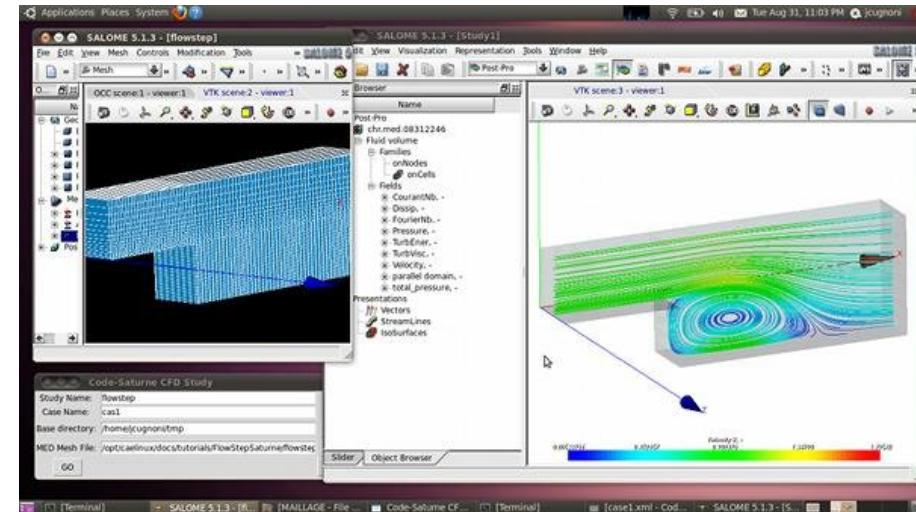
Salome\_Meca 2010,  
Code-Aster 10.1,  
Code-Saturne 2.0,  
OpenFOAM 1.7,  
Elmer 5.5 и другие.

CAELinux 2010 представляет собой набор дистрибутивов с up-to-date software.

Начало разработки в 2006 году  
Разработка в Швейцарии

(<http://www.caelinux.com/CMS/>)

Москва, Институт Системного Программирования РАН



Релиз доступен в форме liveDVD ISO image, который может быть загружен на DVD либо проинсталлирован на USB флешку для "mobile" использования и тестирования  
Возможна установка на HDD



## CAE Linux II

CaeLinux Предназначен для CAE , научных расчетов и математического моделирования с использованием МКЕ и МКО для задач гидродинамики и прочности

Включает в себя 3D pre-/ post / FE solver package

**SALOME\_MECA 2010** (GPL, developped by EDF, France) which represents the fusion of Salome v5.1.3 GUI and **Code-Aster STA10.1** finite element solver (updated, GPL)

Предлагает полный стэк для CFD (Computational Fluid Dynamics)  
**OpenFOAM 1.7** , **Gerris** and **Code-Saturne 2.0** solvers

Содержит различные 2D & 3D CAD/pre/post пакеты: Paraview, OpenDX, EnGrid 1.2, Elmer GUI, Netgen, Tetgen, GMSH v2, Salome v.5.1.3 & QCad

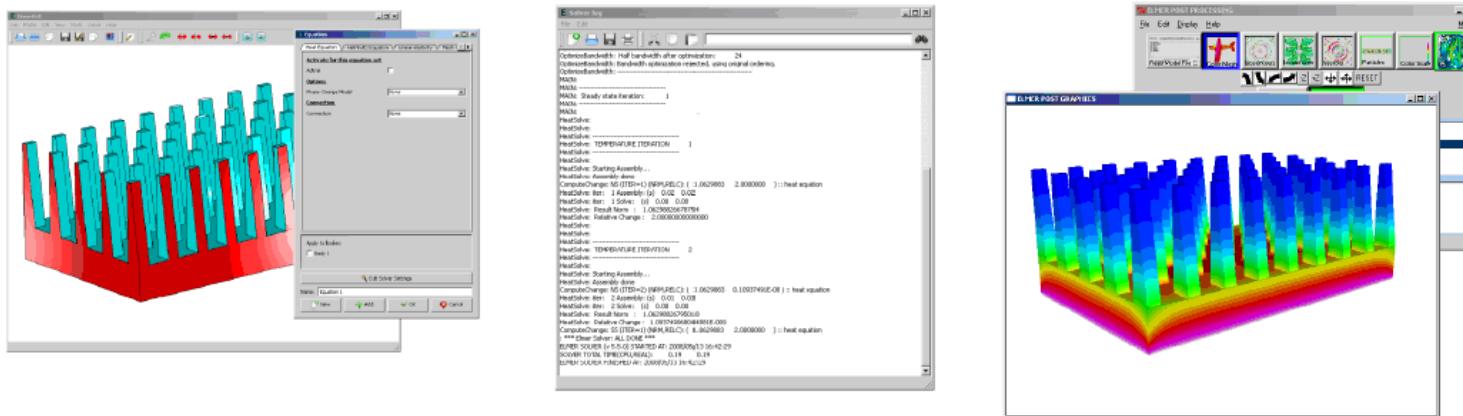
Включает различное ПО для задач мультифизики:

**Elmer v5.5** , **Calculix v2.1**, Impact, MBDyn, Dynela, Fenics

Различные научные программы как GNU Octave (+ QtOctave GUI ), R & Rkward, Scilab, wxMaxima, Scipy, Latex.

[www.csc.fi/elmer](http://www.csc.fi/elmer)

## Elmer – A finite element software for multiphysical problems



ElmerGUI + ElmerSolver + ElmerPost  
ElmerGrid  
ElmerFront



## Реализованные в Elmer модели

- Heat transfer
  - Heat equation
  - Radiation with view factors
  - convection and phase change
- Fluid mechanics
  - Navies-Stokes (2D & 3D)
  - Turbulence models:  $k-\varepsilon$ ,  $v^2-f$
  - Reynolds (2D)
- Structural mechanics
  - Elasticity (unisotropic, lin & nonlin)
  - Plate, Shell
- Free surface problems
  - Lagrangian techniques
  - Level set method (2D)
- Mesh movement
  - Extending displacements in coupled problems
  - ALE formulation
- Acoustics
  - Helmholtz
  - Linearized time-harmonic N-S
- Species transport
  - Generic convection-diffusion equation
- Electromagnetics
  - Electrostatics & harmonics
  - Magneticstatics
- Electrokinetics
  - Poisson-Boltzmann
  - Poisson-Nernst-Planck
- Quantum mechanics
  - DFT (Kohn Scham)
- ....

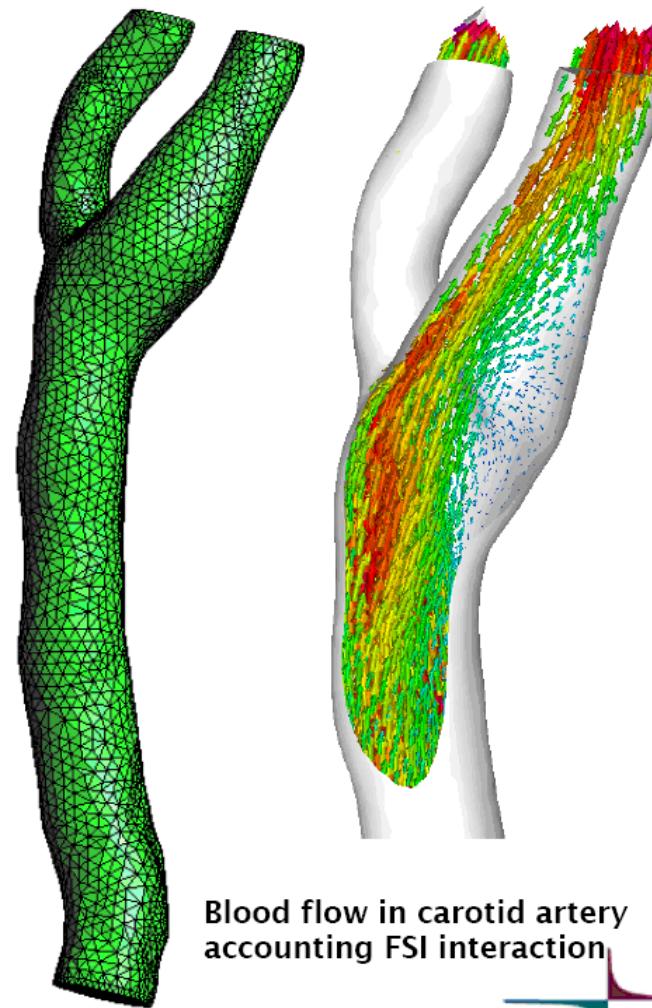


CSC

## Elmer: вычислительная гемодинамика

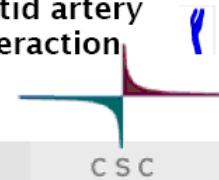
### Computational Hemodynamics

- Cardiovascular diseases are the leading cause of deaths in western countries
- Calcification reduces elasticity of arteries
- Modeling of blood flow poses a challenging case of fluid-structure interaction
- Artificial compressibility is used to enhance the convergence of FSI coupling

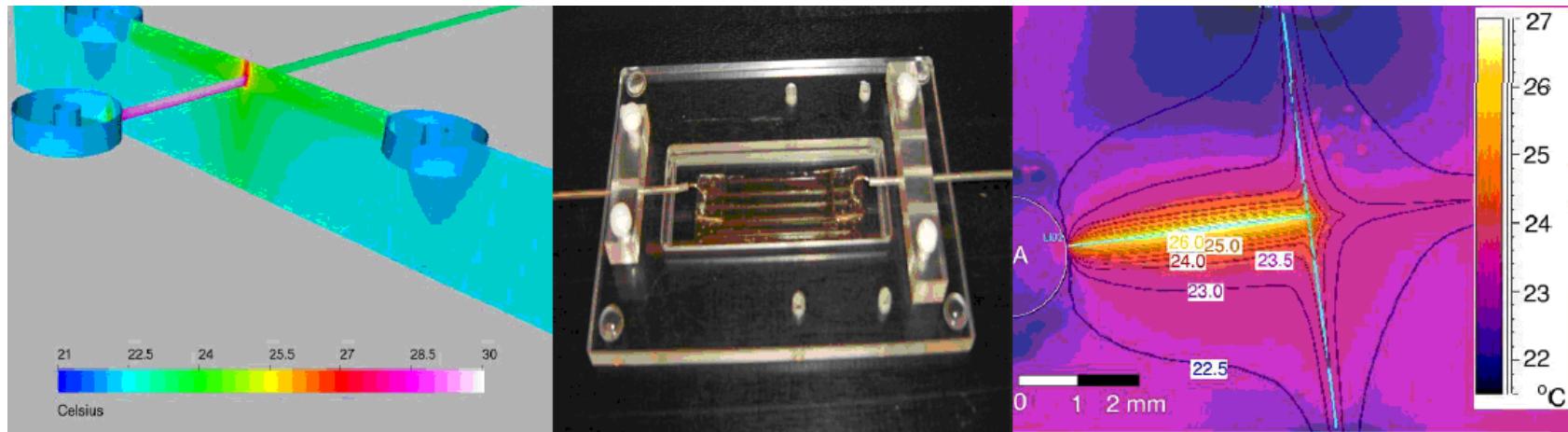


Blood flow in carotid artery accounting FSI interaction

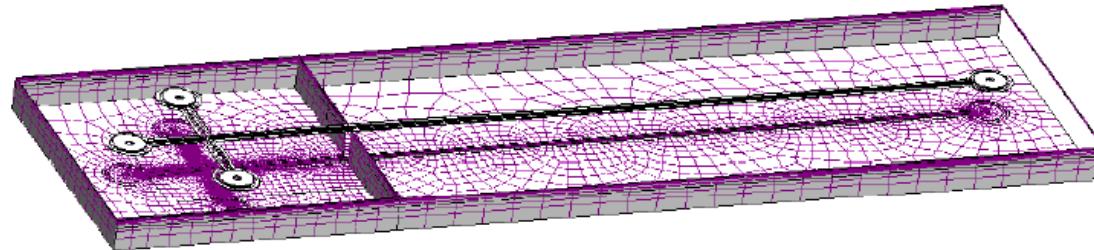
E. Järvinen, P. Råback, M. Lly, J. Saloni. A method for partitioned fluid-structure interaction computation of flow in arteries. *Medical Eng. & Physics*, 30 (2008), 917-923



## Elmer: теплообмен в микросхемах



- Electrokinetically driven ffc
- Joule heating
- Heat Transfer influences performance
- Elmer as a tool for prototyping
- Complex geometry
- Complex simulation setup



