

# ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНЖЕНЕРНОМ АНАЛИЗЕ

## *Лекция 8*

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

Санкт-Петербургский Государственный  
Политехнический Университет

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

# Вычислительные технологии

2

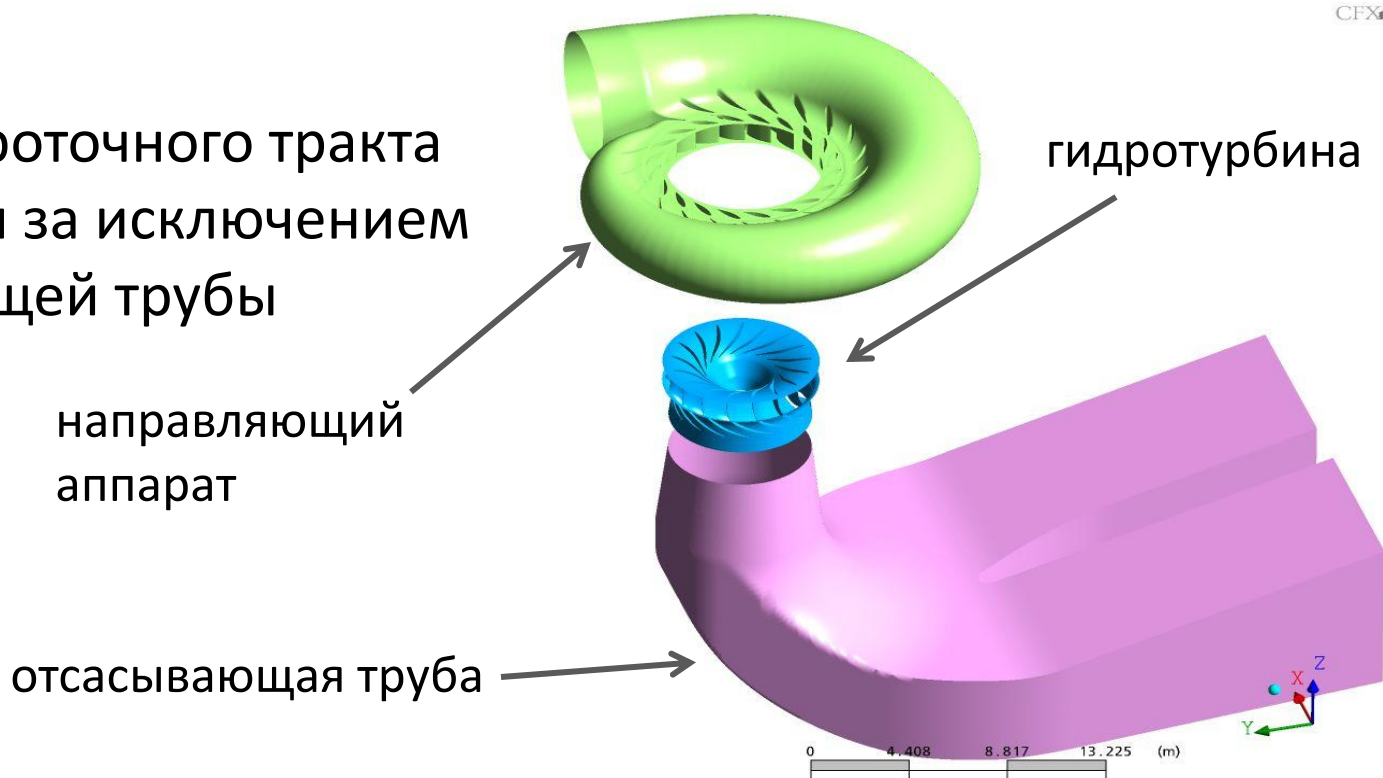
- Вопросы построения геометрии и разбиения области решения задачи на подобласти для проведения параллельных расчетов (декомпозиция области)
- Проблема построения сеток (сеточных областей), которая в большой мере определяет сходимость вычислительных процедур
- Вопросы, связанные с алгебраическими вычислительными процессами решения получающихся при аппроксимации алгебраических систем уравнений
- Вопросы масштабируемости решений на многопроцессорных вычислительных системах
- Проблемы визуализации результатов вычислений

# Моделирование течения в проточном тракте гидротурбин

3

- Пример – задача моделирования течения в проточном тракте гидротурбины (СПбГПУ и концерн «Силовые машины», 2005-2007 гг.)

Геометрия проточного тракта гидротурбины за исключением подающей трубы



# Особенности задачи

4

- Проточный тракт включает в себя спиральную камеру с колоннами статора, направляющий аппарат, рабочее колесо гидротурбины и отсасывающую трубу
- Проточная часть гидротурбины представляет собой весьма сложную по геометрии область
- Турбулентный характер течения, описание которого требует достаточно подробных сеток, обладающих хорошей разрешающей способностью
- Характерные размеры аппроксимирующих сеток имеют порядки многих миллионов ячеек
- Размерность и масштабы рассматриваемой задачи таковы, что необходимо использование суперкомпьютера

# Построение геометрии: CAD системы

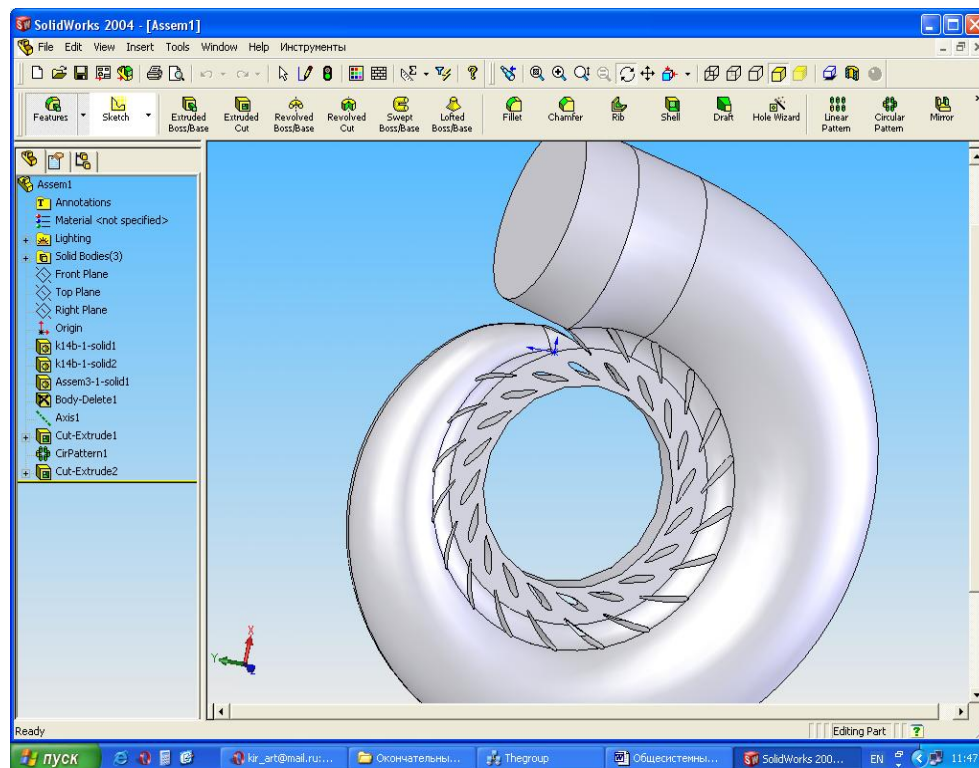
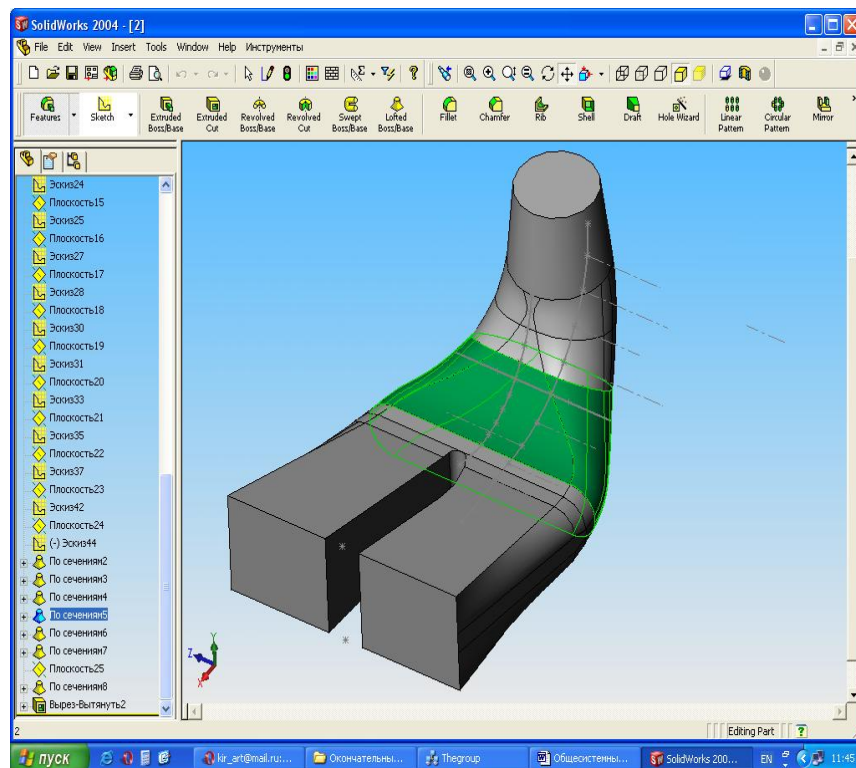
5

- ❑ **Solid Works** (упрощение мощного CAD/CAE/CAM комплекса Pro Engineer)
- ❑ Построение трехмерной геометрии основано на следующем подходе: сначала строятся двумерные эскизы сечений детали, а затем методом «выдавливания» строится вся трехмерная модель
- ❑ Можно редактировать размеры в каждом эскизе, менять количество сечений, технологию «выдавливания» и т.д.
- ❑ Подобная технология применяется в Unigraphics, CATIA и др.

# Построение геометрии: CAD системы

6

Процесс моделирования геометрии отсасывающей трубы и геометрическая модель спиральной камеры для гидротурбины в системе Solid Works

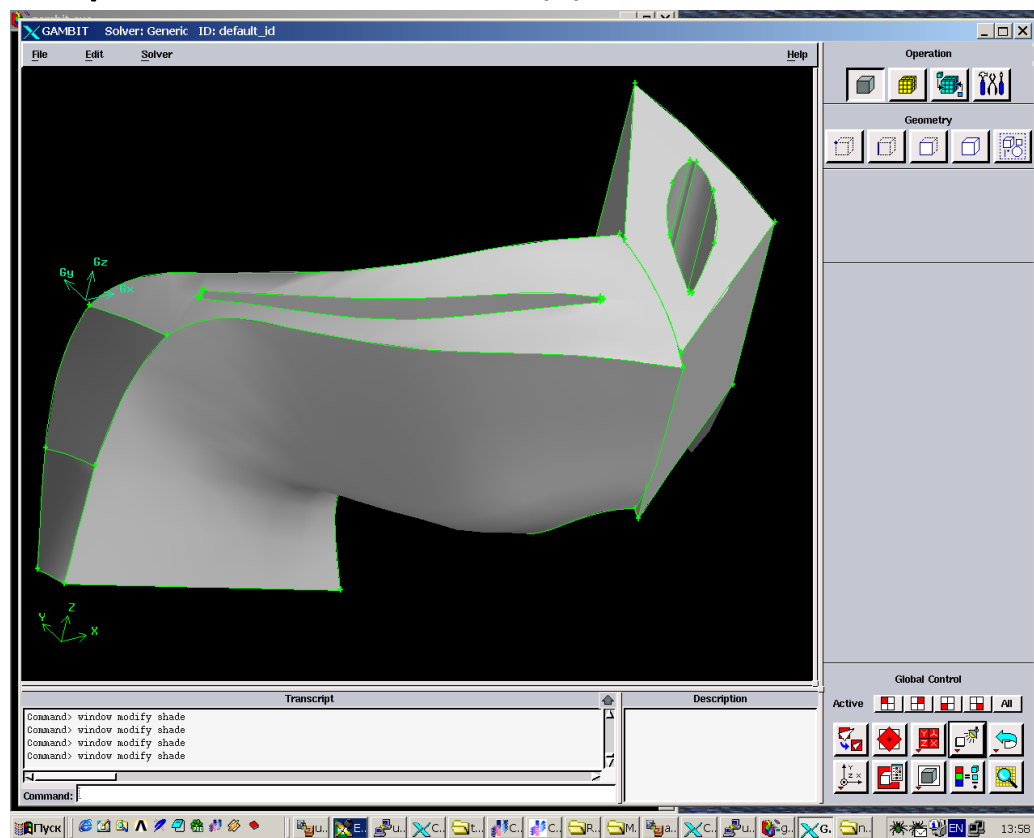


# Построение геометрии: CAD системы

7

- Модуль **ANSYS Turbo Kit** в ANSYS CFX и модуль **Turbo GAMBIT** в системе ANSYS Fluent ориентированы на построение геометрии и расчетных сеток для лопастей турбины

