

# ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНЖЕНЕРНОМ АНАЛИЗЕ

## *Лекция 5*

Болдырев Ю.Я., Замотин К.Ю., Петухов Е.П.

Санкт-Петербургский Государственный  
Политехнический Университет

[boldyrev@phmf.spbstu.ru](mailto:boldyrev@phmf.spbstu.ru)

# CAE технологии

2

- С точки зрения наиболее широко востребованных сегментов инженерных приложений можно разделить на два типа:
- **FEA** (Finite Element Analysis)
- **CFD** (Computer Fluid Dynamics)

# Некоторые CFD программные системы

3

- ❑ **ANSYS CFD** (ANSYS FLUENT + ANSYS CFX) – программный комплекс компании ANSYS Inc.
- ❑ **STAR-CD** – программный комплекс, разработанный и развивающийся компанией Computational Dynamics (Великобритания), один из немногих примеров длительного нахождения на мировом рынке наукоемкого программного обеспечения и успешного конкурентирования с доминирующими американскими компаниями

# Этапы постановки и решения задачи в ANSYS FLUENT

4

- *Define the modeling goals* – Определить цели моделирования
- *Create the model geometry and grid* – Создать геометрию модели и конечноэлементную сетку
- *Set up the solver and physical models* – Установить настройки решателя и параметры физических моделей
- *Compute and monitor the solution* – Вычислить и проконтролировать решение
- *Examine and save the results* – Проанализировать и сохранить результаты
- *Consider revisions to the numerical or physical model parameters, if necessary* – Если это необходимо, провести «ревизию» численных или физических параметров модели

# Определение целей моделирования

5

- What results are you looking for, and how will they be used? – Какие результаты Вы планируете получить, и как они будут использоваться?
- What are your modeling options? – Какие средства моделирования Вы собираетесь использовать?
- What physical models will need to be included in your analysis? – Какие физические модели необходимо включить в анализ?
- What simplifying assumptions do you have to make? – Какие упрощающие допущения Вам *приходится* сделать?
- What simplifying assumptions can you make? – Какие упрощающие допущения Вы *можете* сделать?

# Определение целей моделирования

6

- Do you require a unique modeling capability? – Требуется ли Вам какие-либо уникальные возможности для моделирования?
- Could you utilize user-defined functions (written in C)? – Нужны ли Вам какие-либо отдельные, написанные Вами функции (написанные на языке C)?
- What degree of accuracy is required? – Какая требуется степень точности?
- How quickly do you need the results? – Как быстро Вам нужно получить результаты?
- How will you isolate a piece of the complete physical system? – Как Вы будете отделять части задачи от полного решения?
- Where will the computational domain begin and end? – Где начинается и заканчивается расчетная область?

# Определение целей моделирования

7

- Do you have boundary condition information at these boundaries?  
— Есть ли у Вас полная информация о граничных условиях?
- Can the boundary condition types accommodate that information?  
— Можно согласовать Вашу информацию о граничных условиях с типовыми граничными условиями?
- Can you extend the domain to a point where reasonable data exists? — Возможно ли расширение расчетной области до точки, где существуют «разумные» (приемлемые) данные задачи?
- Can it be simplified or approximated as a 2D or axisymmetric problem? — Возможно ли упростить задачу, представив ее как 2-х мерную или осесимметричную?