T. Sikanen, T. Zwinger, S. Tuomikoski, S. Franssila, R. Lehtiniemi, C.-M. Fager, T. Kotiaho and A. Pursula, Microfluidics and Nanofluidics (2008)



CSC



## ПРОЕКТ NURESIM — SALOME, CODE\_ASTER, CODE\_SATURNE

NURESIM - NUclear Reactor SIMulation integrated project

<http://www.nuresim.com>

18 Организаций  
13 Стран

Цели проекта:

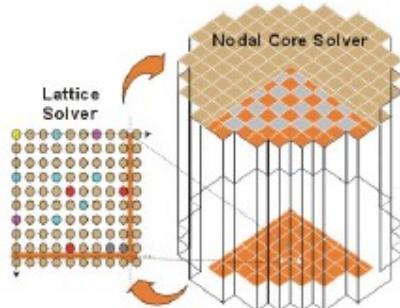
- а) Создание Европейской программной платформы для сопряженного моделирования нейтронной физики, тепло-гидравлики и мультифизики
- б) Реализация базовых инструментов Анализа Неопределенности и Анализа Чувствительности
- в) Тестирование платформы по экспериментальным данным и бенчмаркинг



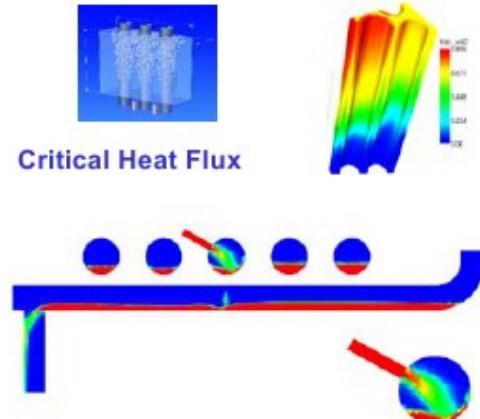


## СТРУКТУРА ПРОЕКТА NURESIM

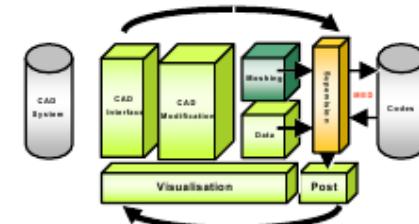
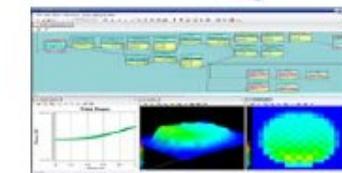
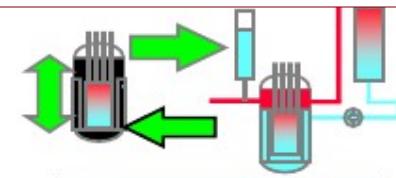
Нейтронная физика



Теплогидравлика



Мультифизика



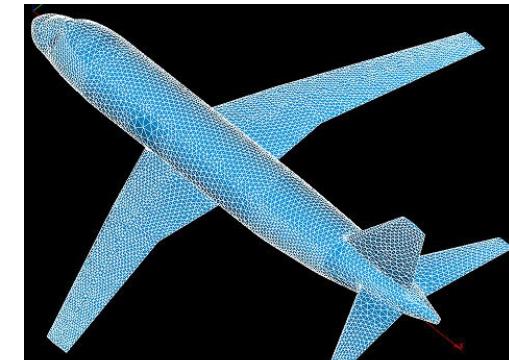
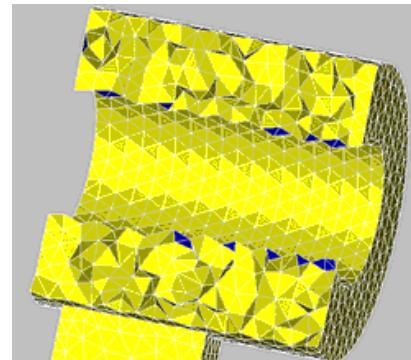
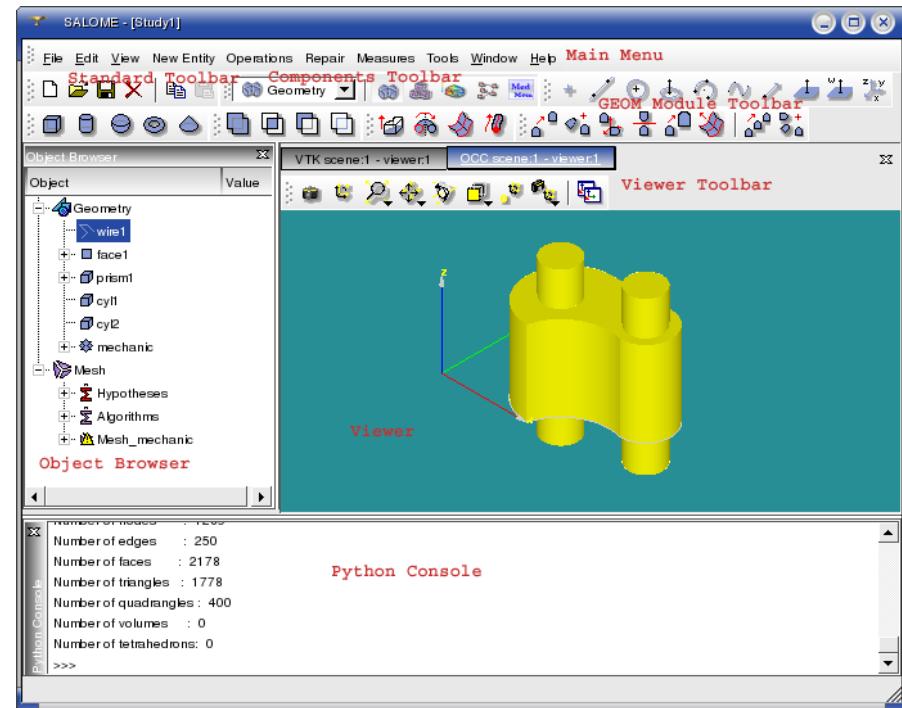
Инструменты анализа  
неопределенности и анализа  
чувствительности.

Интеграция через  
SALOME



## Salome (EDF, CEA, OpenCASCADE)

- **Salome** - является бесплатным программным обеспечением, которое предоставляет платформу для Пре и Пост-обработки данных.
- Основано на открытой и гибкой архитектуре, сделанной из компонентов многократного использования.
- **Salome** - CAD/CAE интегрированная платформа. С помощью программы возможно:
  - Трехмерное моделирование;
  - Генерация сетки и Визуализация;
  - Управление вычислительными схемами;
  - Постобработка
- **Salome** разработана для интеграции отдельных компонентов:
  - Интерфейсы автоматизированного проектирования;
  - Генераторы ячеек сетки модели;
  - Средства для решения задач с использованием конечных элементов;
  - Платформа Salome – это продукт с открытым исходным кодом.



## Code\_Aster's Possibilities

<http://www.code-aster.org/>

### Phenomena

#### Mechanical

- Static, quasi-static, linear or otherwise
- Dynamic, linear or otherwise, on a physical or modal basis
- Fracture, damage and fatigue
- Soil-Structure, Fluid-Structure and Soil-Fluid-Structure interactions

#### Thermal

- Stationary, transient, linear or otherwise
- Fixed or moving reference coordinate system

#### Associated phenomena

- Acoustics
- Metallurgy
- Hydration and drying

### Analysis Types

#### Standard

- Decomposition into Fourier modes
- Substructuring
- Model superposing, multiscale
- Adaptive mesh
- Sensitivity calculation
- Fitting and optimization
- Mechanical reliability calculation

### Multiphysical

#### Internal links with thermics

- Hydration, drying
- Metallurgy

#### Internal links with mechanics

- Thermal
- Metallurgy
- Hydration and drying

#### Internal couplings

- Thermo-hydro mechanical
- Fluid-Structure

#### External coupling with other codes

- Soil-Fluid-Structure (MISS3D)

#### External links with other codes

- Hydraulics: Code\_Saturne
- Thermal: SYRTHE5
- Electromagnetism: Flux2D/3D
- Fast dynamics: EUROPLEXUS

### Loadings

#### Mechanical

- Nodal or distributed forces
- Pressure
- Inertia loading
- Centrifugal acceleration
- Imposed movements
- Anelastic strain
- Effect of wind

#### Thermal

- Temperature
- Flows, linear or otherwise
- Forced convection
- Exchange between walls
- Heating by Joule effect

#### Specific loads (following forces, electromagnetic forces, initial states)

### Nonlinearities in static and dynamic

#### Geometrics

- Geometric updating, large displacements, large rotations
- Following forces
- Continuation methods: In displacement, by arc length, In strain, by criterion output
- Load discharge and non-radiality Indicators

- Contact and friction: by a discrete contact method (active stresses, penalization, conjugated projected gradient or by an augmented Lagrangian method.)
- First order buckling

#### Materials (95 constitutive laws)

- Linear and nonlinear elasticity
- Nonlinear hyperelasticity
- Local elastoplasticity and elasto-plasticity with gradient formulation
- Nonlinear viscoelasticity
- Local and with gradient formulation damage
- Elastoviscoelasticity
- Metallurgical effects
- Material data dependent on temperature, metallurgical condition, hydration, drying and fluence
- Progressive strain
- Hydration, shrinkage and creep of concrete
- Geomaterials

### Dynamics

#### Modal analysis

- With or without damping (viscous, hysteretic, modal)
- Direct or by substructuring
- Normalization, filtering, modal parameters

#### Linear transient response

- Direct
- On modal basis
- By substructuring

#### Transient response with local nonlinearities (on modal basis)

- Shocks
- Friction
- Rigid blade

#### Harmonic response

- Direct
- On modal basis
- By substructuring

#### Random response

- Parametric and nonparametric probabilistic
- Stochastics

#### Direct nonlinear analysis

- Implicit
- Explicit
- Shocks
- Plasticity, damage
- Contact and friction

#### Substructuring

- Conventional or cyclic
- Modal, transient or harmonic analysis

#### Seismic analysis

- With shocks or multi-support
- Spectral or transient direct linear or on modal basis
- Modal damping calculation (RCC-G)

#### Extrapolation of experimental measurements

- Temporal or frequential

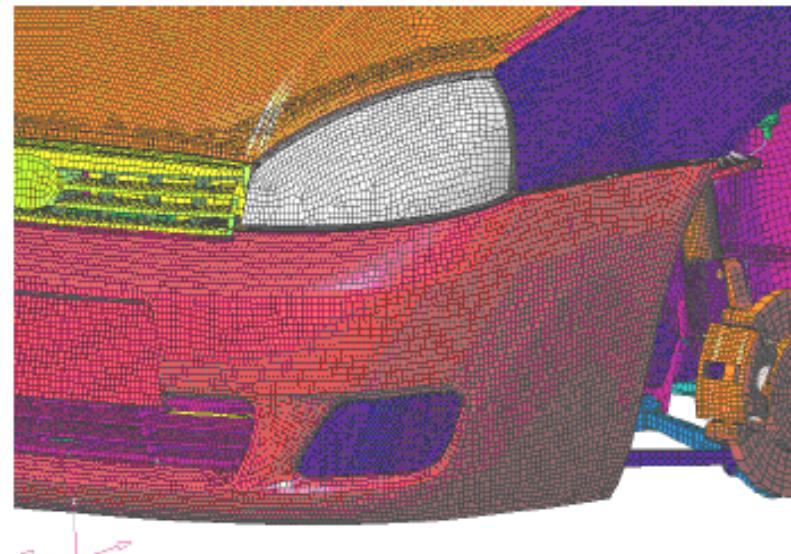
### Interactions

#### Fluid-Structure

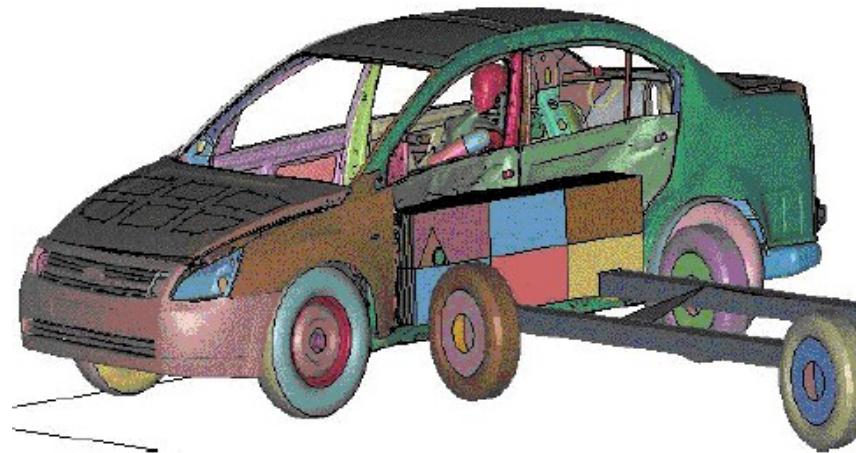
- Structure-Incompressible flow Interaction: turbulent stresses
- Vibro-acoustics (free surface)