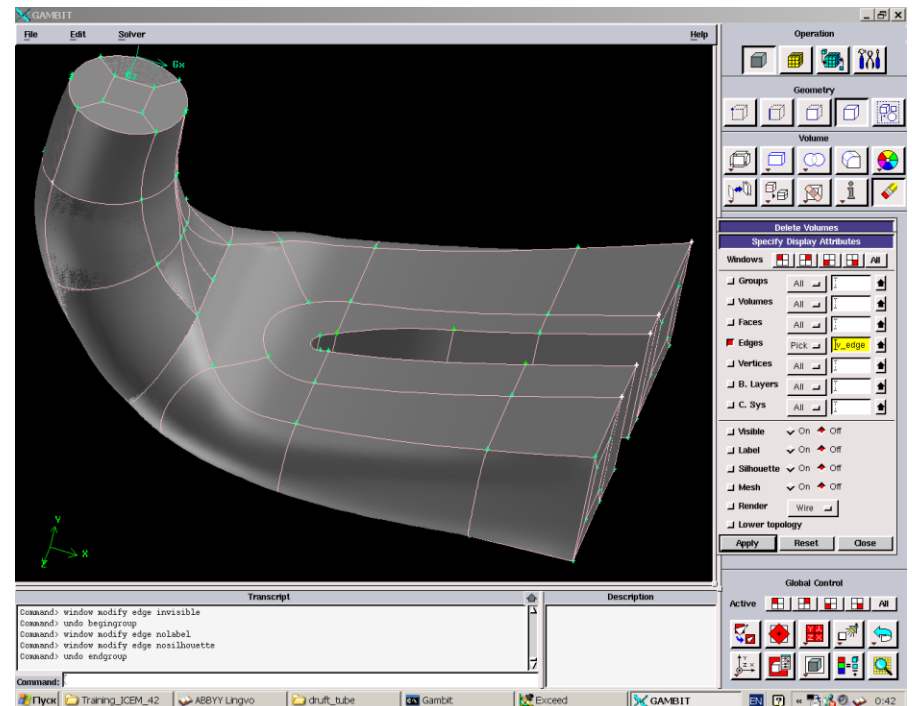
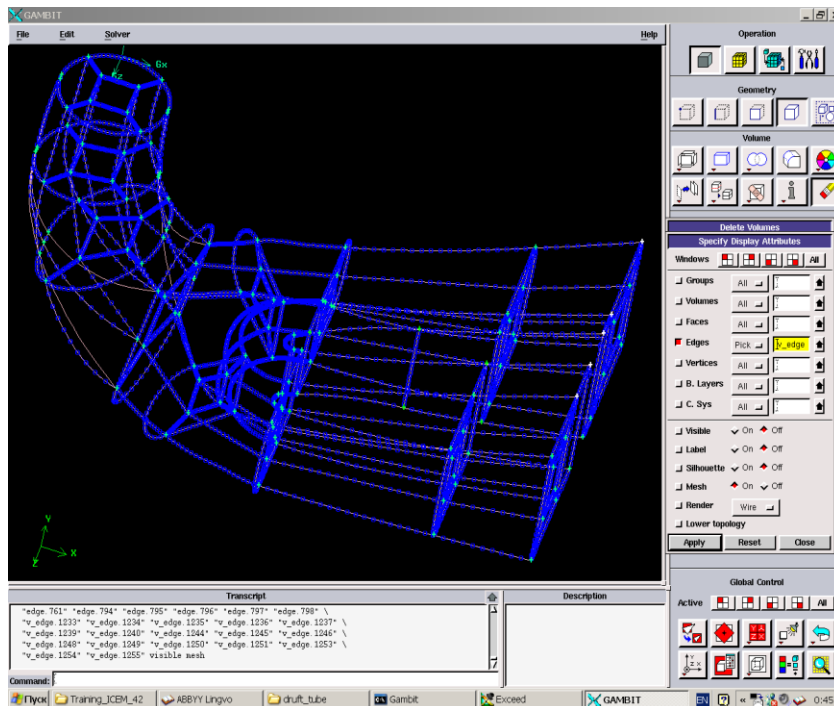
геометрия лопасти турбины и лопатки направляющего аппарата, построенные в системе Turbo GAMBIT



# Построение геометрии: CAD системы

8

Промежуточный и конечный виды геометрической модели отсасывающей трубы, выполненные в среде системы Turbo Gambit

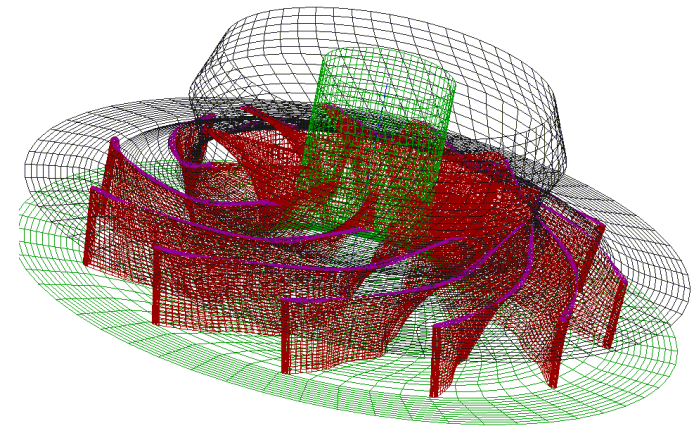




# Построение геометрии: CAD системы

9

- Система **ANSYS Blade Gen**, основное назначение – построение геометрических моделей лопастных колес, диффузоров, рабочих колес турбин и пр.
- Недостатки системы ANSYS Blade Gen:
  - / невозможность комбинирования способов задания геометрии турбинной лопатки
  - / для достаточно точного задания геометрической модели рабочего колеса турбины необходимо иметь большое количество исходных данных, которые приходится определять вручную



рабочее колесо  
гидротурбины

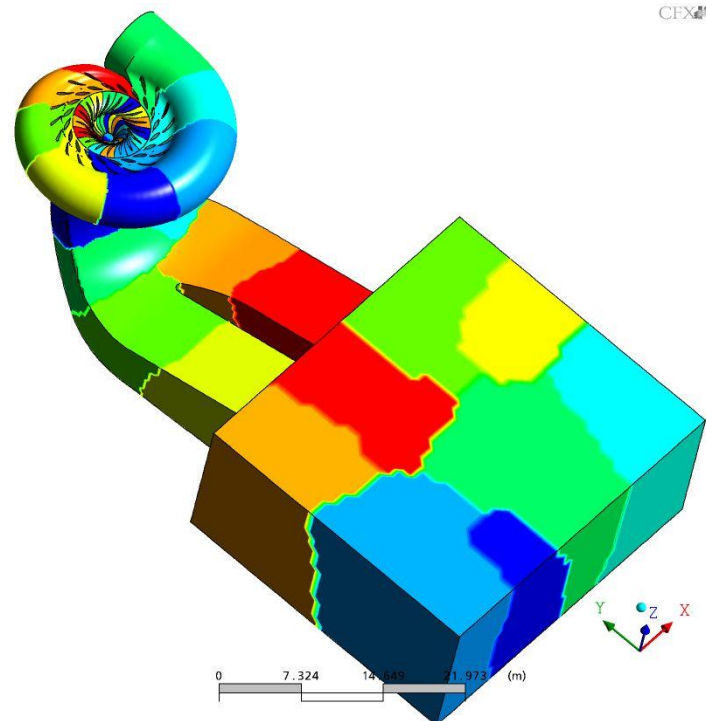
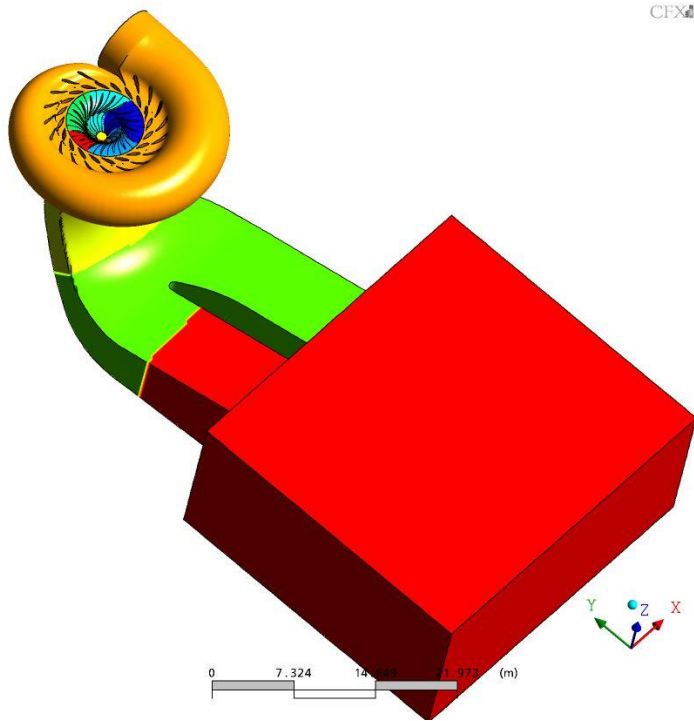
# Декомпозиция области

10

- Основные расчеты проводились в программном комплексе ANSYS CFX, в котором для решения систем линейных алгебраических уравнений используется многосеточный метод, распараллеливание которого проводится на уровне постановки алгебраической вычислительной задачи
- Вся расчетная область разбивается на части, число которых равно числу задействованных в расчете процессоров. На каждой итерации задача решается независимо в каждой области, а затем производится «сшивка» решений

# Декомпозиция области в ANSYS CFX

11

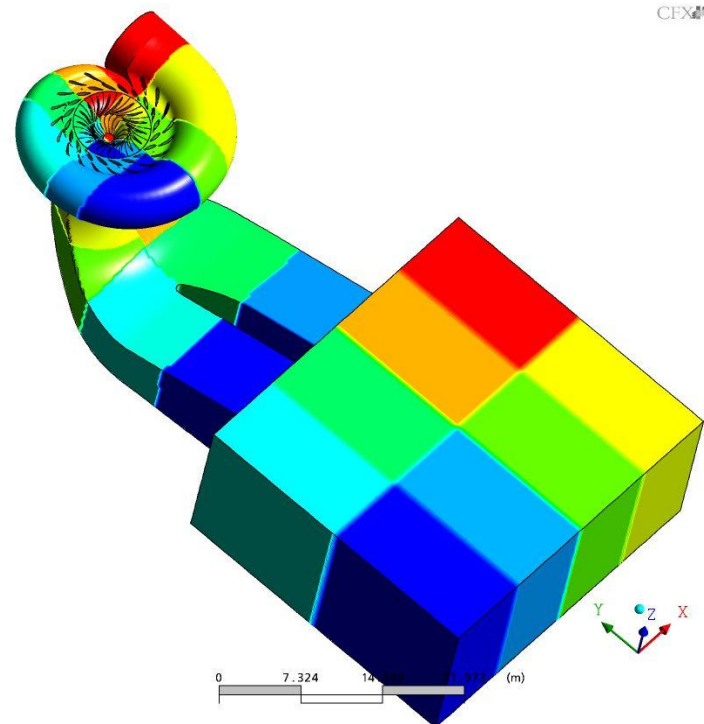
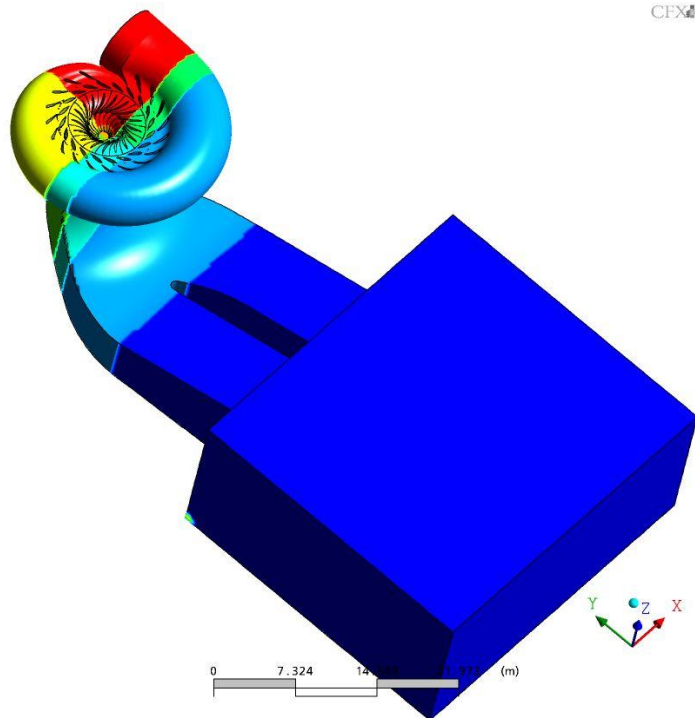