# Основные возможности ANSYS CFX для описания физических моделей

8

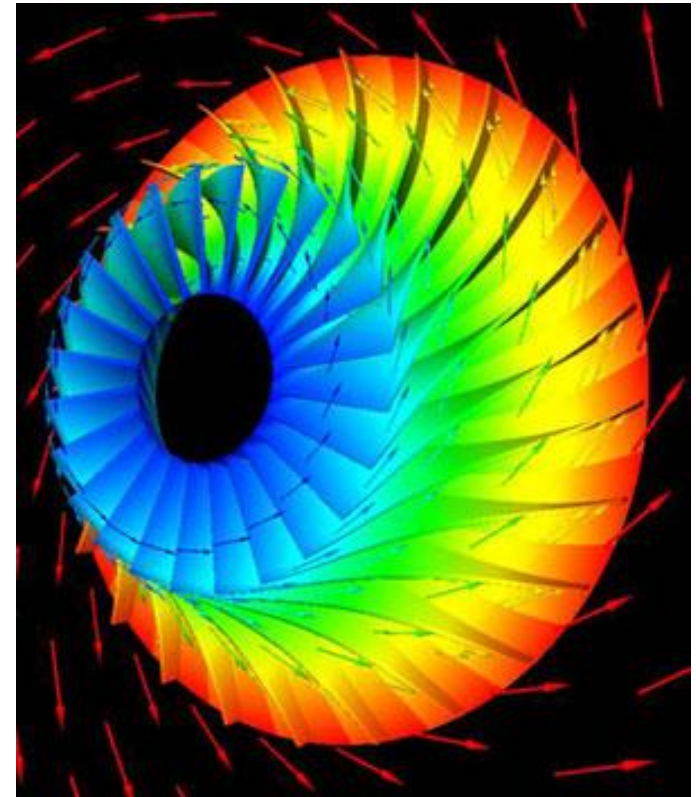
- Физические модели для течений
  - / Сжимаемых
  - / Несжимаемых
  - / Стационарных
  - / Нестационарных
  - / ламинарных (модель Ньютона и неньютоновские жидкости)
- Поддержка решения задач в различных системах координат



# Основные возможности ANSYS CFX для описания физических моделей

9

- Модели турбулентности
  - / RNG, RANS, BSL, SST
  - / метод крупных вихрей LES
  - / модель не присоединенного вихря DES и т.д.
- Разнообразные модели горения
  - / модель распада вихрей (EDM)
  - / модель образования  $\text{Nox}$
  - / модель образования сажи и т.д.



# Возможности программного комплекса STAR-CD для решения задач механики жидкостей и газов

10

- стационарные и нестационарные течения
- ламинарные течения – модели ньютоновской и неньютоновской жидкостей
- турбулентные течения (применяются несколько наиболее известных моделей)
- сжимаемые и несжимаемые среды
- около- и сверхзвуковые течения
- теплоперенос и массоперенос
- решение задач с учетом химических реакций
- горение газообразного, жидкого и твердого топлива
- многофазные потоки – модель Лагранжа (дисперсные газы – твердое тело, газ – жидкость, жидкость – твердое тело, жидкость – жидкость)
- решение задач со свободными поверхностями