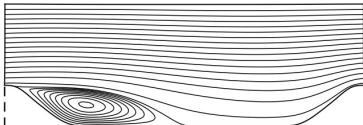
#### Soil-Structure and

- #### Soil-Fluid-Structure
- Absorbent boundary elements
  - Frequent coupling with MISS3D

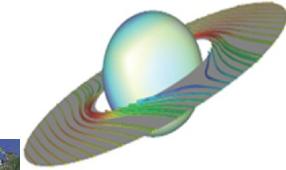


<http://www.laduga.ru/>





## Code\_Saturne



- Код разработан в EDF (France)
- Основан на базе метода МКО
- Написан на C++, Fortran, Python
- Открыт в 2007 на основе GPL
- Входит в состав CAE Linux
- Основные направления:
  - Моделирование турб-ти (RANS-LES).
  - Fire and Combustion.
  - Thermal hydraulics.
  - Nuclear applications.
  - Marine turbines.
  - Fluid-Structure interaction.  
(Code\_Saturne & Code\_Aster)
  - Аэродинамика.
  - Проекты ATAAC и KNOO
  - PRACE project: Benchmark codes for petaflops machines. 32000 cores  
(JuGene), HECToR (University of Edinburg)
  - Протестирован на сетках с 2 миллиардами ячеек

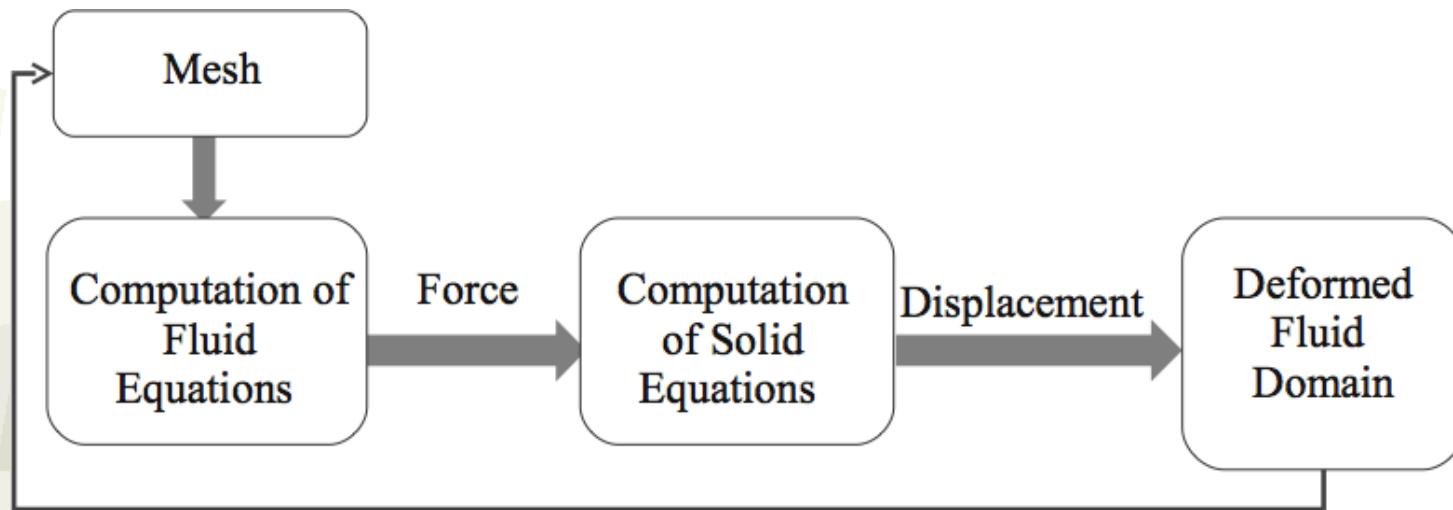
The screenshot shows the Code\_Saturne collaborative website at the University of Manchester. The interface is a TWiki-based platform. Key features include:

- Map:** A world map with numerous blue location pins indicating user activity across various countries.
- Sidebar:** Includes links for CFD & Turbulence Mechanics, Saturne Web (dated 13 Mar 2011), Log in or Register, and a 'Saturne Tip of the Day' box.
- Main Content:** Displays news items, a 'Find out more:' section with links to presentations and source releases, and a 'Download it now:' section with links to the latest version and installation guides.



## ЗАДАЧИ ГИДРО- АЭРО- УПРУГОСТИ *Code\_Saturne* и *Code\_Aster*

- The fluid and structure equations have been driven and discretized using FV and FE methods respectively. An ALE formulation of the FV equations have been carried out to take into account the moving control volumes as the solid deforms.
- A coupling strategy has been proposed. Fluid and solid formulations are being driven using the suggested methodology. The aim is to implement the formulation in *Code-Aster* and *Code-Saturne*.





# День I, Модуль 1. Введение

## OpenFOAM — открытая библиотека для решения задач ВГД



**OpenFOAM** — свободно распространяемое программное обеспечение для проведения численных расчетов.

**OpenFOAM** — объектно-ориентированная платформа, реализованная на языке программирования C++.

**OpenFOAM** – перспективное и динамично развивающиеся открытое программное обеспечение для моделирования задач механики сплошных сред. В его разработке и развитии принимают участие десятки организаций и сотни разработчиков по всему миру.

**OpenFOAM** – обладает большой функциональностью и удовлетворяет всем основным требованиями, предъявляемым к современному программному обеспечению для расчета промышленных задач

Разработан в Imperial College of Science. London. UK. 1991-2003

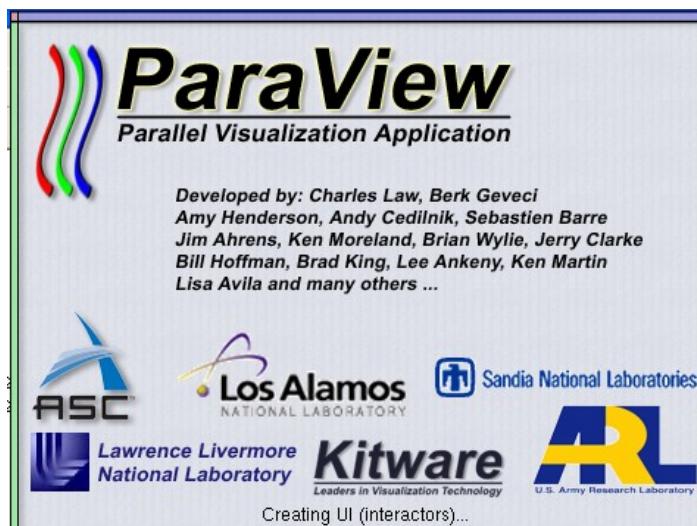
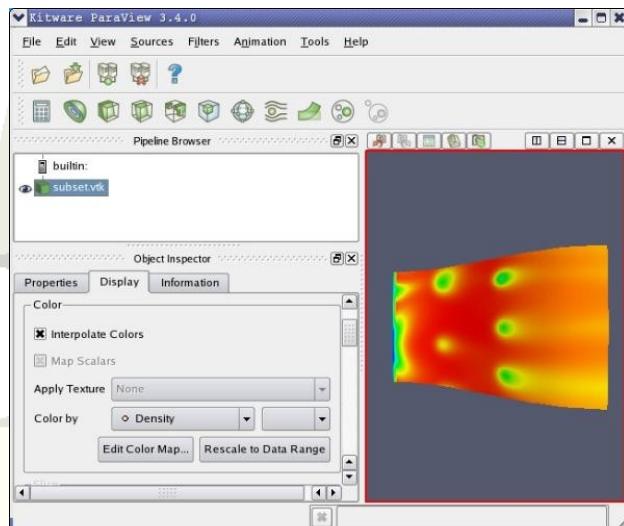
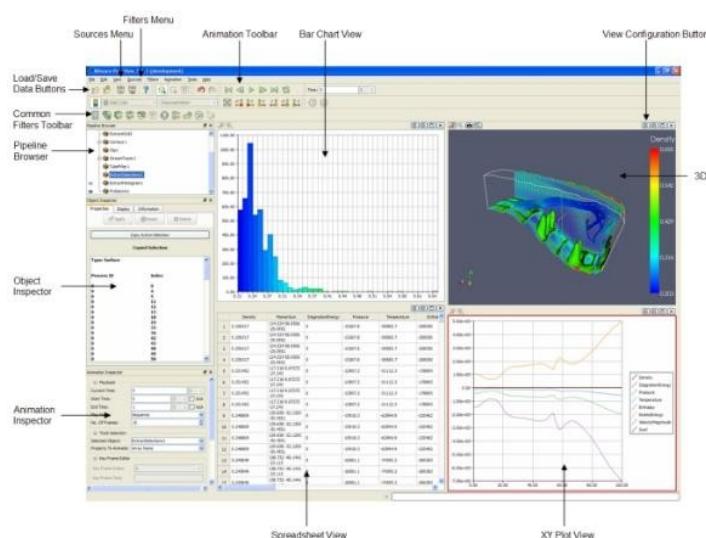
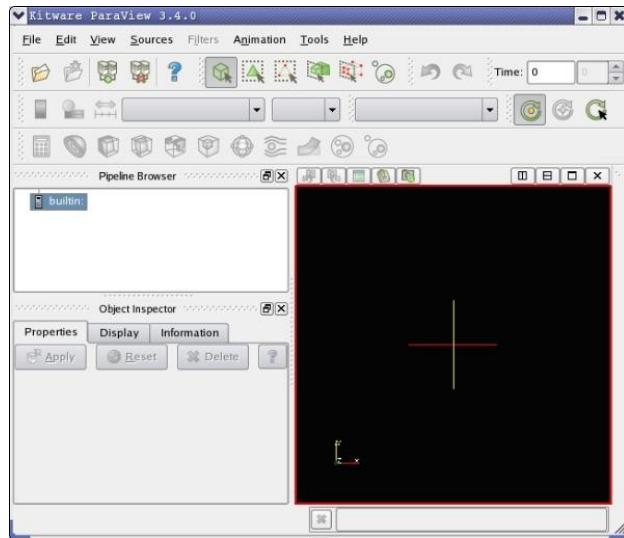
Открытие кода OpenFOAM в 2004 г. на условиях GPL

Входит в состав CAE Linux

Форум на [www.cfd-online.com](http://www.cfd-online.com)

Всего около 3000 пользователей в мире.