## MeTiS-алгоритм

Разбиение всей расчетной области в целом (Coupled partitioning) слева, независимое разбиение каждой подобласти (Independent partitioning) справа

# Декомпозиция области в ANSYS CFX

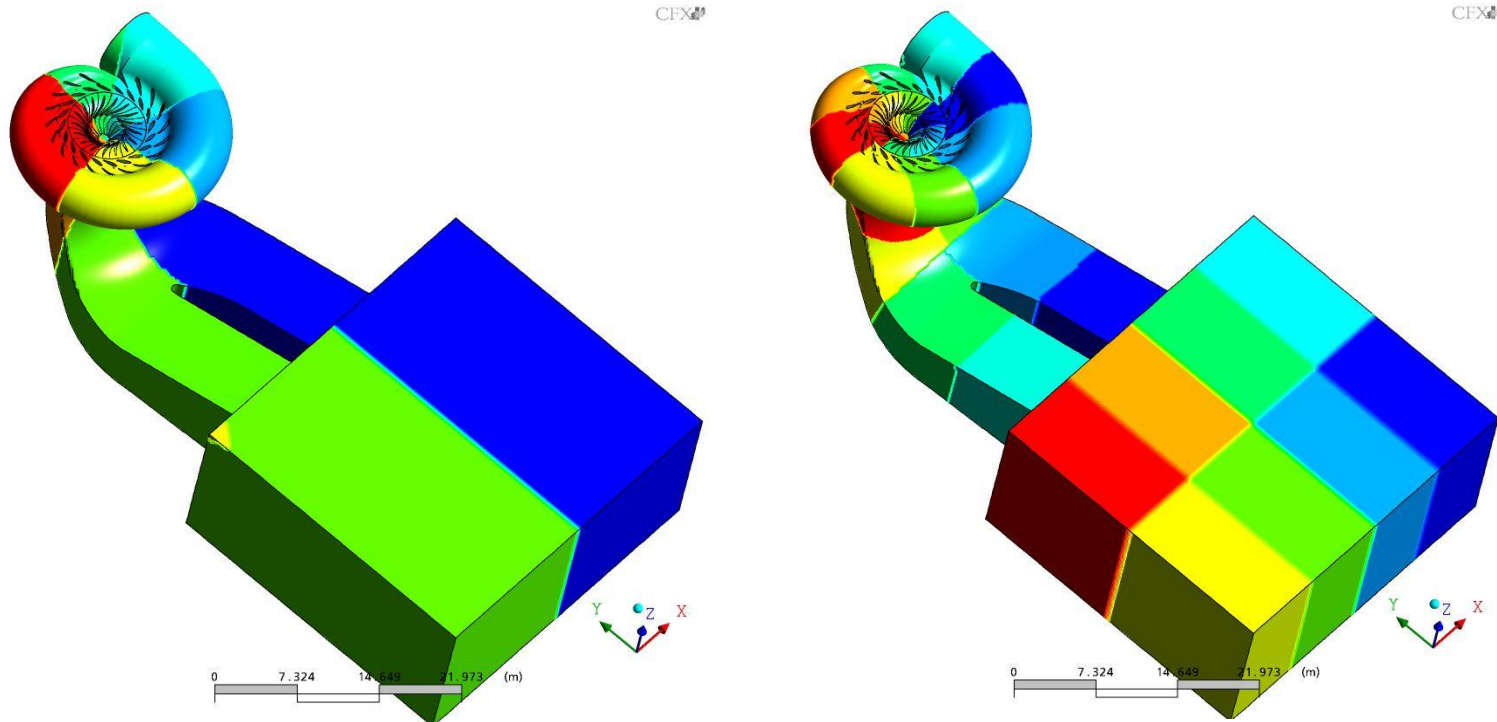
12



Рекурсивное покоординатное половинное деление  
Coupled partitioning слева, Independent partitioning справа

# Декомпозиция области в ANSYS CFX

13

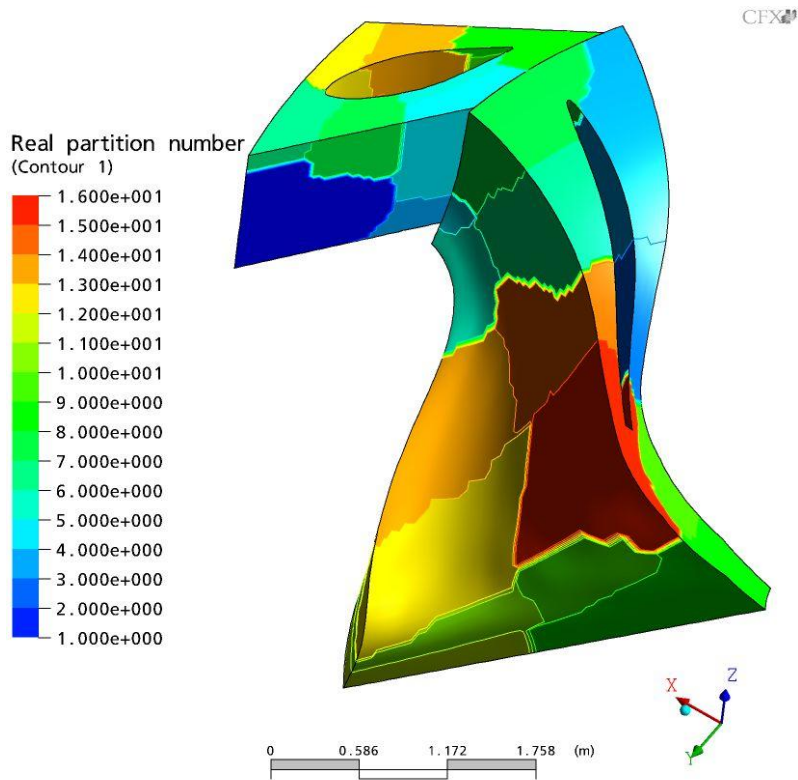


Оптимизированное рекурсивное покоординатное  
половинное деление

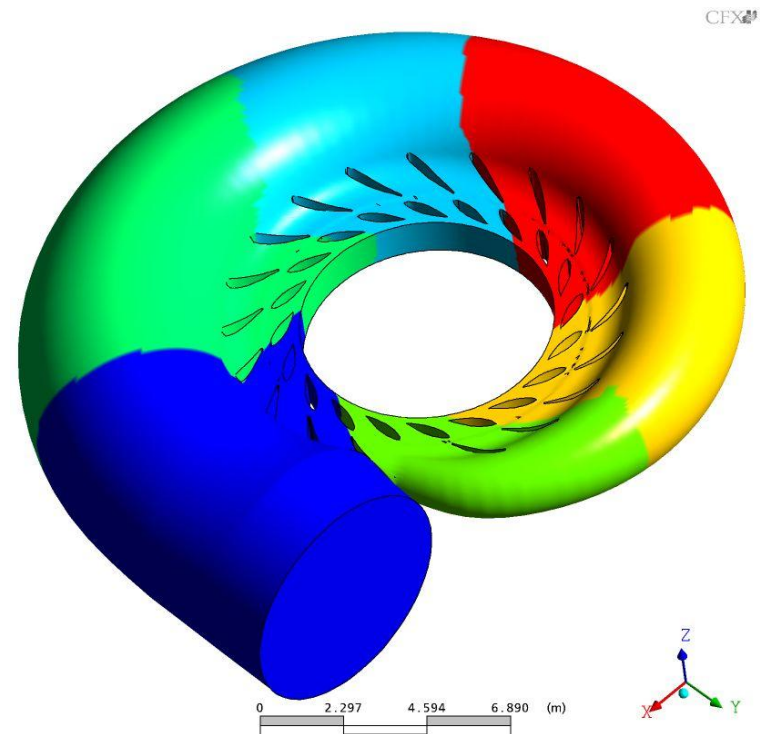
Coupled partitioning слева, Independent partitioning справа

# Декомпозиция области в ANSYS CFX

14



Разбиение области в  
окрестности лопатки  
для 16 процессоров



Разбиение области  
спиральной камеры  
для 6 процессоров

# Эффективность декомпозиции

15

- Распараллеливание проходит эффективно когда зоны пересечения областей, обслуживаемых разными процессорами, составляют 10-15% от общего числа расчетных узлов
- При расчете гидротурбины на 16 процессорах все алгоритмы, кроме разбиения по радиусу, работают примерно одинаково, однако при числе процессоров 30 и более обнаруживаются преимущества MeTiS алгоритма – он дает область пересечения 12-14%, тогда как остальные алгоритмы – от 20 до 47%.



# Построение расчетной сетки

16

- От качества построенной расчетной сетки напрямую зависят сходимость численной процедуры и качество полученных результатов
- Увеличение числа элементов в расчетной сетке влечет существенное увеличение вычислительной ресурсоемкости задачи
- Расчетные сетки:
  - / тетраэдральные (четырехгранные) – более простые в построении, но требуется большое число элементов
  - / гексаэдральные (шестигранные) – трудоемкий процесс построения, но требуется меньше элементов
- При моделировании течений в сложных областях с ограниченными вычислительными ресурсами более целесообразно использовать гексаэдральные сетки



# Построение расчетной сетки

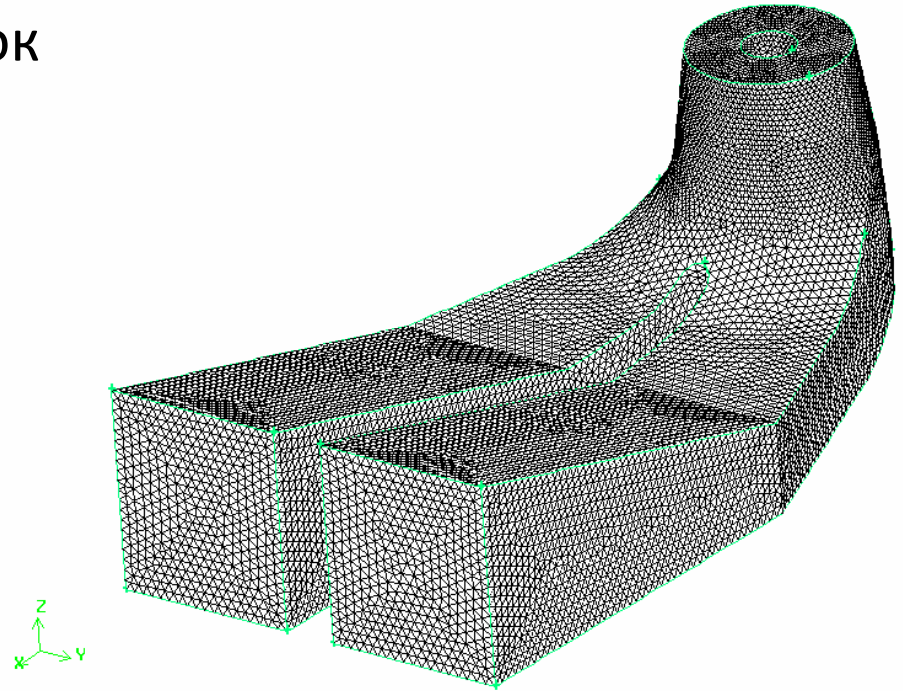
17

- Программа **Gambit** (входящая в Fluent)
- **ICEM CFD** (входящая в ANSYS CFX)
- Построение трехмерных геометрических объектов сложной конфигурации и расчетных сеток для них при помощи графического интерфейса пользователя или программным способом
- Имеется возможность импортировать геометрию, используя форматы ACIS, Parasolid, IGES, STEP, ICEM Input, CAD и др.
- При построении сеток используются различные методы их генерации, можно строить как тетраэдральные, так и гексаэдральные сетки

# Построение сетки в Gambit

18

Генерация тетраэдральных сеток может проводиться в полуавтоматическом режиме: после задания размеров элементов во всей области или на подобластях автоматически выполняется триангуляция