# Дискретизация в ANSYS FLUENT и ANSYS CFX

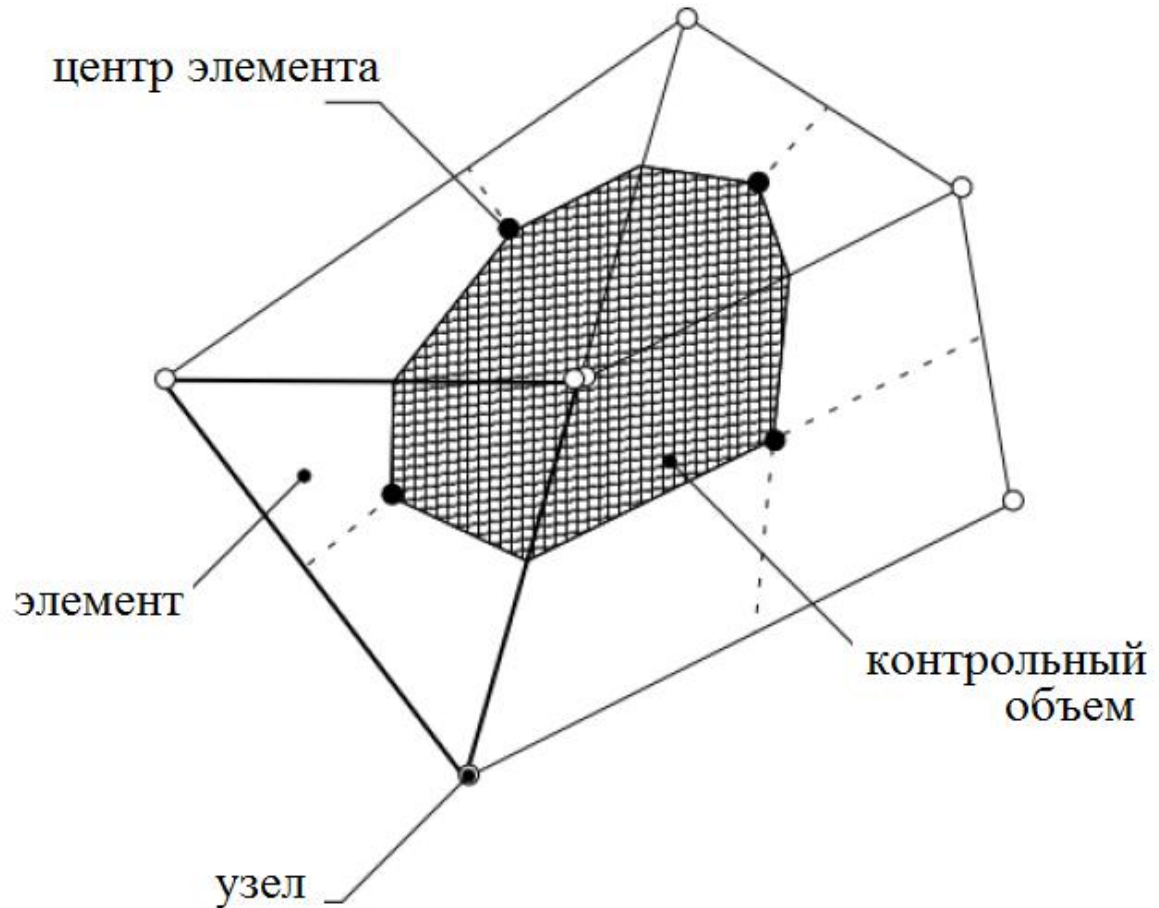
11

- Решатель ANSYS CFX — конечные элементы с числовыми значениями в узлах сетки
- ANSYS FLUENT — конечные объемы с числовыми значениями в центрах ячеек
- Оба подхода приводят к формированию уравнений для конечных объемов, которые обеспечивают сохранение значений величин расхода, импульса и энергии, что обеспечивает высокую точность решений задач при выполнении законов сохранения

# Дискретизация уравнений в ANSYS CFX

12

- ❑ Все переменные и данные о свойствах жидкости хранятся в узлах (вершинах)
- ❑ Контрольный объем (заштрихованная область) строится вокруг каждого узла сетки по линиям, соединяющим центр элемента и середины ребер



# Уравнения сохранения массы и количества движения

13

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right)$$

где  $\rho$  – плотность,  $U_i$  – компоненты вектора скорости,  $\mu$  – вязкость жидкости

Проинтегрируем эти уравнения по каждому контрольному объему

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho U_j dn_j = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j = - \int_S P dn_j + \int_S \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} dV$$