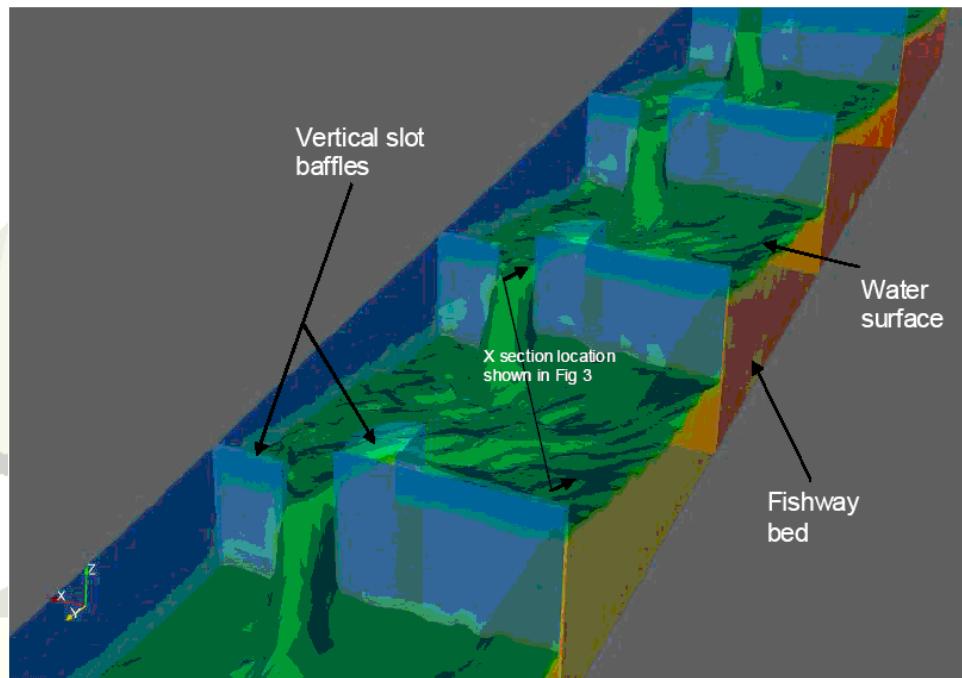
## Paraview (ARL,ASC, Los Alamos NL, Kitware, Sandia NL,Kitware)



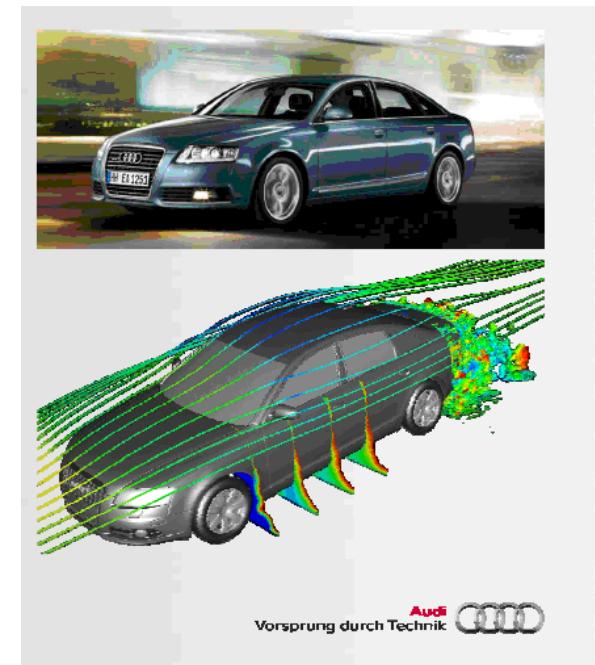
- Multi-view support
- Quantitative analysis
- Undo/redo Python scripting
- Time support
- Plot styles
- Plugins
- Model/View
- Representation/Display:
- Stream Lines/Vector Fields
- Contours/iso-surfaces
- XY Plots
- Animation
- Parallel processing
- Documentation

## Salome, OpenFoam, Paraview в промышленности, крупных научных центрах и Университетах

- Audi, Volkswagen, Volvo, Seat, ABB Corporate Research, Airbus, BAE Systems, Caldrenys SA, Esteco, Mitsubishi, Shell Oil, Toyota, Scania, IREQ Hydro Quebec, National Energy Technology Lab., US Dept. of Energy, NRC Canada, US Navy, Sweedish Energy Agency, CSC (Finland), Ohio Supercomputer Center, BEinGrid
- **Университеты:** MIT, Chalmers University, TU Munchen, Politechnico de Milano, University of A Coruna, FSB University Zagreb, University College Dublin, Universitat Rostock, PennState University. Всего около 200 в мире.
- **Россия:** МГТУ им. Н.Э.Баумана, ЮУрГУ, НИЦ КИ, ИБРАЭ РАН, ЭНИМЦ МС, ИАТЭ (Обнинск) и др.



Дамба. H=80 м. 200 Австралия. 2009. Сетка 200 блоков.



Audi A6. 2009. Сетка 47 М. 128-192 ядер



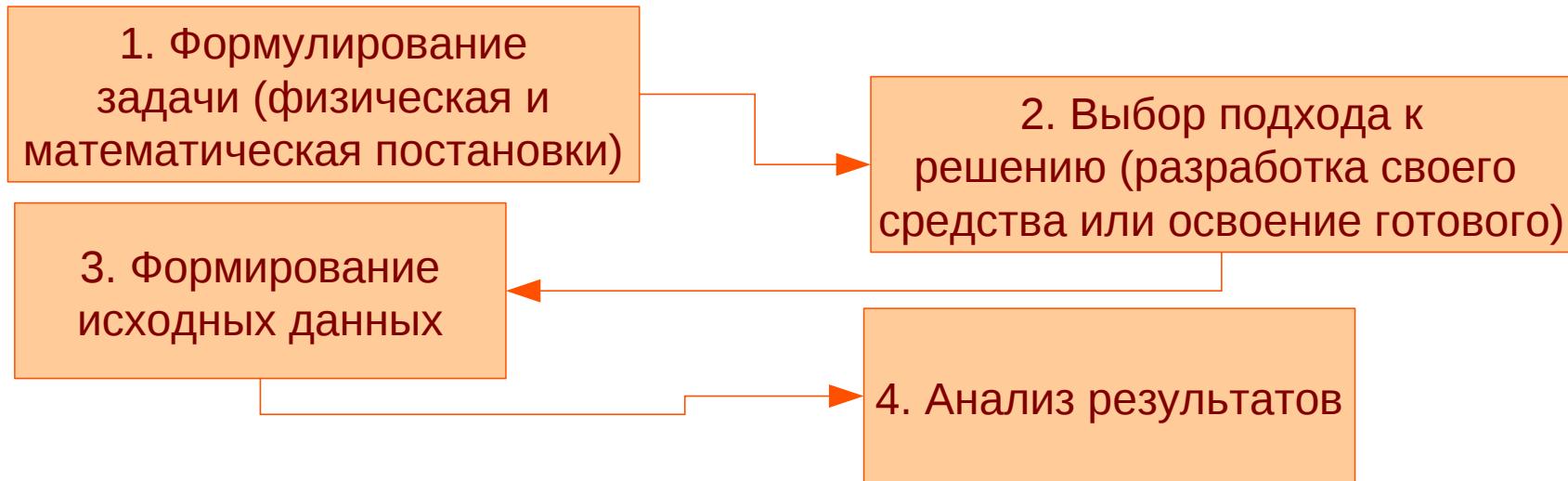
## ВВЕДЕНИЕ. СОДЕРЖАНИЕ

- Цели и задачи курса, структура материала
- Современное развитие открытых технологий для решения прикладных задач тепло- массообмена и механики конструкций
- *Стек процесса решения задач МСС в среде UniHUB*
  1. Технологическая платформа UniHUB
  2. Основы системного окружения ОС Linux для решения инженерных задач
  3. Работа с геометрией и расчетной сеткой в SALOME
  4. Решение задач методом К.О. в OpenFOAM
  5. Анализ результатов с помощью пакета ParaVIEW
- Другие примеры использования свободного инженерного ПО в промышленных расчетах



# День I, Модуль 1. Введение

## СТЕК ПРОЦЕССА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МСС В UNIHUB



## WEB-ЛАБОРАТОРИЯ WWW.UNIHUB.RU

1. Подготовка геометрии в SALOME

2. Решение в OpenFOAM

3. Анализ в ParaView

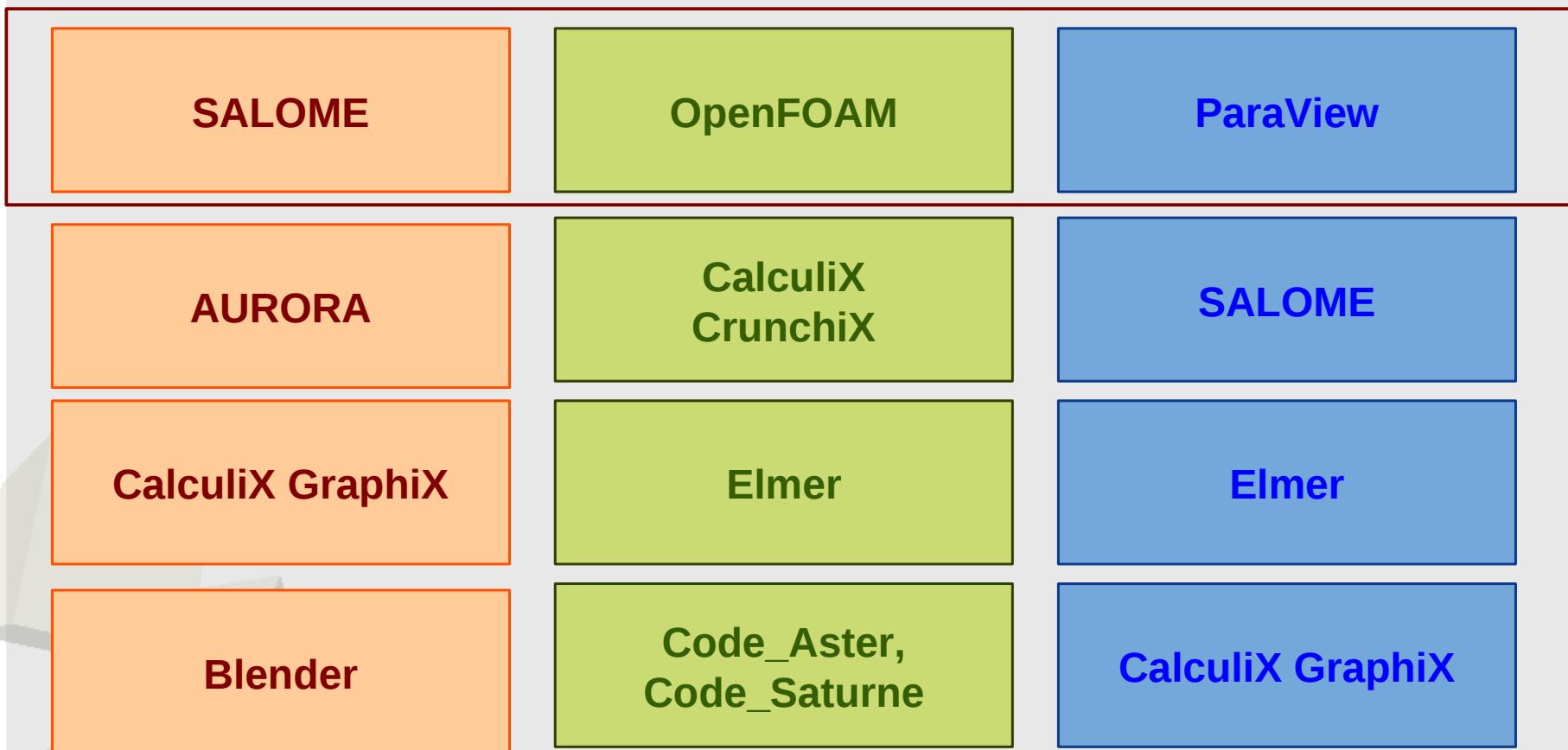
+ БАЗА ЗНАНИЙ (ОБУЧАЮЩИЕ КУРСЫ)



# День I, Модуль 1. Введение

## РАЗВИТИЕ СТЕКА ПРОЦЕССА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МСС В UNIHUB

Сетевая лаборатория UniHUB



Подготовка  
данных

Решение задачи

Визуализация

## Предметно-ориентированный научно-исследовательский центр («хаб»)



- ✗ Единая Web-платформа
- ✗ Интерактивные, графические инструменты моделирования
- ✗ Средства коллективной разработки («багтрекинг», «версионинг»)
- ✗ Средства Web 2.0 (Wiki, группы, социальные сети)
- ✗ Интеграция СПО с Globus Toolkit
- ✗ HPC кластер на базе HP BL2x220c G7

## WEB-ЛАБОРАТОРИЯ UNIHUB



Institute for System Programming  
of the Russian Academy of Sciences

«Хаб» – новый способ организации вычислительной инфраструктуры, которая сочетает в себе возможности численного моделирования выполняемого на современных вычислительных системах и современных информационных технологий массовых коммуникаций («социальных сетей»).