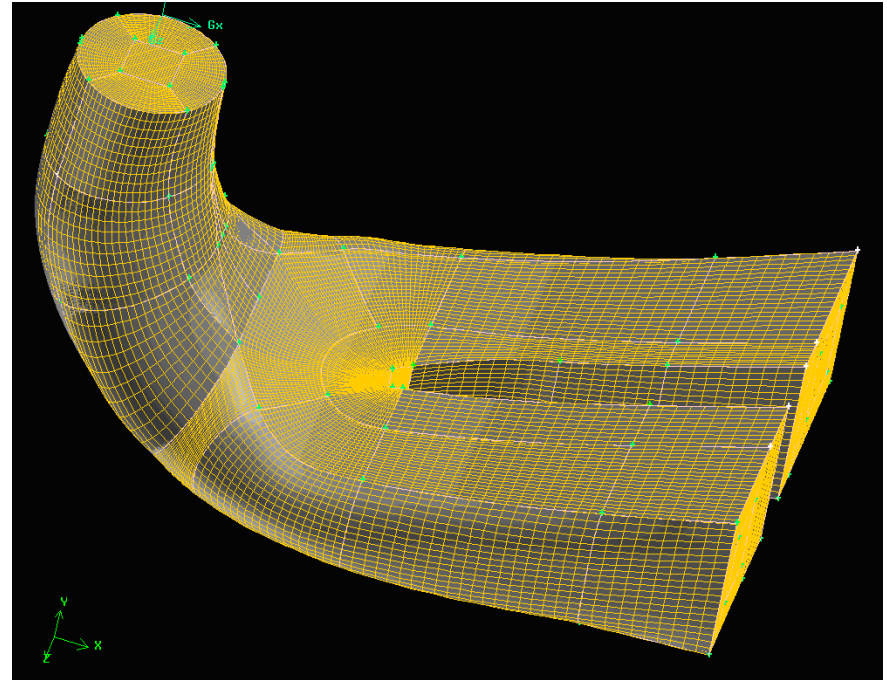
расчетная сетка в отсасывающей трубе гидротурбины, состоящая из тетраэдральных элементов, построенная в системе Gambit в полуавтоматическом режиме

# Построение сетки в Gambit

19

Построение более экономичных гексаэдральных сеток:

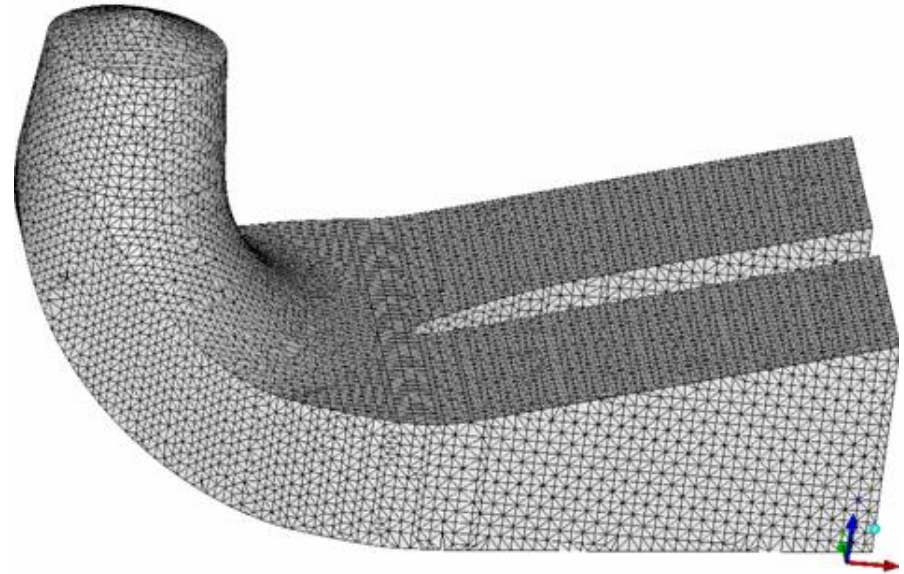
- расчетную область разбивают на части, топологически эквивалентные параллелепипедам
- для каждой части строится разбиение каждого ребра «параллелепипеда» с последующим построением двумерных сеток на гранях
- на этой основе строится трехмерная сетка в каждом параллелепипеде



# Построение сетки в ANSYS ICEM CFD

20

- ❑ ICEM CFD Tetra (построение тетраэдральных сеток в полуавтоматическом режиме)
- ❑ Возможность строить специальные сетки, состоящие из призматических элементов, вблизи стенок для повышения точности расчета пограничного слоя

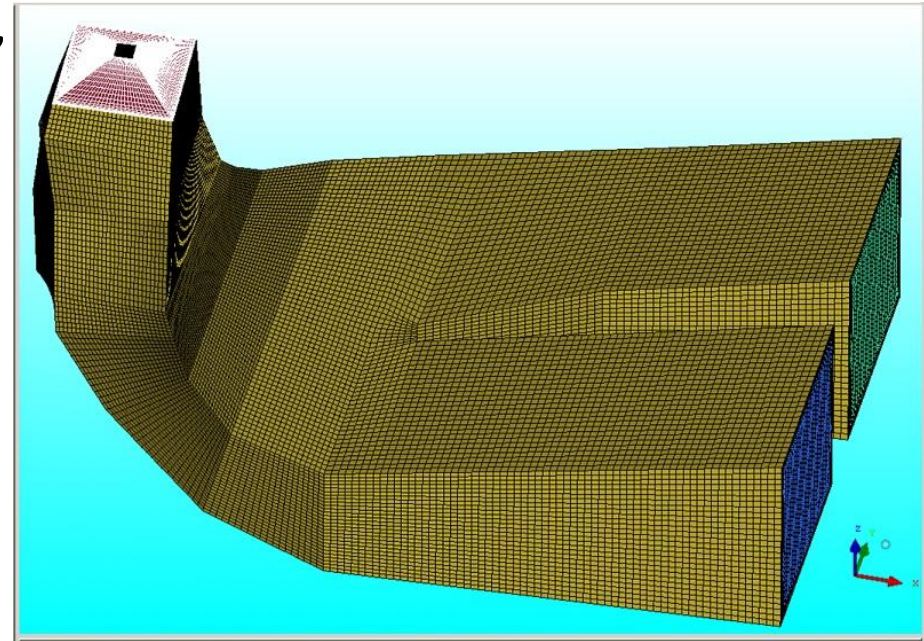


тетраэдральная сетка  
для отсасывающей  
трубы, построенная в  
ICEM CFD Tetra

# Построение сетки в ANSYS ICEM CFD

21

- ICEM CFD Hexa
- Наряду с реальной геометрией, строится система блоков
- Задаются ассоциации между элементами блоков и элементами геометрии
- При построении сетки она сначала задается на блоках, а затем, используя заданные связи (ассоциации), автоматически проектируется на реальную геометрию

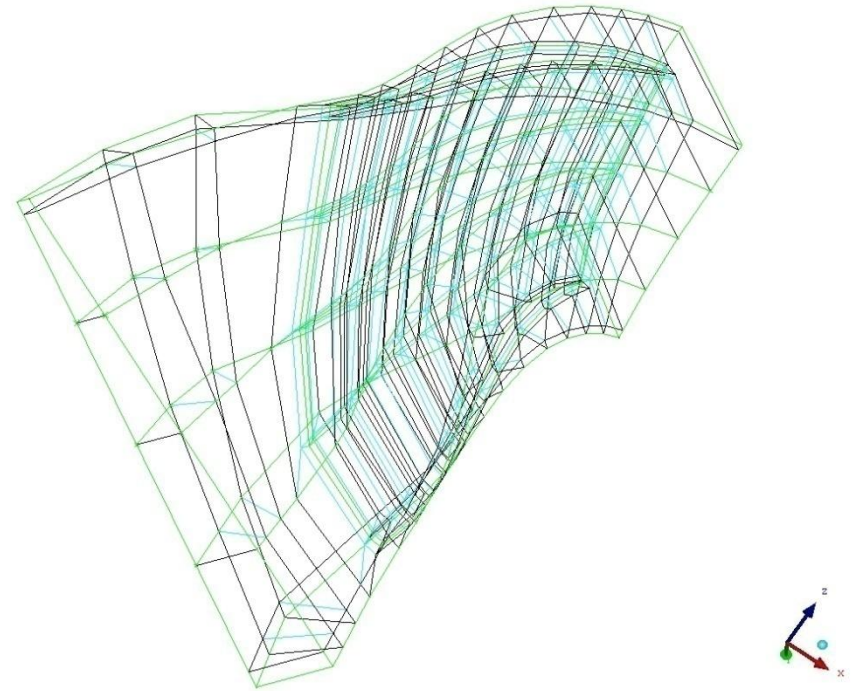
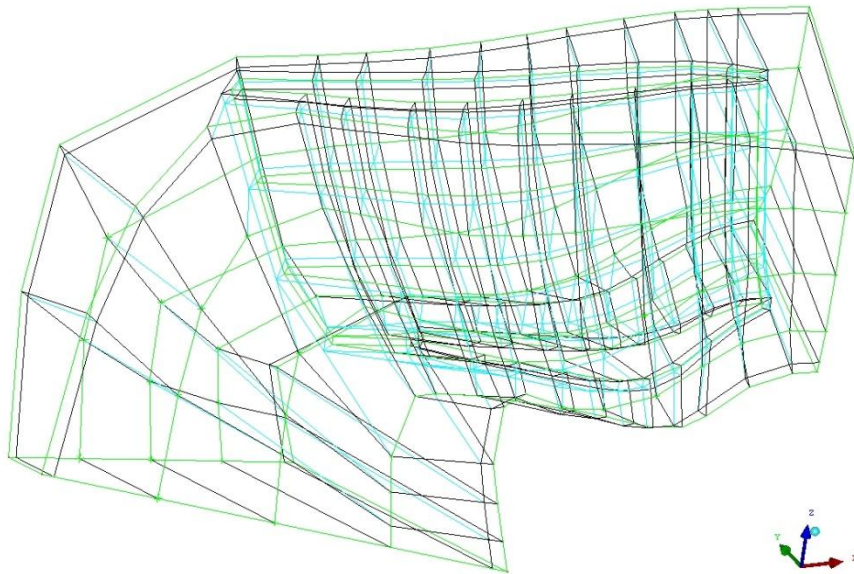


Сетка, построенная в системе ICEM CFD Hexa



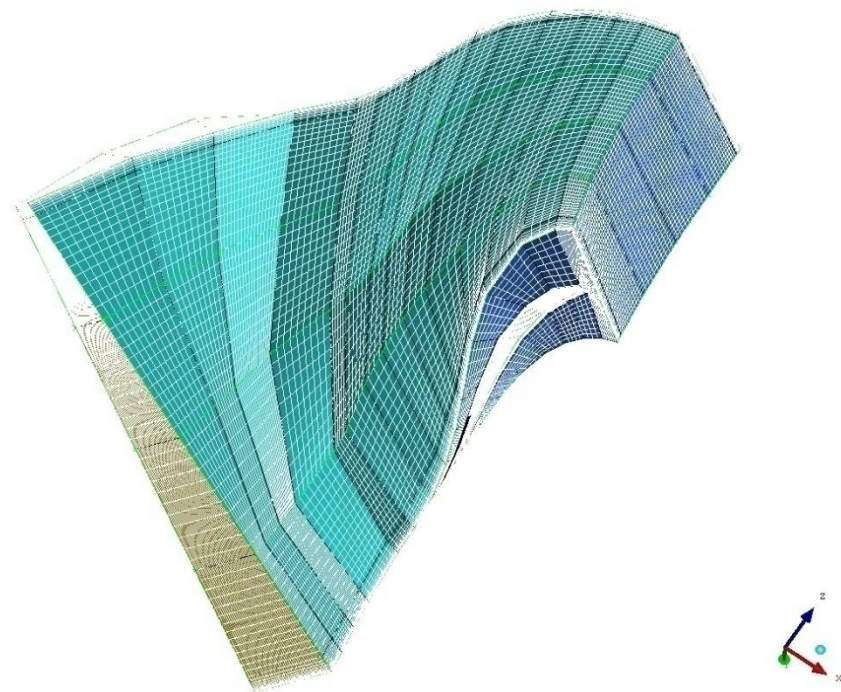
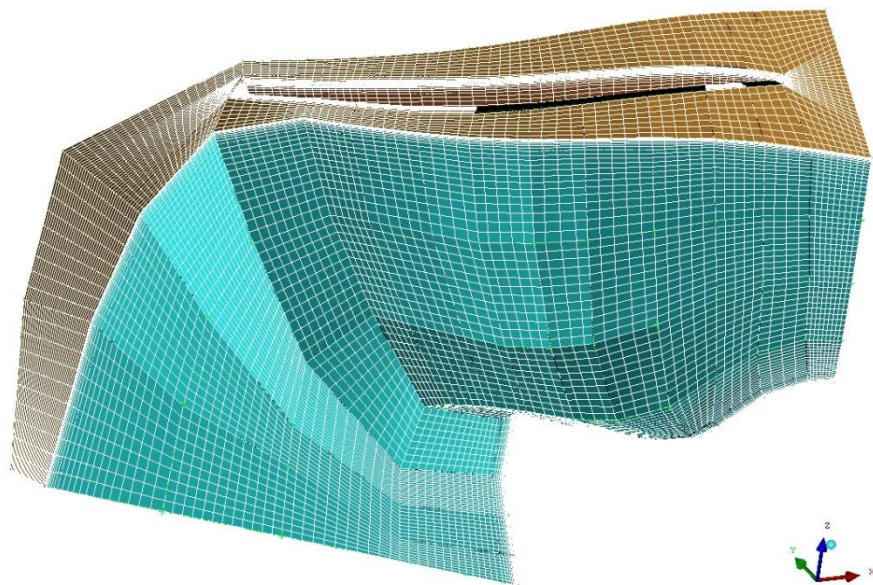
# Система блоков для построения сетки в рабочем колесе