$V$  – контрольный объем, а  $S$  – площадь его поверхности

# Уравнения для контрольного объема

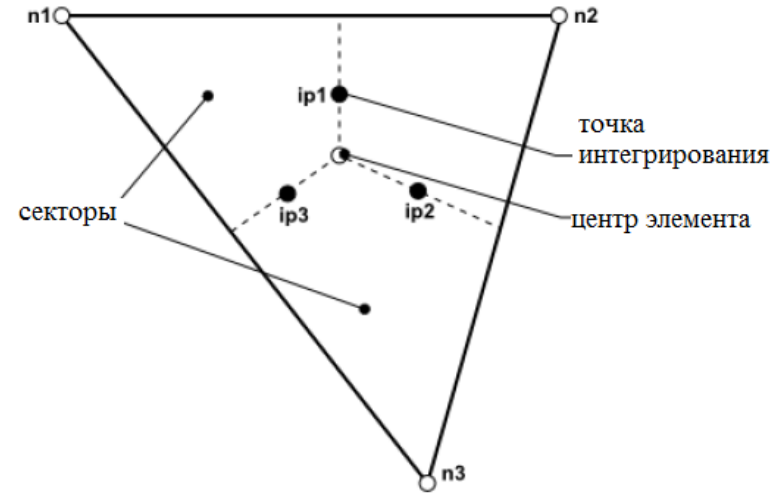
14

Итоговые алгебраические уравнения  
для рассматриваемого объема

$$V \left( \frac{\rho - \rho^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} = 0$$

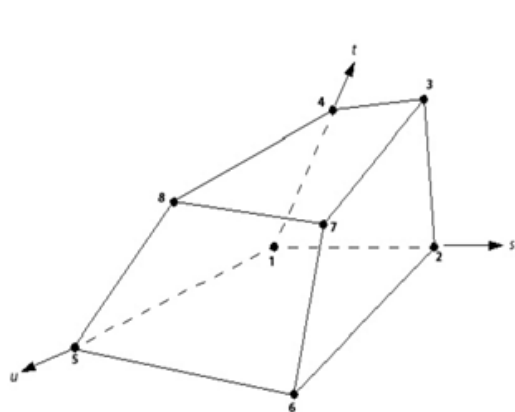
$$V \left( \frac{\rho U_i - \rho^o U_i^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left( \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{U_i}} V$$

где ,  $V$  – контрольный объем,  $\Delta t$  – шаг по времени, индекс  $ip$  означает вычисление в точке интегрирования, суммирование ведется по всем точкам интегрирования, величины с индексом  $^o$  берутся с предыдущего временного шага

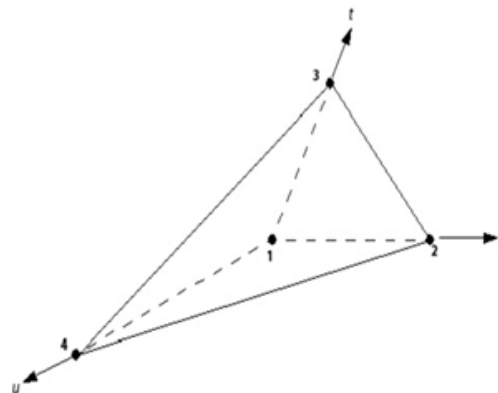


# Типы элементов в ANSYS CFX

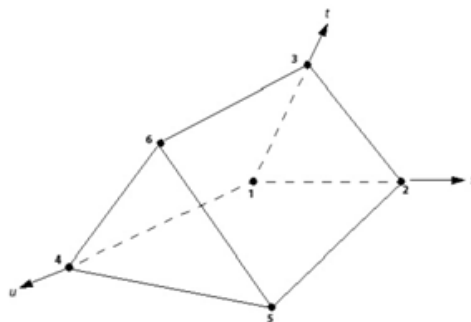
15



Гексаэдрический  
элемент (6-ти гранный)



Тетраэдрический  
элемент (4-х гранный)