### Ключевые возможности:

- Простой доступ к прикладным приложениям.
- Простой доступ к среде поддерживающей коллективную разработку приложений в разных моделях программирования (MPI, OpenMP, CUDA, MapReduce и т.д.)
- Средства массового научного сотрудничества основанные на технологиях массовых коммуникаций («социальных сетей»)



## СИСТЕМНОЕ ОКРУЖЕНИЕ

Открытое инженерное ПО чаще всего работает в окружении POSIX совместимых систем (Linux, Unix, Solaris), в этих системах действуют свои правила:

- многопользовательская архитектура (монолитная схема файловой системы (midnight commander), иерархия уровней доступа пользователей)
- поточная обработка данных: скрипты интерпретатора команд (bash, csh), знание языков программирования (python, c/c++) и средств сборки (make, wmake, cmake),
- клиент-сервер ориентированная архитектура (ssh, webdav)



python™



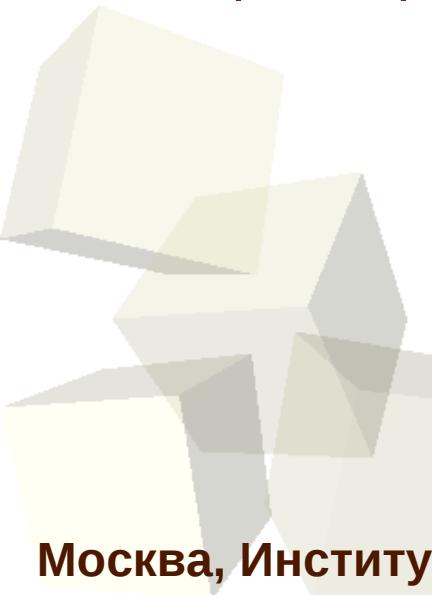
CMake



## SALOME — ПОДГОТОВКА ГЕОМЕТРИИ И СЕТКИ

На стадии подготовки исходных геометрических данных используется SALOME:

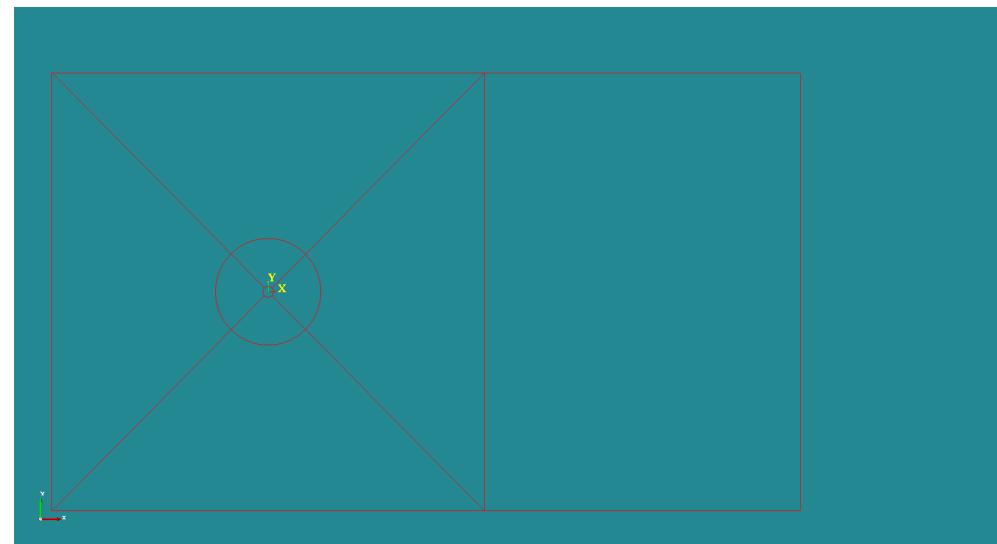
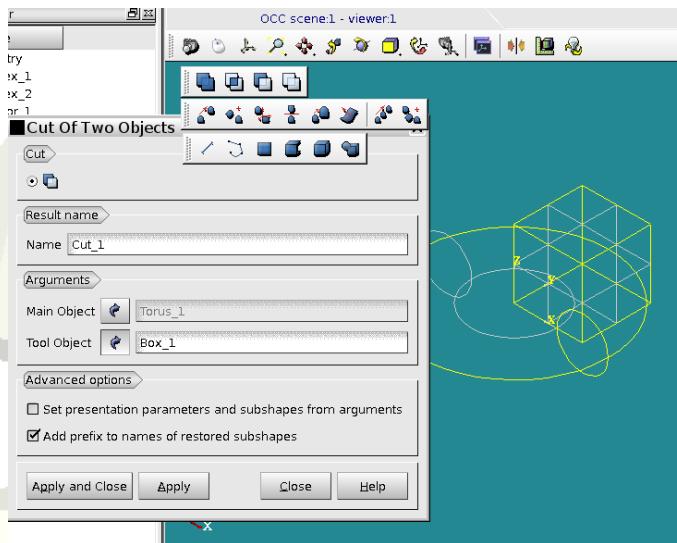
- ✓ Создание геометрии с нуля (снизу вверх от точек до объёмов либо сверху вниз с использованием булевых операций)
- ✓ Импорт геометрии из CAD-систем (IGES, BREP, STEP)
- ✓ Создание расчетной сетки, либо её модификация
- ✓ Параметризация геометрии





## SALOME — СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ СВЕРХУ-ВНИЗ ИЛИ СНИЗУ ВВЕРХ

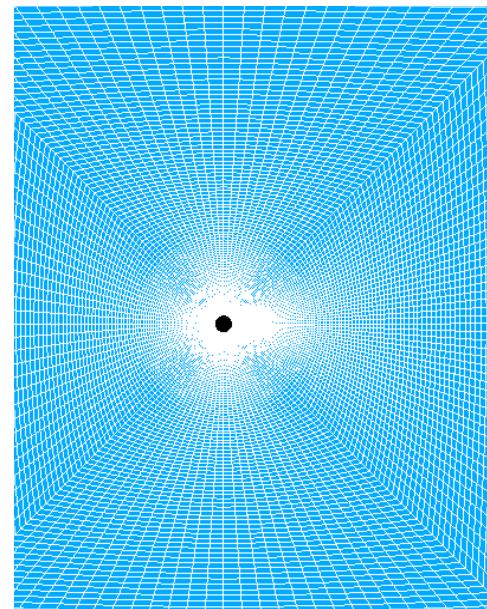
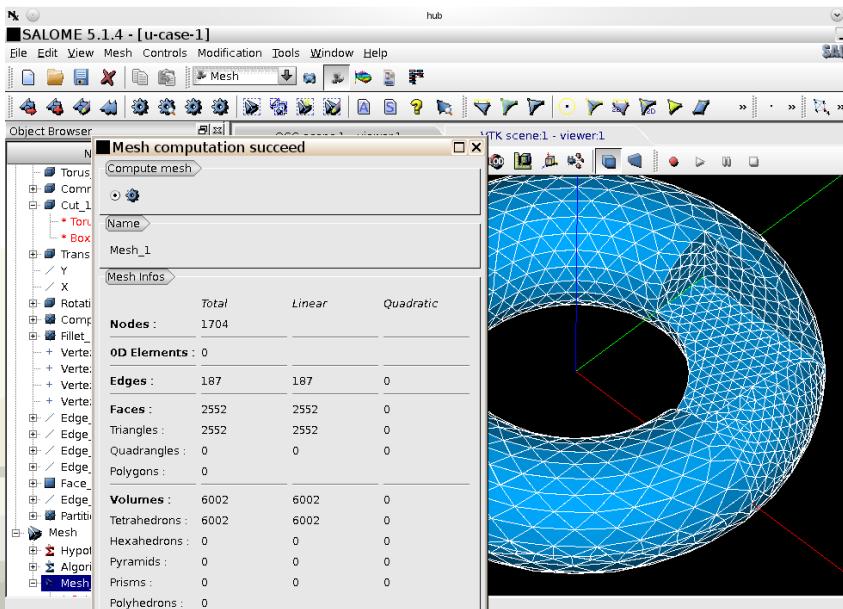
Возможно как создание геометрии сверху-вниз (от твердых тел или поверхностей к расчетной области с помощью булевых операций) либо снизу-вверх (точки, ребра, грани, поверхности, объемы), либо из CAD-систем (форматы STEP, IGES, BREP)





## SALOME — СТРУКТУРИРОВАННЫЕ И НЕСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СЕТКИ

Возможно создание сеток с произвольными типами элементов (гексаэдры, тетраэдры, пентаэдры, многогранники). Элементы могут быть как линейными, так и квадратичными

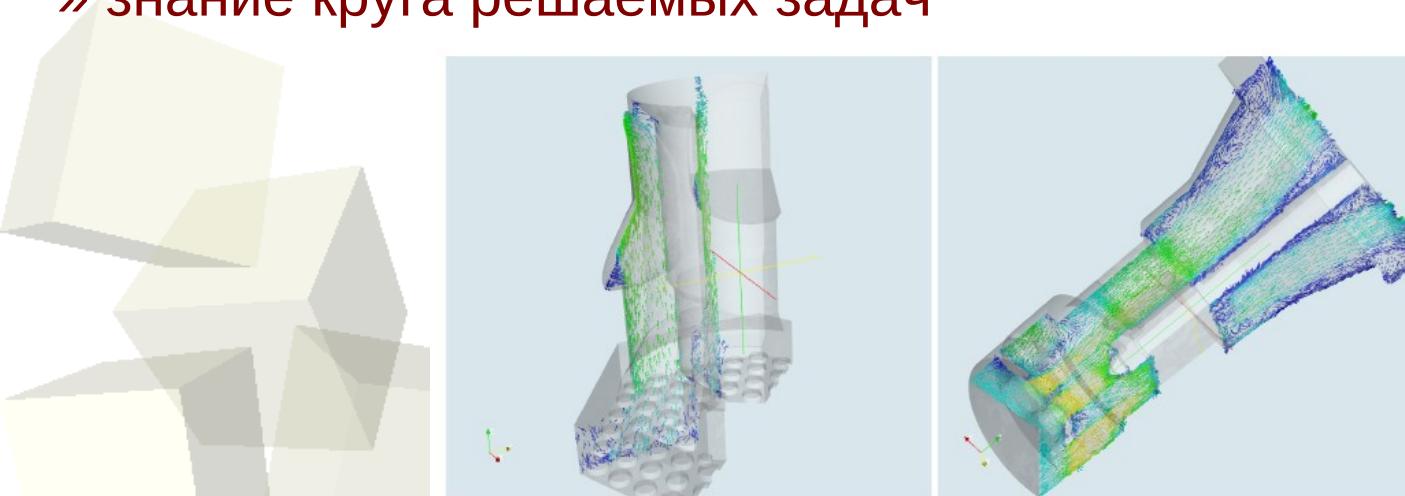




## OpenFOAM — РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МСС

Пакет OpenFOAM является универсальным средством решения задач МСС. Для его использования как «решателя» требуется:

- » понимание основных заложенных принципов
- » понимание файловой структуры пакета
- » освоение форматов хранимых данных
- » знание круга решаемых задач





## OpenFoam. История.



- Предшественник текущей системы – Коммерческий код FOAM. Продавался в UK компанией Nabla Ltd
- Разработчиком указанного пакета являются ученики профессора Imperial College, London A. Госмена: H. Weller и H. Jasak
- Литература:
  - Госмен А.М. и др. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. М.: Мир., 1972, 323 с.
  - Weller, H.G.; Tabor G.; Jasak, H. and Fureby, C.: [A Tensorial Approach to CFD using Object Orientated Techniques](#), Computers in Physics, 1998 v. 12 n. 6, pp 620 – 631
  - Ferziger J.H., Peric M., Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin et al.: Springer, 2002. – 423р
- Дальнейшая разработка компанией OpenCFD, UK <http://www.openfoam.com>  
Компания OpenCFD. Ltd. UK проводит консалтинг и обучение по всему миру  
Альтернативная версия “extend”. Разрабатывается научным сообществом.  
Конференции пользователей:
  - 1 конференция - Загреб 2006
  - 2 конференция - Загреб 2007
  - 3 конференция - Милан 2008
  - 4 конференция – Монреаль 2009
  - 5 конференция – Гетеборг 2010
  - 6 конференция – Penn State University 2011
- Летняя школа для аспирантов в Загребе 2008,2009,2010. Подготовлено около 20 докторандов. Выполняются магистерские работы.
- Open Source Conferences при участии OpenCFD, Ltd - 2007,2008, 2009, 2010



## Основные возможности пакета OpenFOAM

- Метод конечных объёмов на базе многогранных ячеек с поддержкой подвижных сеток;
- URANS/LES/DNS моделирование;
- \* SIMPLE/PISO/PIMPLE алгоритмы для связи уравнений скорости и давления;
- \* Несжимаемые/сжимаемые и стационарные/нестационарные потоки ;
- \* Однофазные, двухфазные и многофазные потоки;
- \* Лагранжева модель для расчета движения частиц;
- \* Модели турбулентности: k-e, k-w, k-w SST, SA, LES, DES. Всего 15 моделей;
- \* Модели теплообмена, испарения, горения, распыливания топлива;
- Различные термо-физические свойства среды, учет реальных свойств газов;
- Сопряженные задачи (жидкость – тело);
- Решение уравнений движения тела с 6 степенями свободы;
- Решение задач динамики разряженного газа;
- \* Многоблочная сетка и декомпозиция расчетной области (Metis, Scotch);
- \* Параллельная версия (до 2000 ядер), поддержка версий MPI. ;
- \* Поддержка структурированной/неструктурированной сетки;
- \* Импорт сеток из различных коммерческих и открытых пакетов.