22



# Сетка на блоках

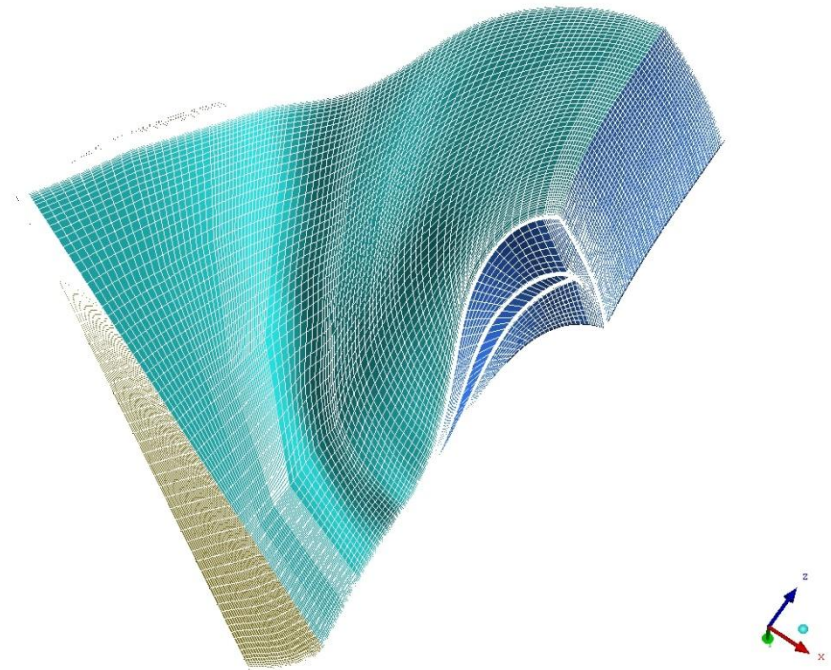
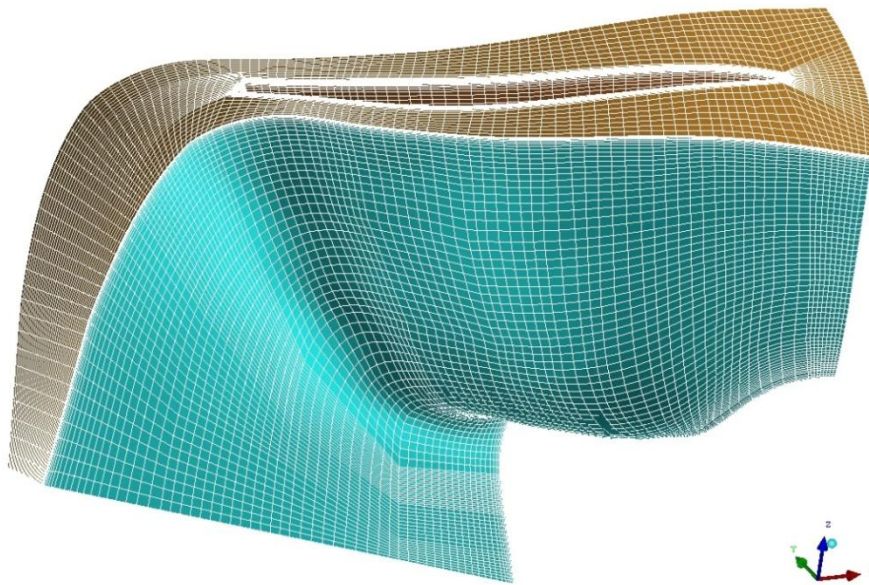
23





# Итоговая сетка, построенная в ANSYS ICEM CFD Hexa

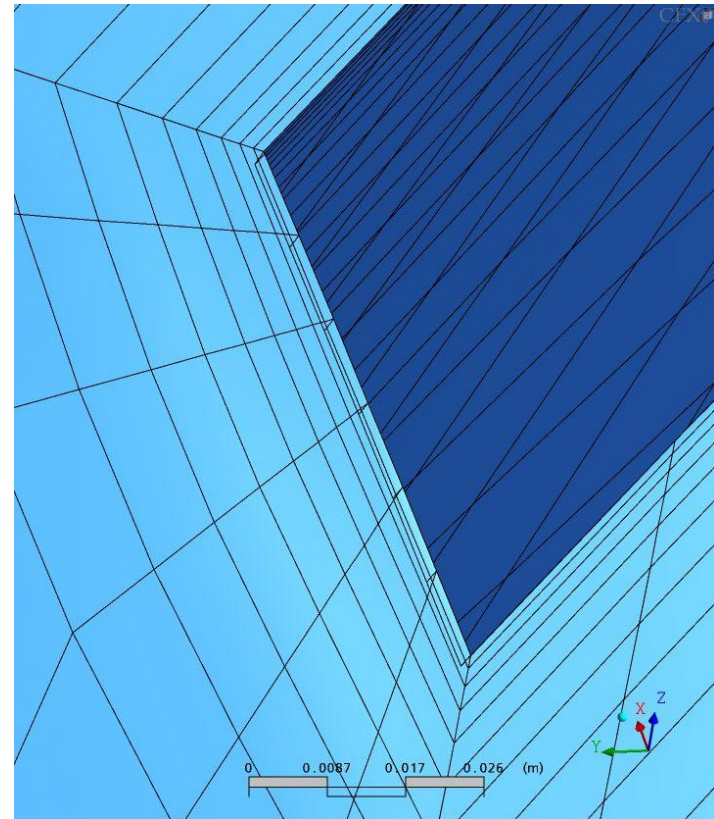
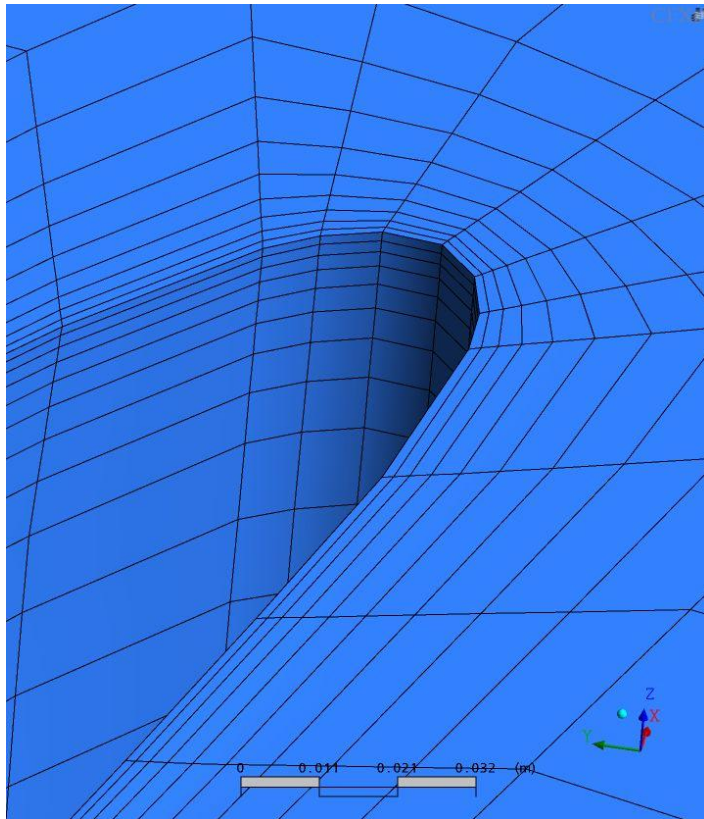
24





# Расчетные сетки в рабочем колесе, построенные в разных системах

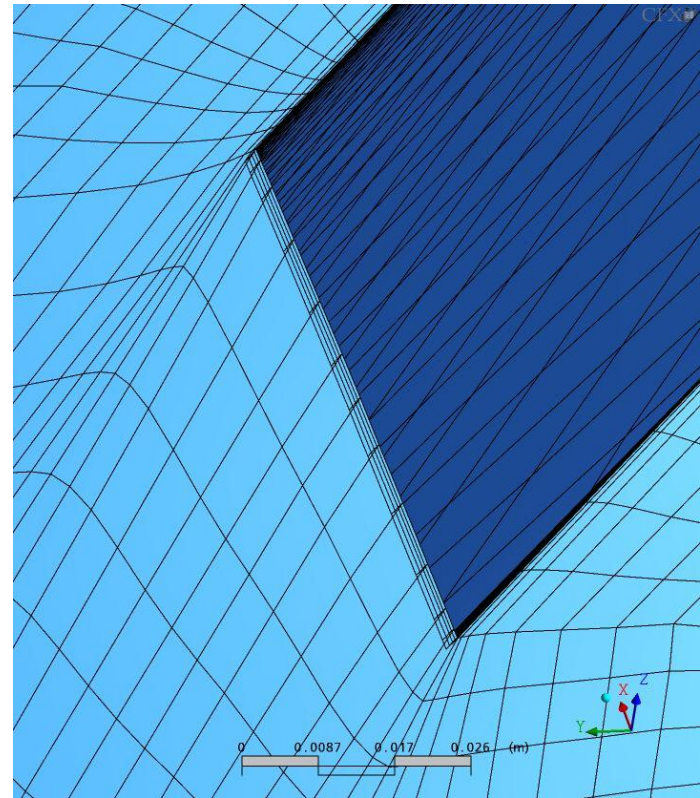
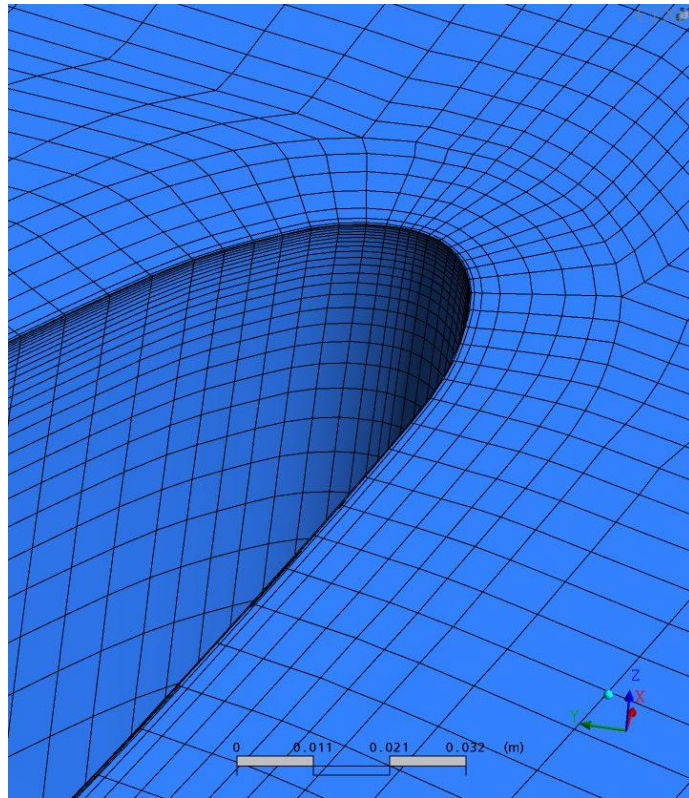
25