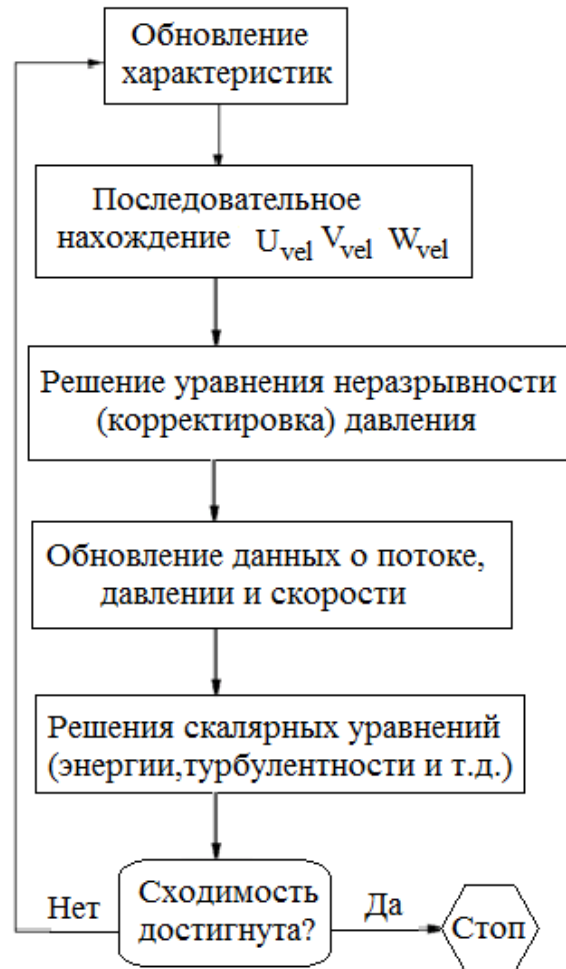


Клиновидный элемент  
(5-ти гранный)

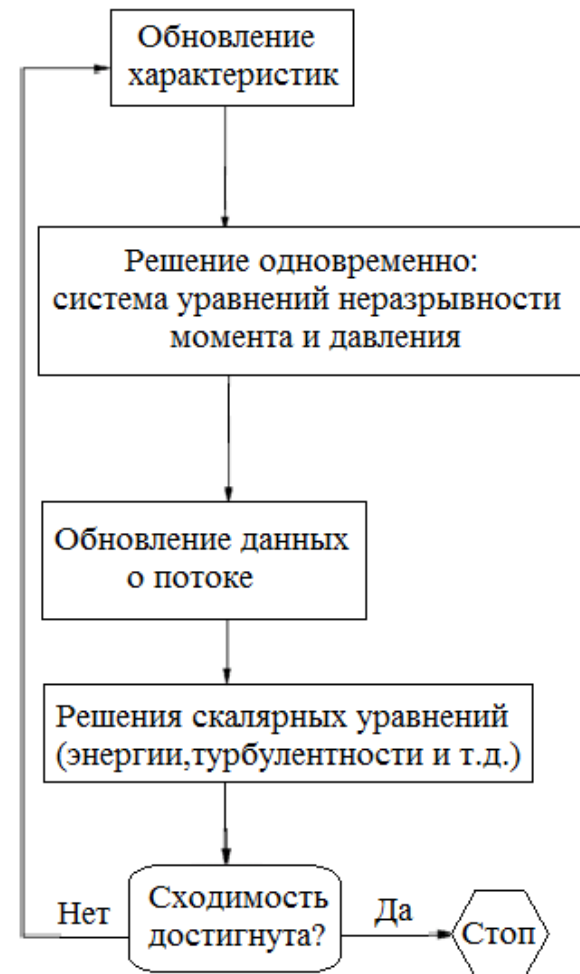
# Алгоритмы решения в ANSYS FLUENT и ANSYS CFX