## Различные версии OpenFoam



- Текущая версия – OpenFOAM 2.0.1, Разработчик OpenCFD Ltd. [www.openfoam.org](http://www.openfoam.org).
- В UniHUB установлен OpenFoam-1.7.1, 2.0.1, 2.1.X, 2.2
- OpenFoam-1.7.x – исправленная версия с патчами. [www.openfoam.org](http://www.openfoam.org). Разработчик OpenCFD Ltd.
- <http://Git – git.or.cz>
- [OpenFoam-2.0 - 16.06.2011](http://OpenFoam-2.0 - 16.06.2011)
- OpenFOAM-1.6-dev. Расширенная версия, разрабатывается H.Jasak. <http://openfoam-extend.svn.sourceforge.net/>
- OpenFOAM-1.6-extend. Разрабатывается пользователями. <http://openfoam-extend.svn.sourceforge.net/>



## Возможности OpenFOAM-extend

Основная цель Extend (Dev) проекта - открыть OpenFOAM CFD для сообщества, способного развивать решение в духе свободного кода

### Команда разработчиков:

- Хрвое Ясак, профессор, Хорватия, Великобритания
- Хакан Нильсон, Швеция
- Генрик Руше, Германия
- Хольгер Маршал, Германия

### Ключевые возможности:

- новые решатели с большей производительностью
- работающая поддержка изменений топологии
- подвижные сетки из тетраэдров для метода конечных объёмов
- метод конечных площадей и поддержка тонких плёнок
- расчеты теплового потока
- расширенный набор классов динамических сеток
- решение задач для внутреннего сгорания (Politecnico di Milano)
- решатель для вязкоэластичного потока
- анализ напряженного состояния твердого тела, распространение трещин, напряжение на стыке (UC Dublin)
- движение твёрдого тела с шестью степенями свободы, включая одно- и многофазные течения
- разработана линейка уровневых методов и средства поиска ошибок
- GGI с полной поддержкой параллелизации
- дополнительные параметры, утилиты и решатели
- OpenFOAM SLAX - загрузочная USB флэшка Linux + OF-ext + OF-tools



<http://www.extend-project.de>



# День I, Модуль 1. Введение

## Положение OpenFOAM в стеке процесса решения задач МСС

### Геометрия

### Сетка

### Моделирование

### Обработка результатов

blockMesh

snappyHexMesh

Blender

Netgen

BRL-CAD

gmesh

SALOME

SolidWorks

ANSYS Mesh

Gambit

Другие

Другие

OpenFOAM

Утилиты

ParaView

openDX

SALOME

ANSYS

Fluent

Tecplot

Другие



OpenFOAM



Открытые пакеты



Коммерческие пакеты



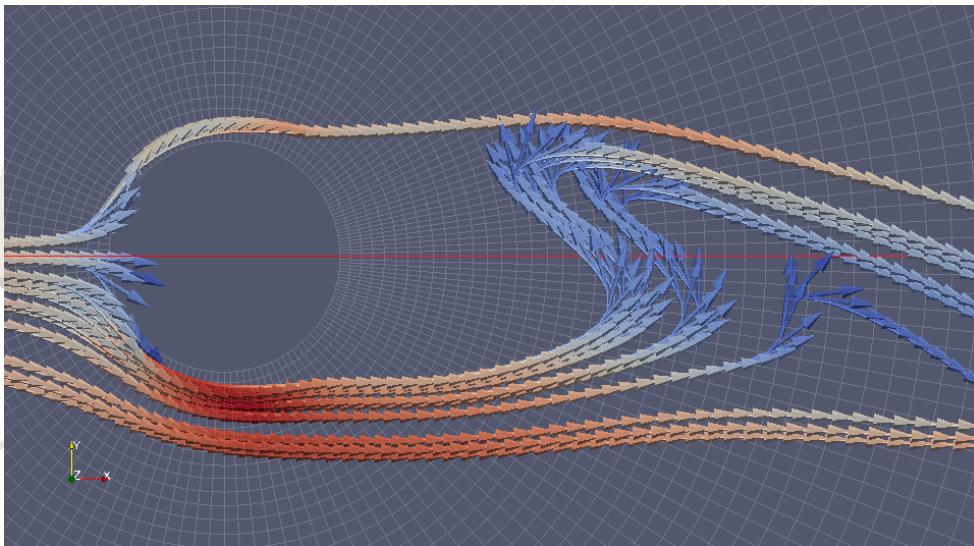
## ParaView — АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ввод данных

Обработка (фильтрация)

Визуализация

При анализе результатов в ParaView  
упор делается на конвейер  
визуализации, в котором выходные  
данные одной операции являются  
исходными для другой



Исходные данные

Фильтр 1

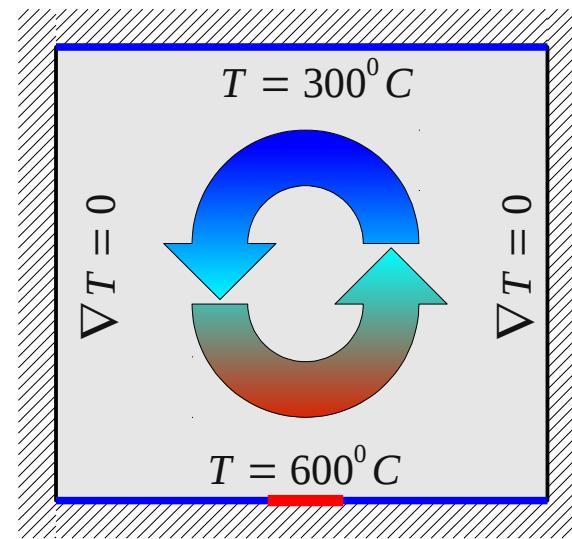
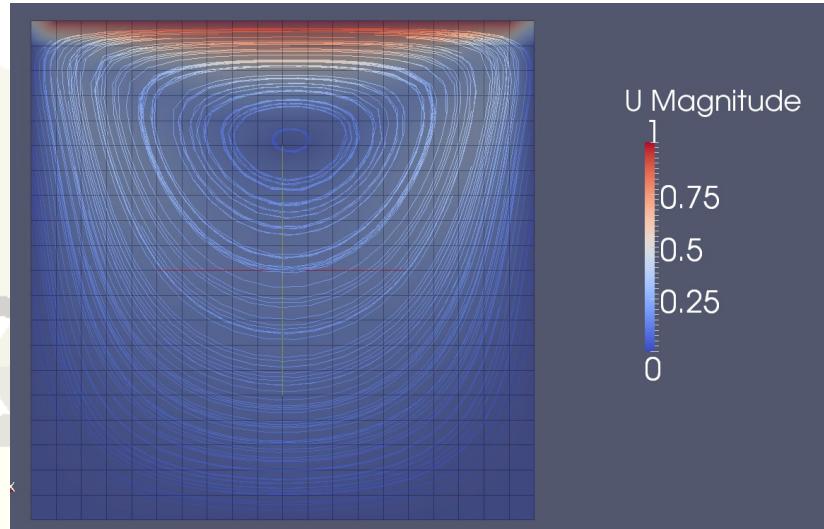
Фильтр 2

Результат

## РАССМОТРЕНИЕ БАЗОВЫХ ПРИМЕРОВ (ДЕНЬ 1)

Будут рассмотрены следующие базовые примеры:

- I. Ламинарное течение в каверне (icoFoam)
- II. Течение за обратным уступом (pisoFoam)
- III. Естественная конвекция (buoyantSimpleFoam)
- IV. Создание гексаэдральной сетки цилиндрического канала в SALOME



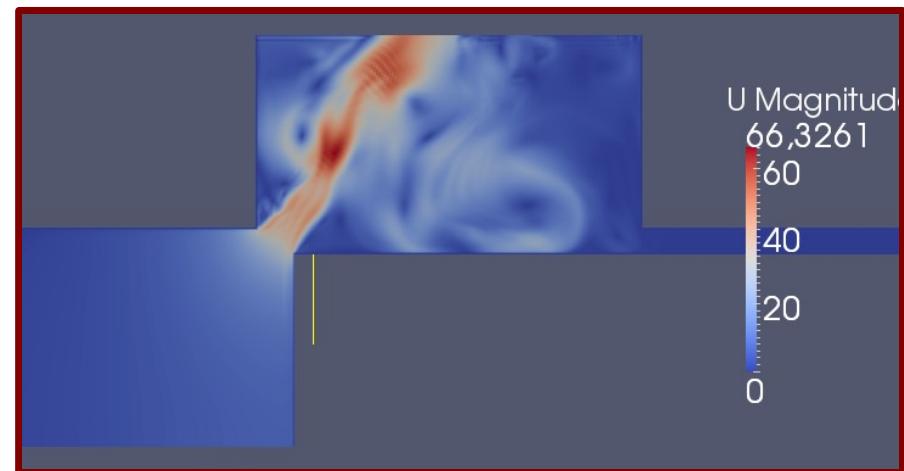


## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ДЕНЬ 2)

Второй день будет полностью посвящен практическим задачам (до обеда — демонстрация)

- I. 2D обтекание бруса
- II. 2D обтекание цилиндра
- III. 3D обтекание сферы
- IV. 2D сужение потока в окнах клапана

Разработка  
индивидуальных простых  
заданий для второго дня  
приветствуется!!!