227 500 узлов, ANSYS ICEM CFD

# Расчетные сетки в рабочем колесе, построенные в разных системах

26

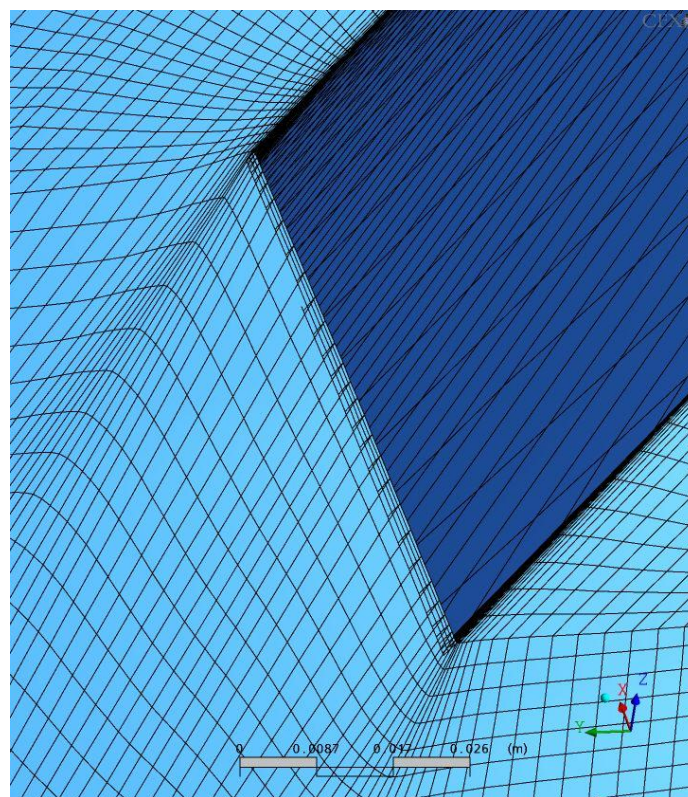
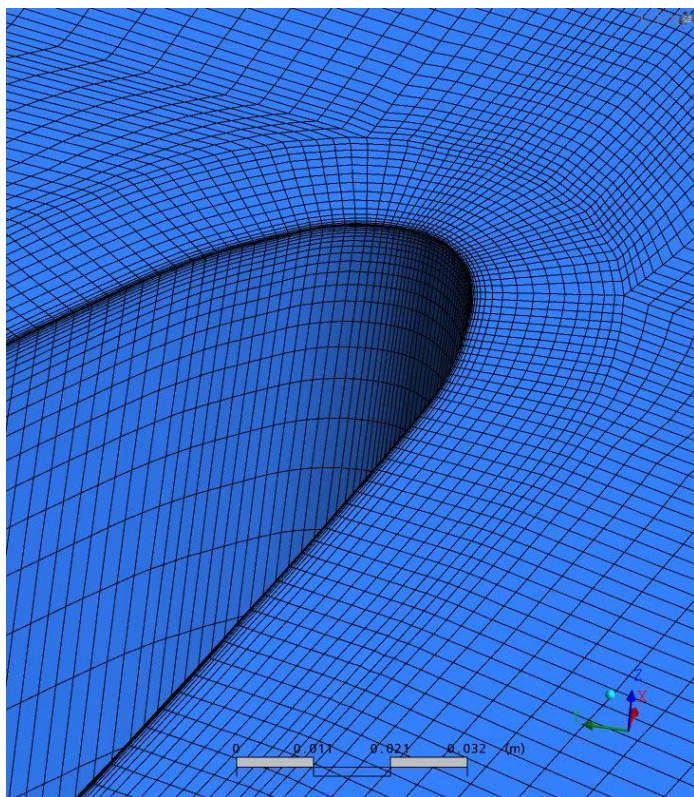


777 548 узлов, ANSYS TurboGrid



# Расчетные сетки в рабочем колесе, построенные в разных системах

27



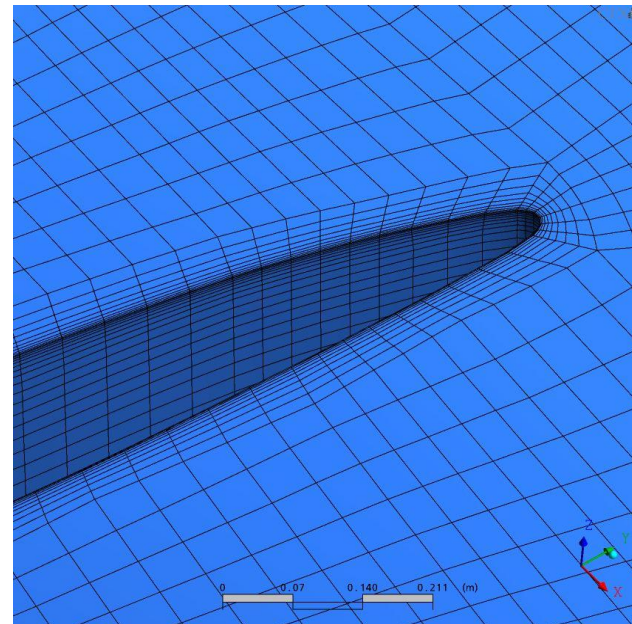
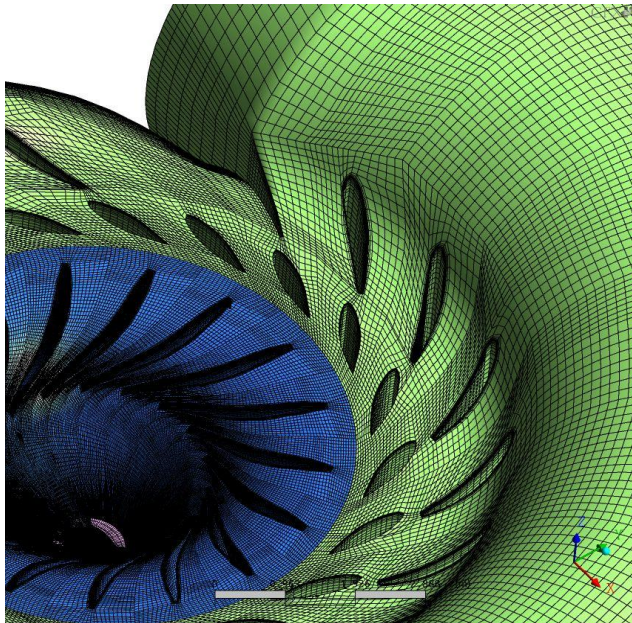
3 338 982 узлов, ANSYS TurboGrid



# Расчетные сетки для всего проточного тракта

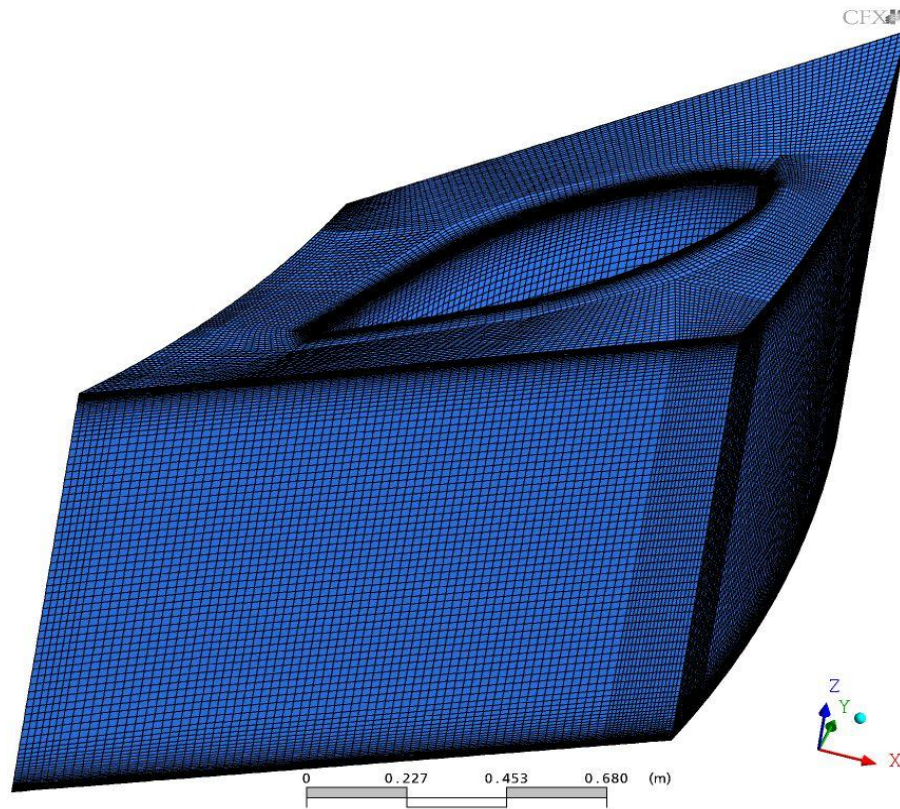
28

- При моделировании течения во всем проточном тракте гидротурбины использовались две расчетные сетки, построенные в программном комплексе ANSYS ICEM CFD
- Грубая сетка – 2.5 мил. расчетных узлов
- Более тонкая – около 6 мил. расчетных узлов

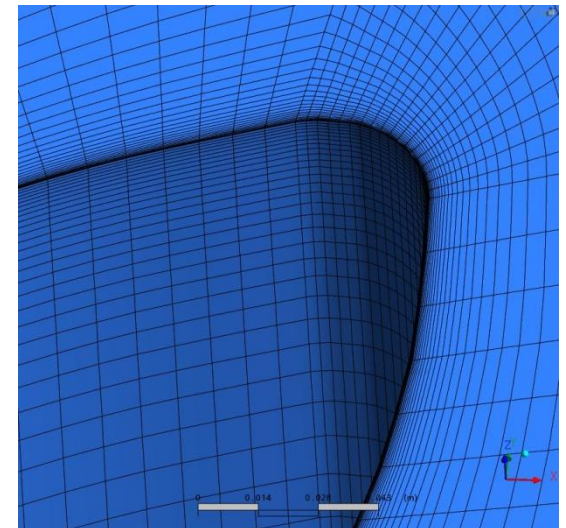
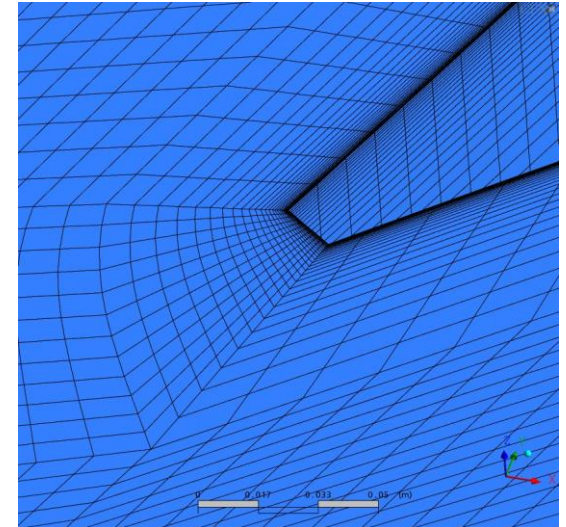


# Расчетные сетки на одном периоде направляющего аппарата

29



1 152 360 расчетных узлов





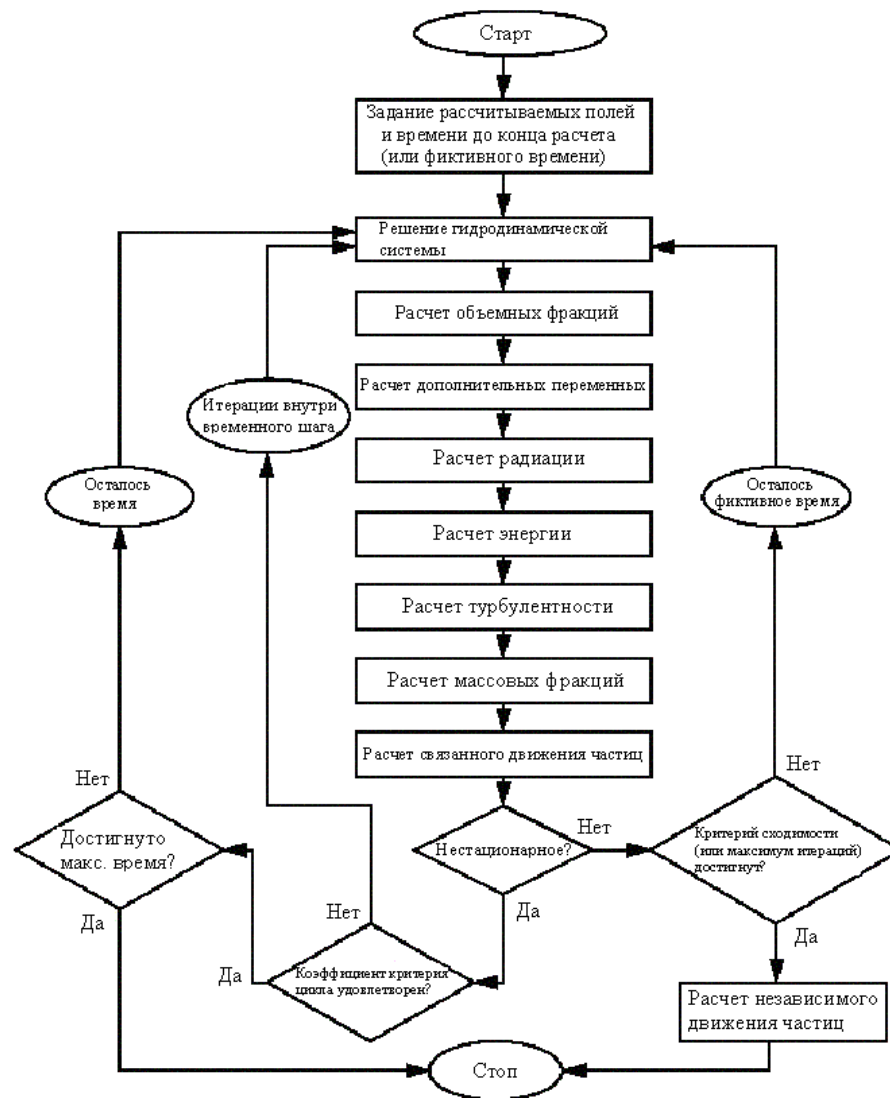
# Алгебраические вычислительные процедуры