16

Разделенный (segregated) алгоритм



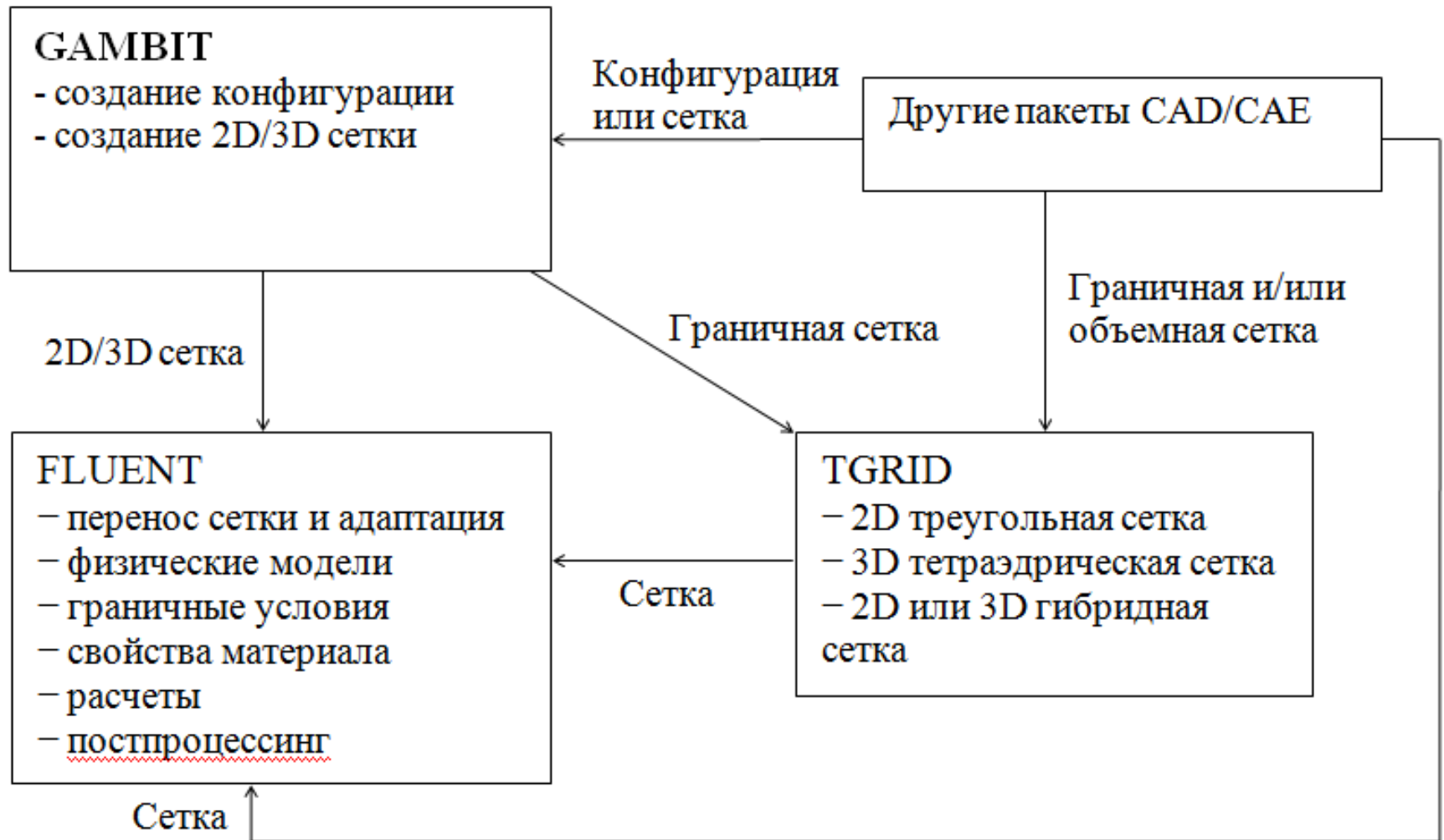
Связанный (coupled) алгоритм





# Структура программного комплекса ANSYS FLUENT

17



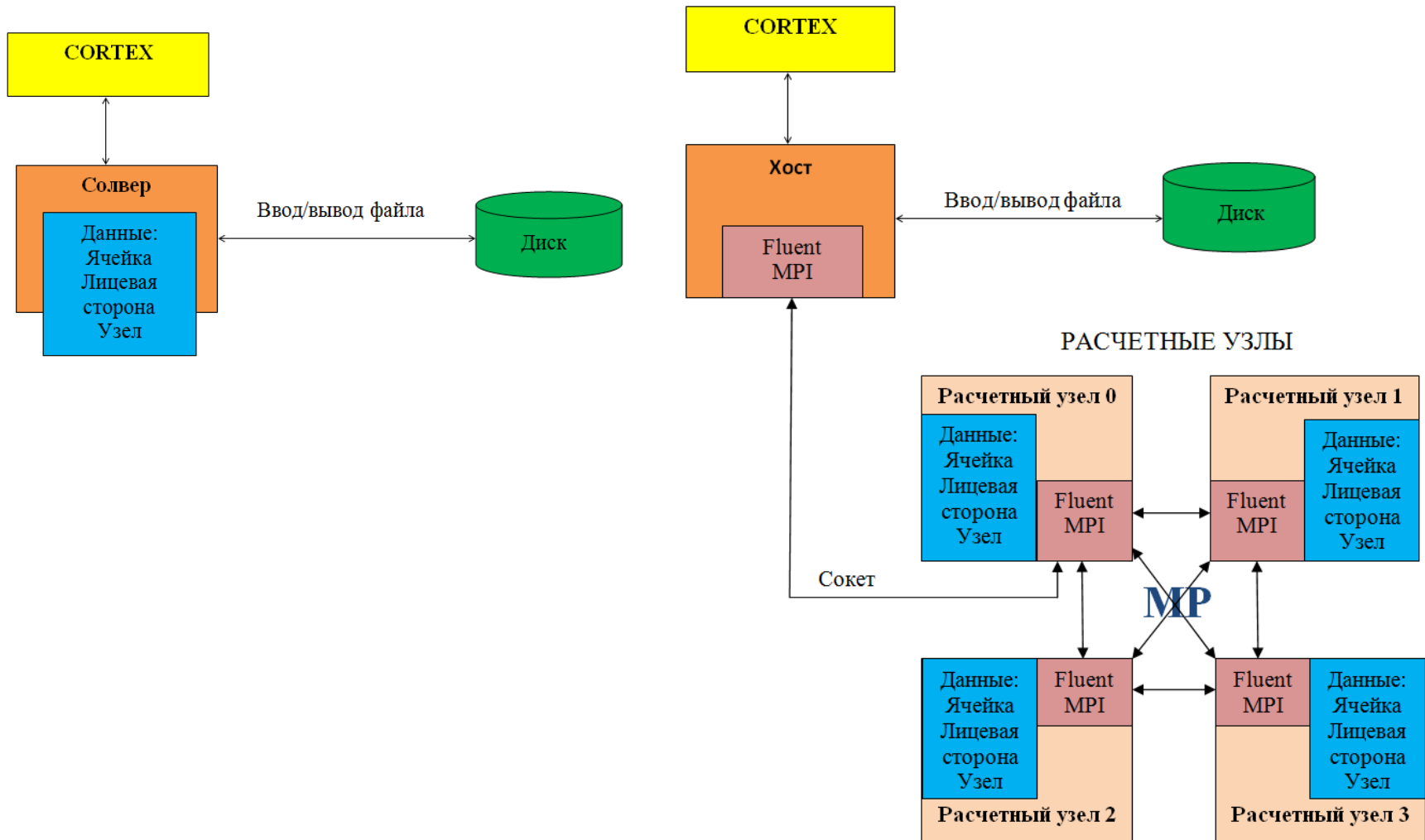
# Структура программного комплекса ANSYS FLUENT

18

- FLUENT – solver (решатель)
- GAMBIT – препроцессор для построения геометрии области и генерации сеток
- Tgrid – дополнительный препроцессор, который может генерировать сеточные объемные ячейки из существующих граничных ячеек
- Фильтры-трансляторы для импорта поверхностных и объемных ячеек из CAD/CAE пакетов