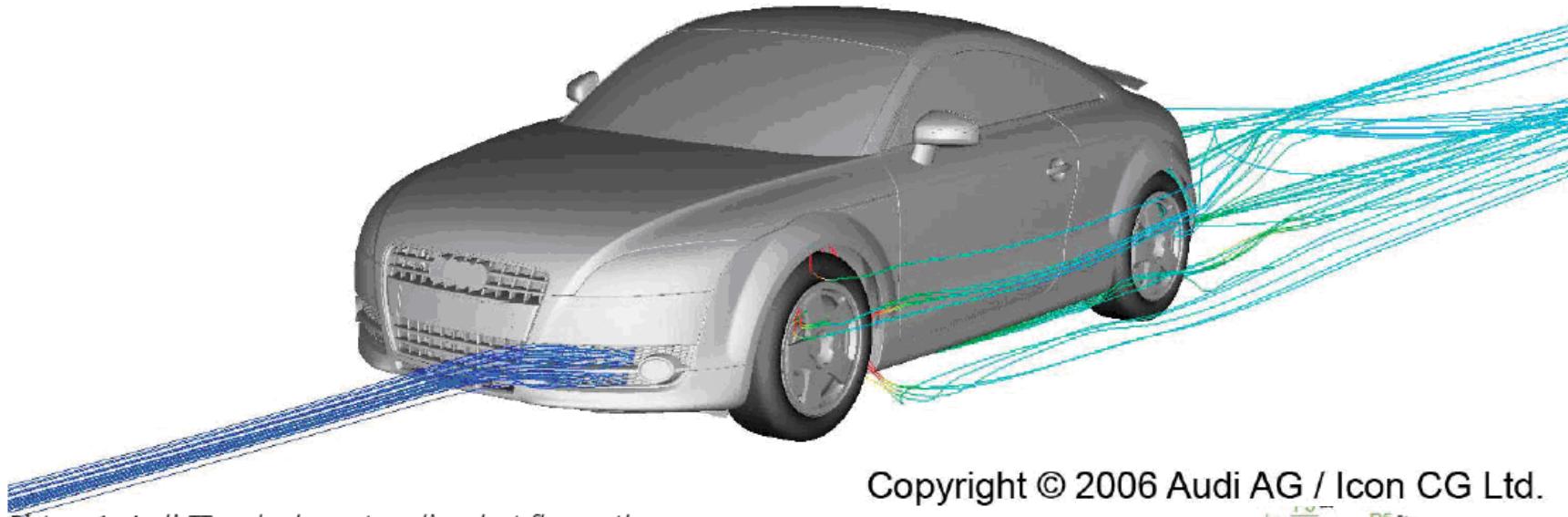




## ВВЕДЕНИЕ. СОДЕРЖАНИЕ

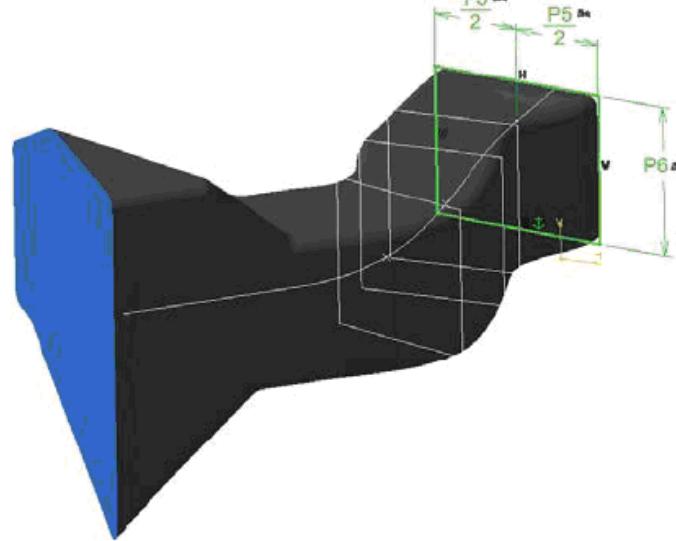
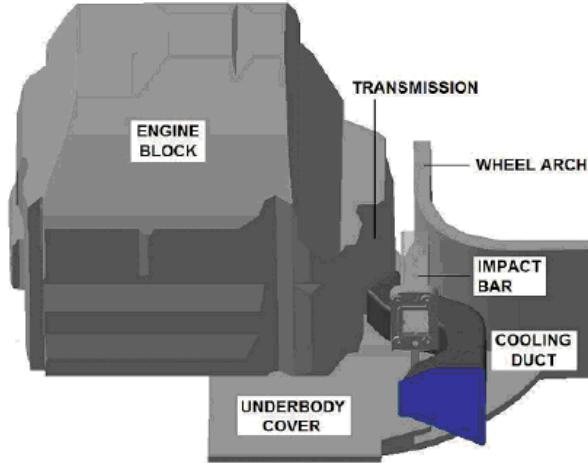
- Цели и задачи курса, структура материала
- Современное развитие открытых технологий для решения прикладных задач тепло- массообмена и механики конструкций
- Стек процесса решения задач МСС в среде UniHUB
  1. Технологическая платформа UniHUB
  2. Основы системного окружения ОС Linux для решения инженерных задач
  3. Работа с геометрией и расчетной сеткой в SALOME
  4. Решение задач методом К.О. в OpenFOAM
  5. Анализ результатов с помощью пакета ParaVIEW
- *Другие примеры использования свободного инженерного ПО в промышленных расчетах*

## Пример использования OpenFOAM в промышленности Audi TT

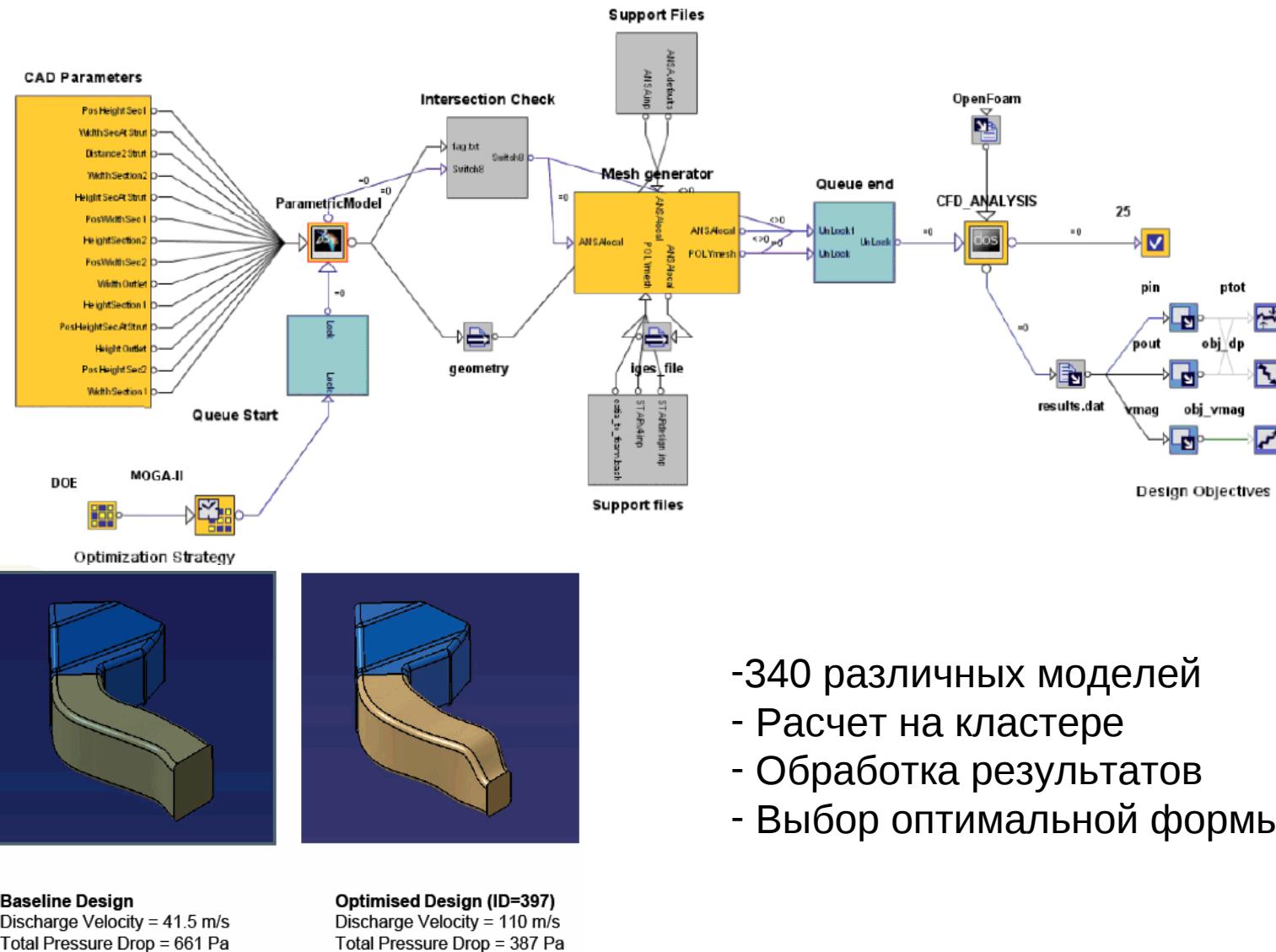


Copyright © 2006 Audi AG / Icon CG Ltd.

Picture 1: Audi TT under-bonnet cooling duct flow path



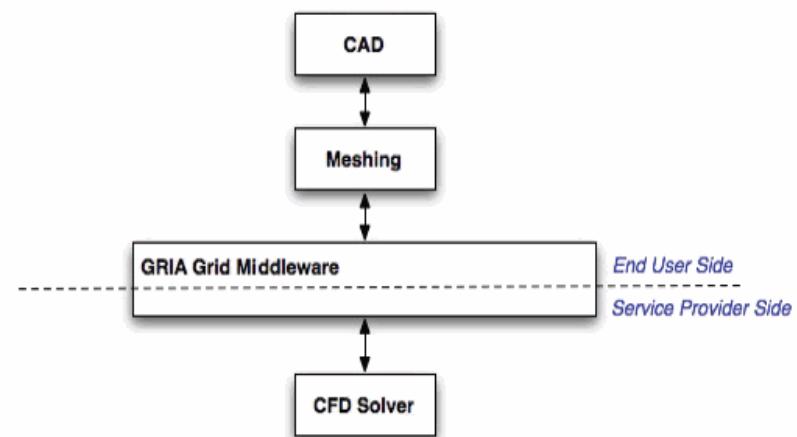
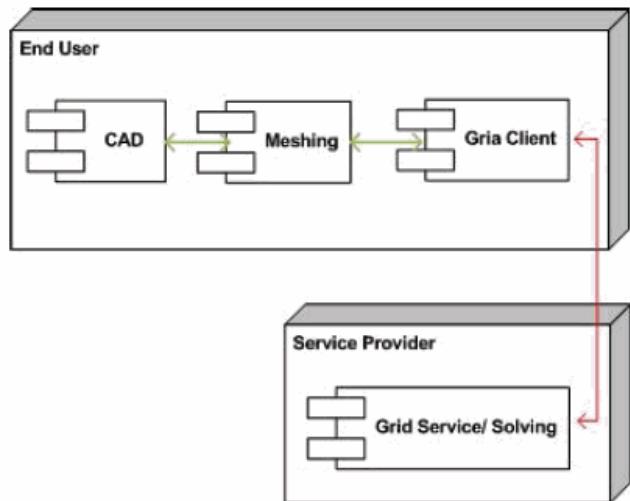
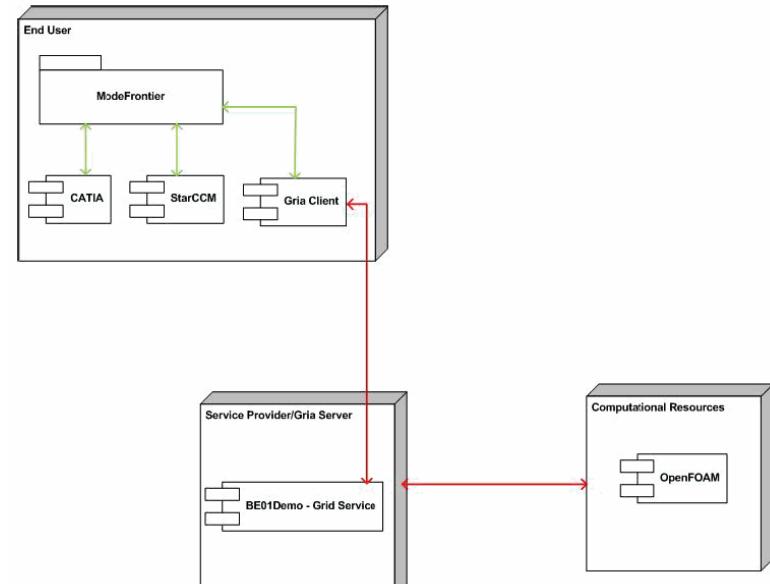
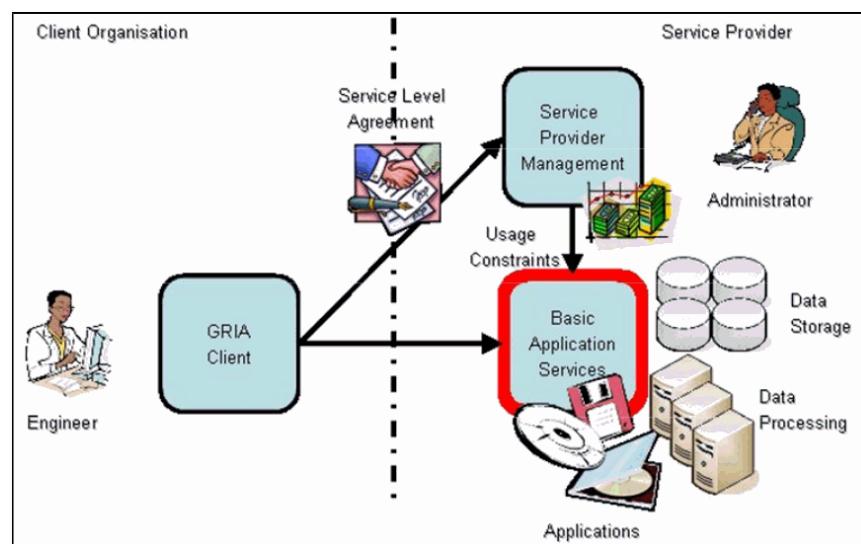
## Процесс выбора оптимальной формы трубы для Audi TT



- 340 различных моделей
- Расчет на кластере
- Обработка результатов
- Выбор оптимальной формы