30

- Дискретизация основных уравнений переноса (массы, количества движения и энергии) в ANSYS CFX построена на основе метода конечных объемов
- Используются «противопоточные» схемы первого порядка (Upwind) и специальные схемы второго порядка точности (High resolution)
- Для решения полученных дискретных уравнений используется параллельный алгебраический решатель (Coupled solver)
- На каждой итерации нелинейные уравнения линеаризуются, а полученные линейные уравнения решаются при помощи многосеточных методов

# Блок-схема решателя комплекса ANSYS CFX

31



# Моделирование турбулентности

32

- RNG k- $\varepsilon$  (Renormalization-group) модель
- SST k- $\omega$  (Shear-Stress Transport – модель переноса напряжений)
- RSM (Reynolds Stress Model – модель Рейнольдсовых напряжений)
- Все модели рекомендованы разработчиками ANSYS CFX для расчета течения в турбомашинах.
- Эти модели являются вариантами или модификациями рассмотренных ранее моделей турбулентности.



# Параметры для нестационарных расчетов

33

Вариант расчета	Объемный расход, м <sup>3</sup> /с	Количество узлов расчетной сетки	Модель турбулентности
Вариант 1	368.0	2 597 242	k-ε RNG
Вариант 2	368.0	5 624 563	k-ε RNG
Вариант 3	368.0	5 624 563	k-ω SST
Вариант 4	319.2	2 597 242	k-ε RNG
Вариант 5	319.2	5 624 563	k-ε RNG

Для расчета 40 секунд виртуального времени расчет проводился в течение 3 месяцев на 6 узлах кластера с использованием 24-процессоров (по два двухъядерных процессора AMD Opteron 275 на ядро и 8 Гб оперативной памяти). Расчетная область разбивалась на 24 части.

# Результаты расчетов

34

- Вычисления проводились для всей проточной части турбомашины – от входа воды в улитку перед направляющим аппаратом до выхода ее из отсасывающей трубы
- Стационарный расчет дает достаточно близкие значения в части гидродинамических потерь к нестационарному варианту расчета и одновременно является значительно менее затратным (в 10 раз и более)
- Нестационарность задачи обусловлена вращением рабочего колеса

# Результаты расчетов

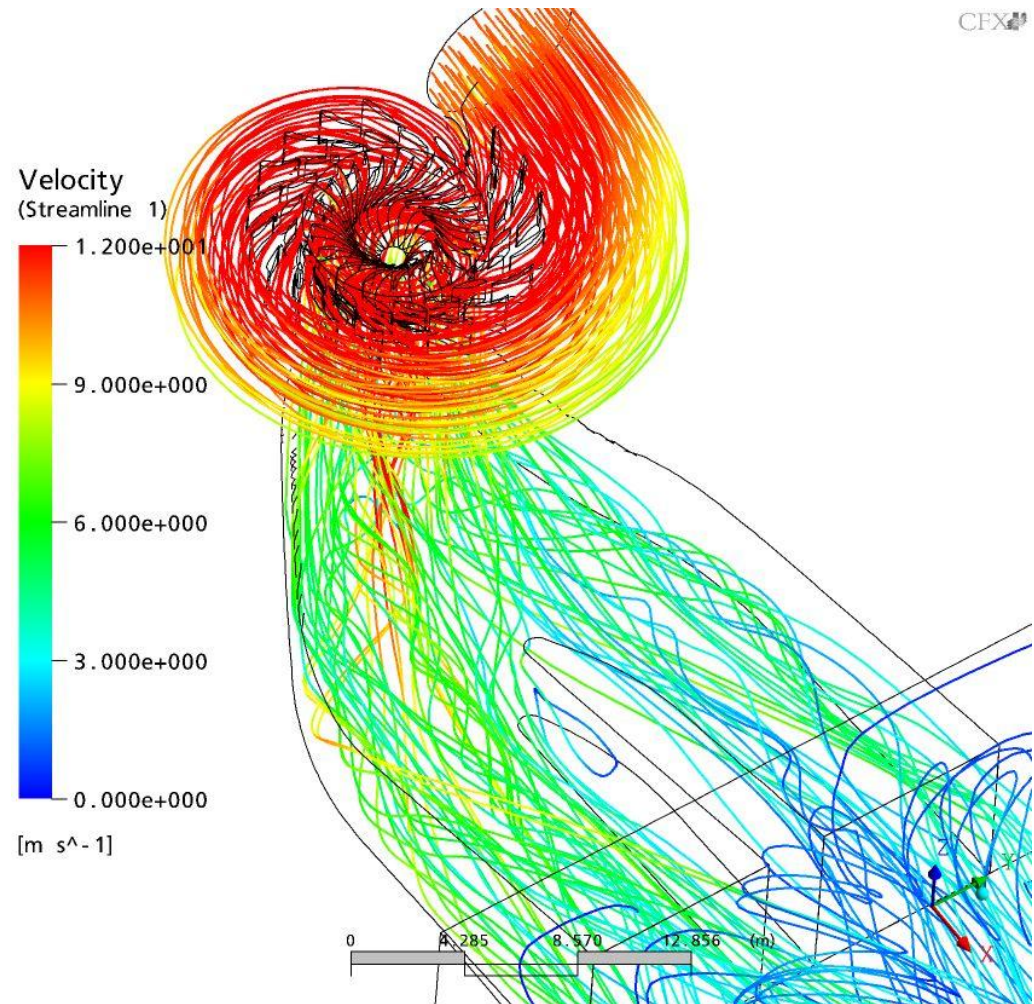
35

- Моделирование течения на подробных сетках (примерно 1 миллион расчетных узлов в каждой части турбины)
- КПД всей гидротурбины мало отличается от экспериментального значения КПД (порядка 0.19%), что является весьма высоким показателем для инженерных расчетов
- Потери кинетической энергии в каждой из частей, вычисленные с использованием различных моделей турбулентности, отличаются не более чем на 0.15%, что также является хорошим показателем

# Результаты расчетов

36

- Линии тока во всем проточном тракте гидротурбины
- Характер линий тока за турбиной в отсасывающей трубе показывает существование вихревой зоны, где формируется «вихревой жгут», срывы и пульсации которого приводят к сильным гидродинамическим ударным воздействиям на гидромашину



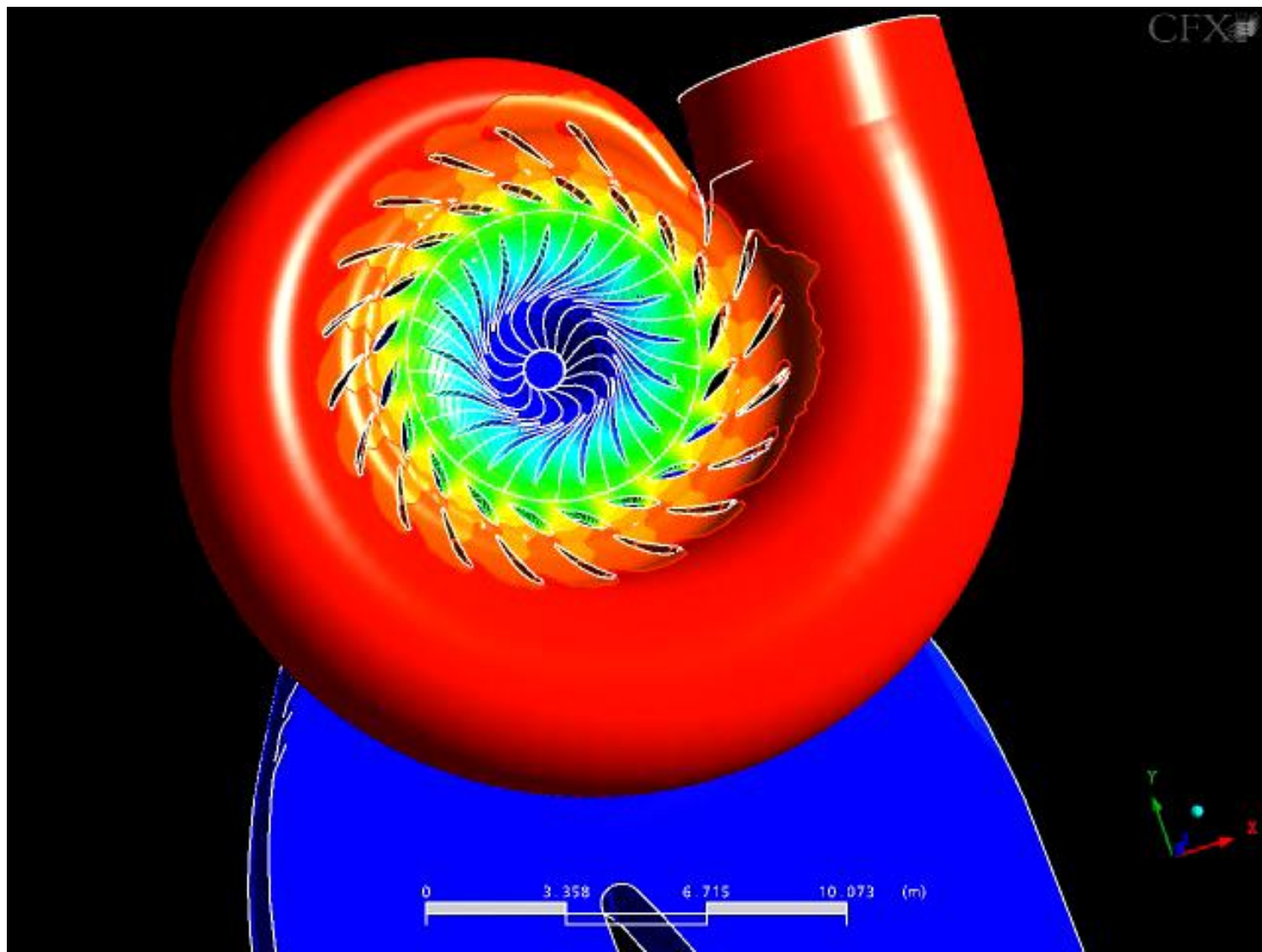
# Расчеты в спиральной камере

37

Вариант расчета	Модель турбулентности	Число узлов расчетной сетки в спиральной камере	Потери энергии в спиральной камере, м	Потери энергии в спиральной камере, в %
Вариант 1	<u>k</u> -ε RNG	700 110	3.924	1.60
Вариант 2	<u>k</u> -ε RNG	1 767 448	2.362	0.96
Вариант 3	RSM	1 767 448	2.011	0.82