# Стандартная и параллельная архитектура ANSYS FLUENT

19



# Российский комплекс FlowVision для решения задач механики жидкости и газа

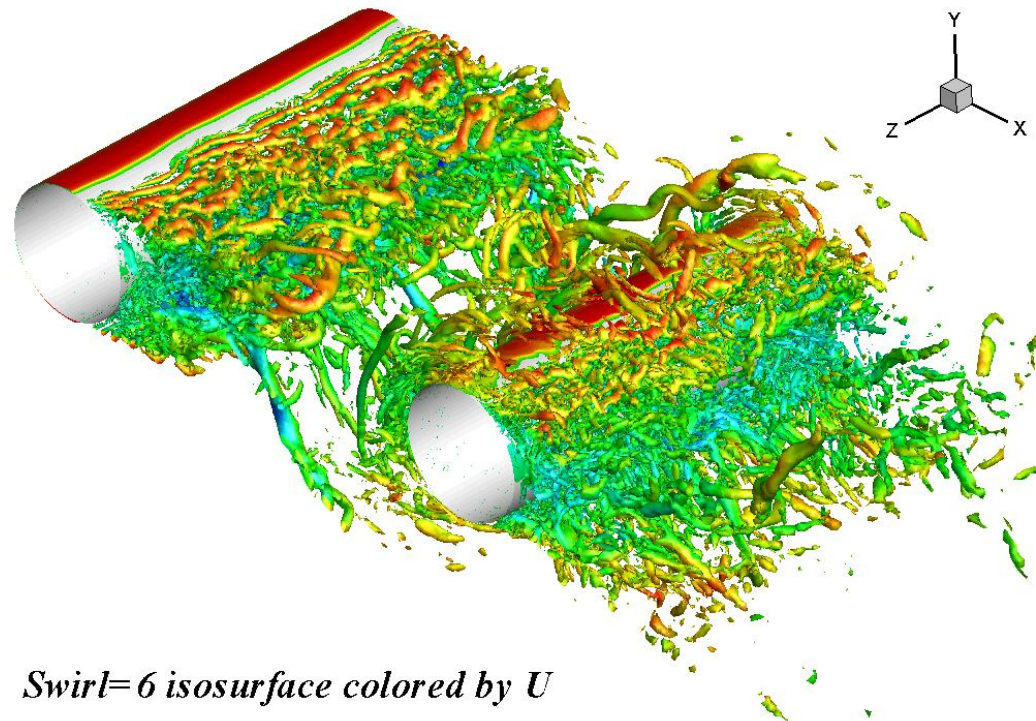
20

- решение сопряженных задач взаимодействия потока с деформируемым телом
- расчет совместного движения свободной поверхности и плавающих тел
- автоматическое построение сетки для расчетных областей любой степени сложности
- локальное дробление и укрупнение ячеек сетки в соответствии с заданными критериями адаптации
- FlowVision HPC – распараллеливание до 1024 ядер

# Представление результатов расчета

21

- IBM «Intrepid» Blue Gene/P  
Лаборатории Argonne  
National Lab (США)
- 8160 узлов
- Каждый узел — два 4-х  
ядерных процессора
- Использовано от **16320** до  
**65280** процессорных ядер
- Сетка — 60 мил. узлов
- Характерный расчет —  
11 суток **2009-2010** гг.



Обтекание тандема цилиндров  
лаборатория «Вычислительная  
гидродинамика и турбулентность»  
СПбГПУ, рук. проф. Стрелец М.Х.

# Инструментарий графического вывода в ANSYS CFX

22

- Трехмерное изображение модели в параллельной и перспективной проекциях
- Визуализация расчетной сетки
- Изображение изолиний и изоповерхностей
- Построение графиков, создание анимации
- Графическое представление результатов, включая разнообразные средства визуализации и обработки результатов (векторные, цветовые контурные заливки, изоповерхности, сечения, трассировка частиц, анимация)
- Экстраполирование результатов на разнообразных сетках и поверхностях произвольного вида и др.

# Литература

23

- [www.ansys.com/](http://www.ansys.com/)
- [www.mscsoftware.com/](http://www.mscsoftware.com/)
- [www.cd.co.uk](http://www.cd.co.uk)
- [www.cd-adapco.com](http://www.cd-adapco.com)
- документация по ANSYS FLUENT (версия 4)
- <http://www.tesis.com.ru/>
- <http://www.flowvision.ru/>