# День I, Модуль 1. Введение

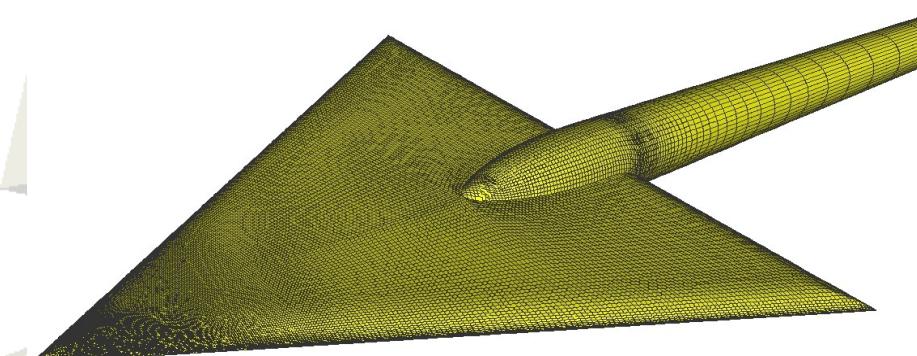
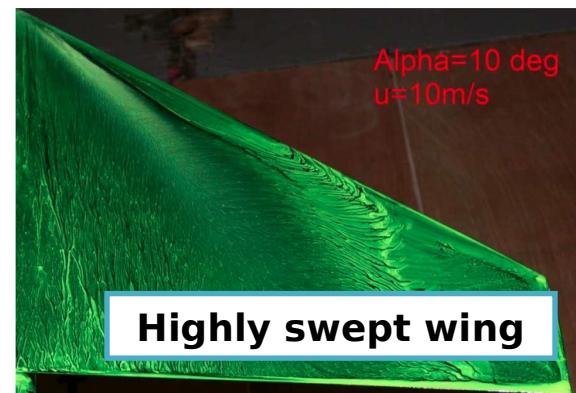
BeinGRID (Business Experiments in GRID) <http://www.beingrid.eu/>



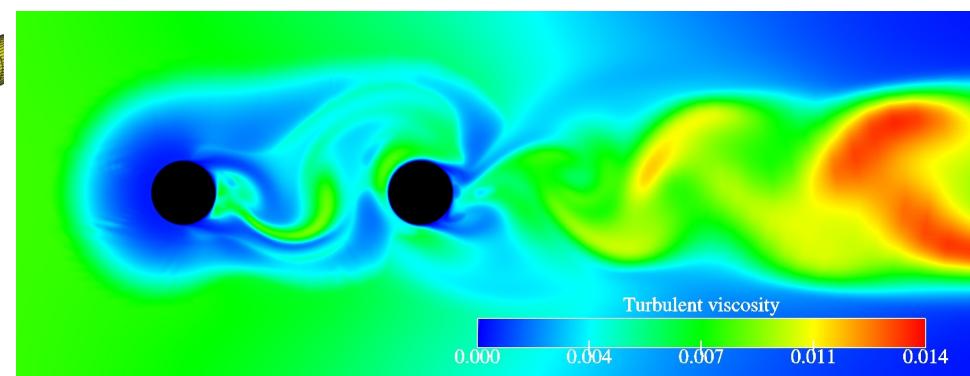
## Advanced Turbulence Simulation for Aerodynamics Application Challenges - A EU project



- Assessment of *Code\_Saturne*
  - Application to massively unsteady separated flows at High Re number
  - Robustness and predictive capabilities of models
- Applications for new developments
  - Novel Reynolds Stress Models (EBRSM, TCL)
  - Unsteady RANS ( CAS-ALPHA)
  - Comparison with widely used SST,SAS,DES

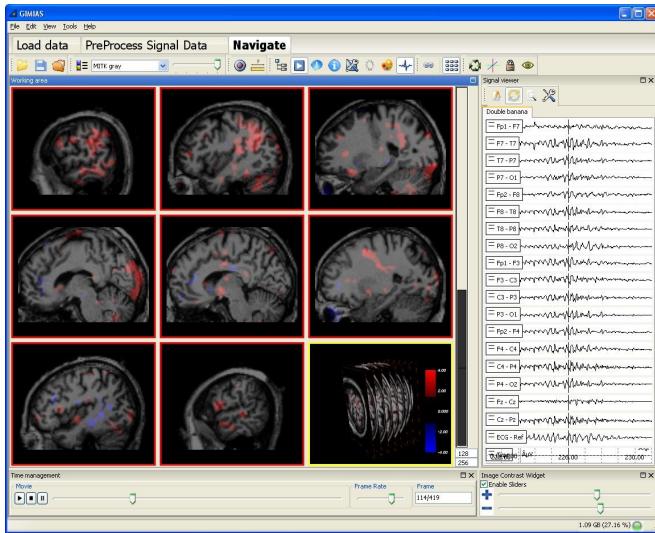


Delta wing

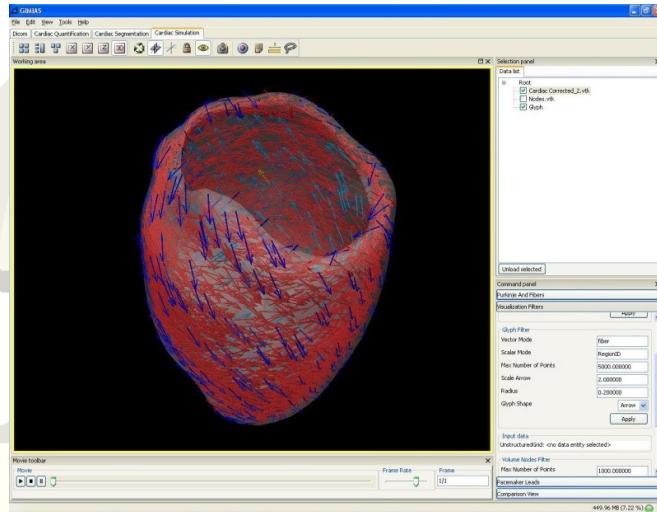


Tandem cylinder

## Медицина и биомеханика



Математический анализ сигналов

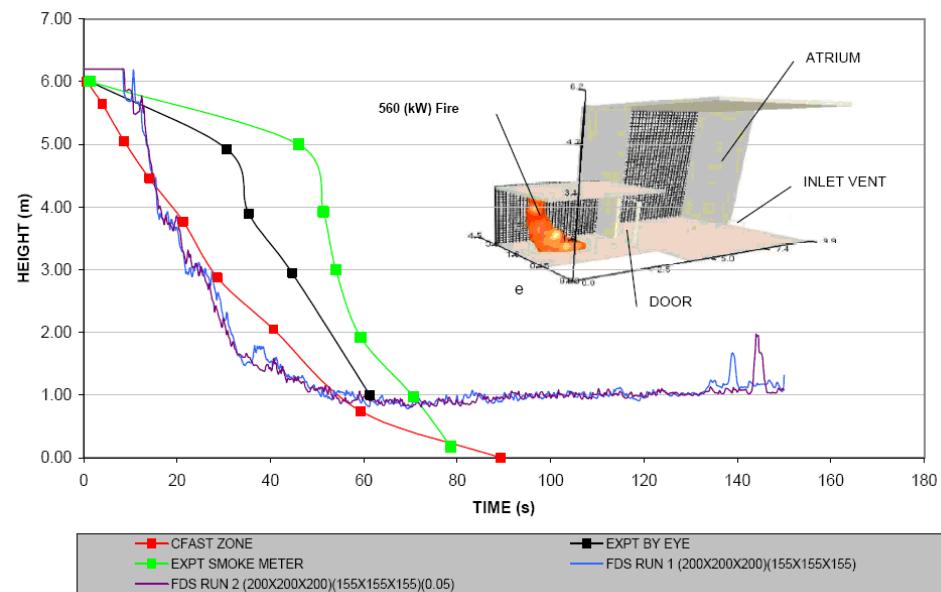


Левый желудочек сердца  
Москва, Институт Системного Программирования РАН

- GIMIAS – Graphical Interface for Medical Image Analysis and Simulation
- Разрабатывается в Университете Барселоны (Испания)
- Используется в кардиологии, нейрохирургии, сосудистой хирургии
- Использует процесс для обработки медицинских данных
- 3D image, surface mesh, volume mesh
- Поддерживаемые форматы: vtk, vti, stl, DICOM, другие
- Работа с сеткой
- Работа с изображением
- Отображение сигнала
- Написан на языке C++
- Возможность разработки своих приложений
- <http://www.gimias.org/>
- Доступен на Linux
- Нет параллельной версии

## Моделирование пламени и пожара

- Моделирование пламени и пожара
- FDS (Fire Dynamics Simulator) – решатель для Уравнений Навье-Стокса применительно к моделированию пламени и теплообмену
- FDS написана на 90% на Fortran, 10% на С
- Поддерживает многоблочные структурированные сетки
- Учет пиролиза и горения твердой фазы
- Модель распыливания капель и испарения
- Модель поверхностного смачивания
- Модель химических реакций на базе Eddy Dissipation Concept (EDC)
- FDS имеет параллельную версию
- SMV (Smokeview) – постпроцессор для визуализации
- Разработаны в 2000 г. в NIST( National Institute of Standards and Technology)
- <http://code.google.com/p/fds-smv/>
- <http://www.fire.nist.gov/fds/index.html>





## CalculiX: Метод Конечных Элементов

CalculiX – бесплатная программа с открытым кодом, распространяемая под лицензией GNU General Public Licence, полный текст которой вы можете найти в папке с установленной программой.

Авторы программы **Guido Dhondt** (модуль CCX) и **Klaus Wittig** (модуль CGX). <http://www.calculix.de>

Собственно программа представляет собой пакет, который состоит из двух модулей – CCX (решатель) и CGX (пре- и постпроцессор).

Пре- Постпроцессор предназначены для построения конечно-элементной модели и анализа результатов после выполнения расчета.

CalculiX пользуется при описании модели .inp-файлами языком, схожим с известным коммерческим пакетом ABACUS.

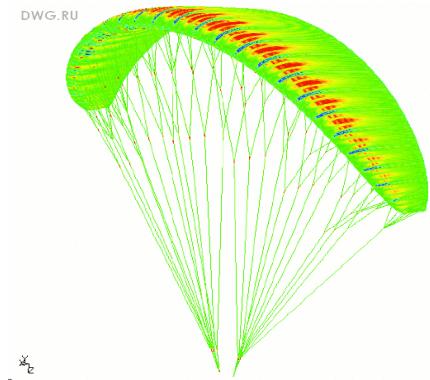
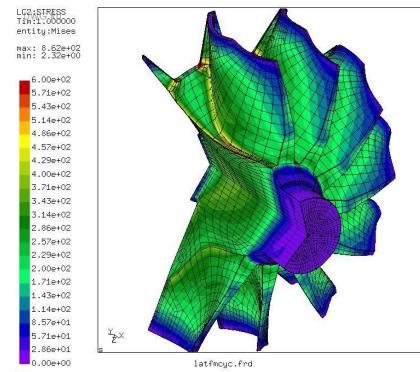
Параллельная версия

Большой набор различных КЭ.

Форум, посвященный программе, функционирует с 2001 г на <http://groups.yahoo.com/group/calculix/>

**Москва, Институт Системного Программирования РАН**

- Types of analysis
  - static
  - frequency (linear)
  - dynamic
  - buckling
  - heat transfer
  - coupled thermal mechanical analysis
  - steady-state networks
  - Laplace and Helmholtz problems by analogy
  - computational fluid dynamics





**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

**СЛЕДУЮЩАЯ ЛЕКЦИЯ -**

**WEB-ЛАБОРАТОРИЯ UNIHUB**





## Обратная связь

Сегодня важны и нужны:

- а) Обратная связь ( конструктивная критика)
- б) Инициатива (участие в исправлении ошибок, мелких и методических)
- в) Распространение курса для широкой аудитории
- г) Процент усвоение курса. На доске — 30 строк и 6 столбцов:  
Т — теория, G — геометрия, M — сетка, S — решение, A — анализ данных (визуализация), N — слушатель. Просьба отметить соответствующие поля.

**Спасибо за внимание, но это не всё. Следующий слайд — для тех кто выдержит курс до конца**



## Конструктивная критика

Времени всегда мало, а хочется успеть многое, поэтому:

- а) курсу нужна систематизация материалов
- б) перевод материалов на русский язык
- в) методическое пособие
- г) материалы-памятки
- д) материалы по Linux
- е) оптимальное соотношение преподавателей на число слушателей
- ж) методика оценки курса — тестирование
- з) распространение в академической и промышленной среде
- и) расширенный курс**
- к) связь примеров с актуальными, часто решаемыми задачами

**а-о) ВАШИ ПРЕДЛОЖЕНИЯ, ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**