# Мгновенное распределение давления на всем направляющем аппарате и рабочем колесе 2006-2007 гг.

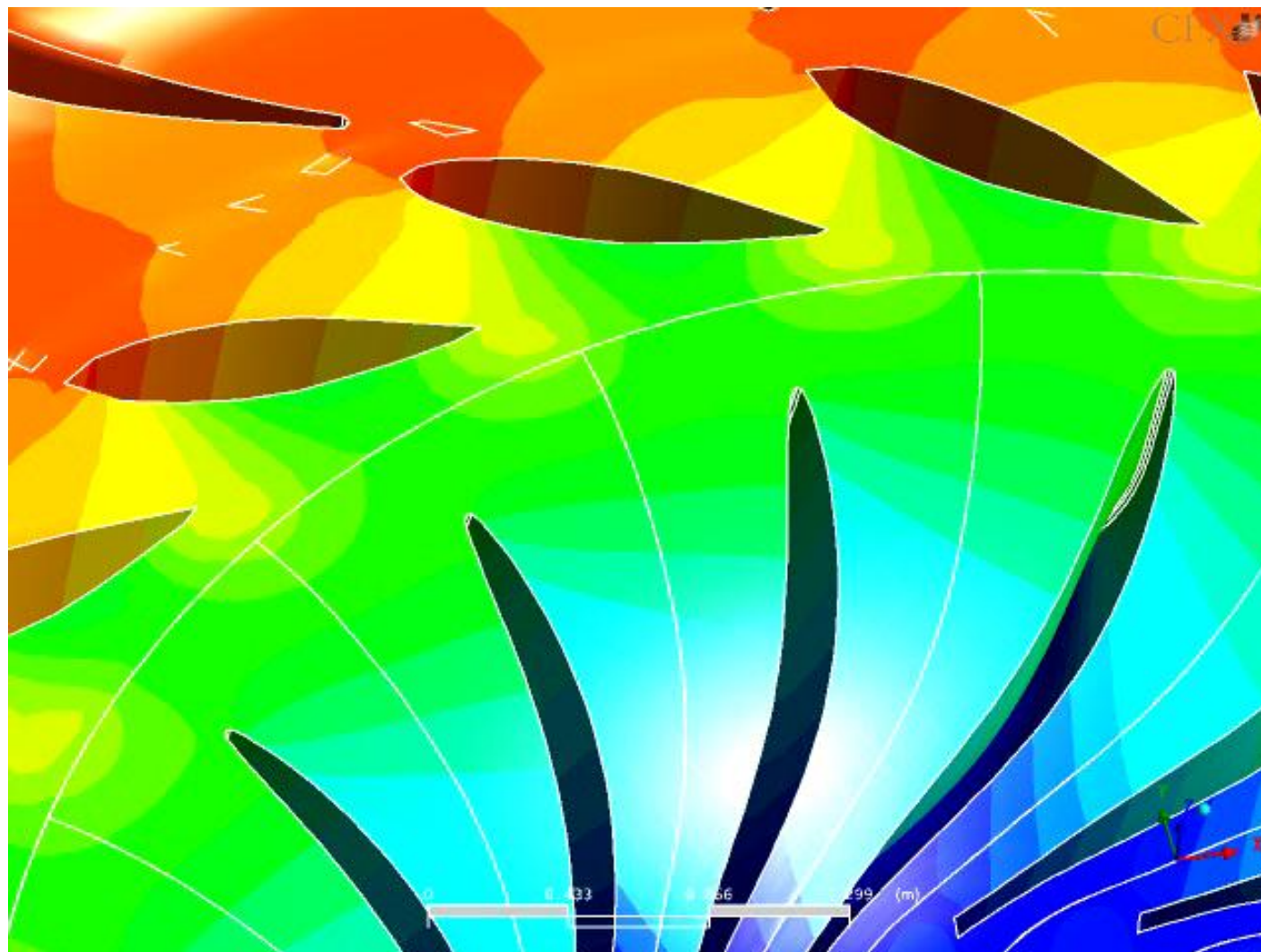
38





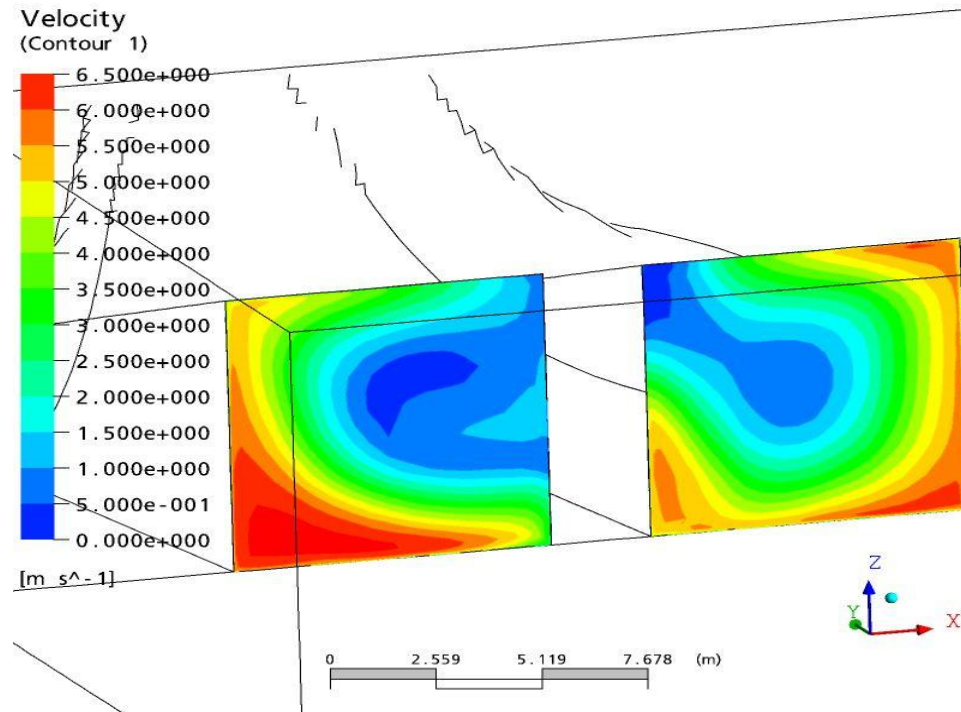
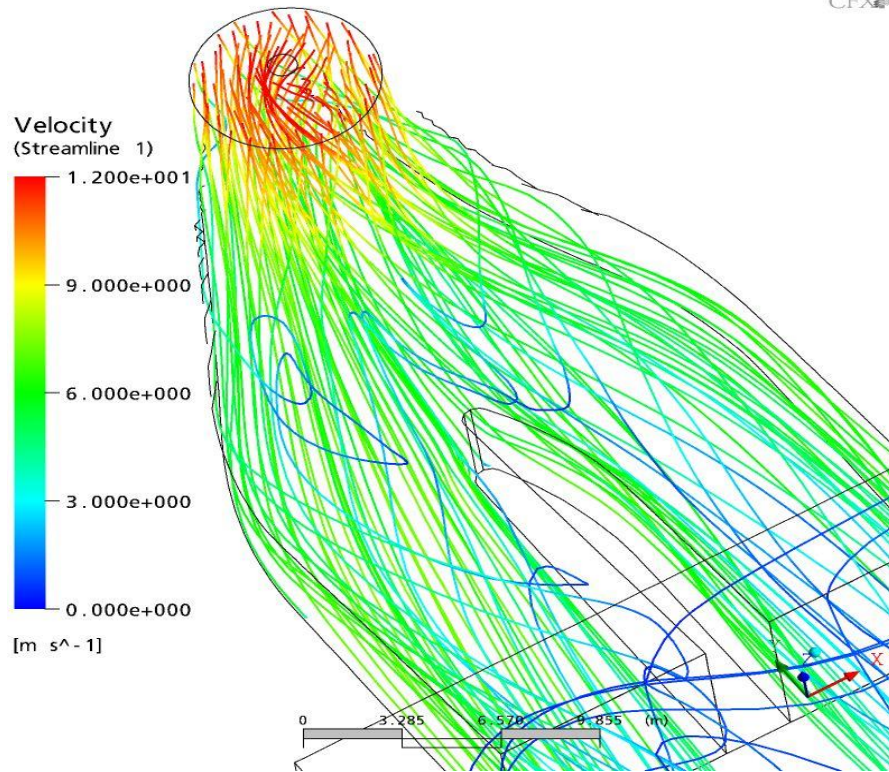
# Мгновенное распределение давления на рабочем колесе (детализация течения) 2006-2007 гг.

39



# Линии тока и модуля скорости на выходе из отсасывающей трубы

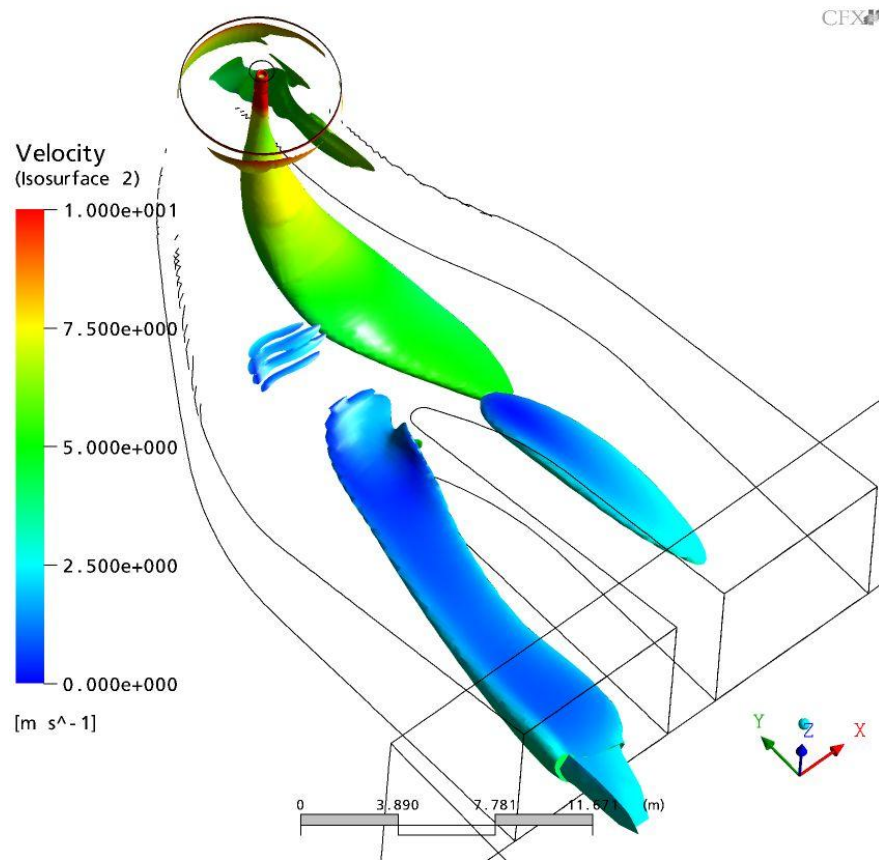
40



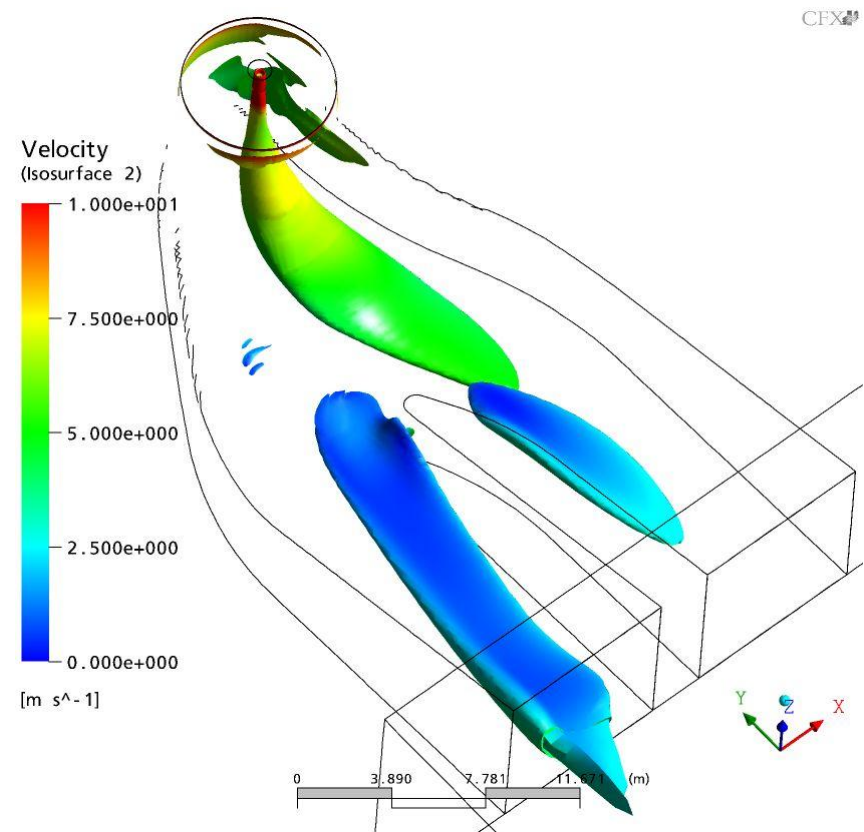


# Мгновенные изоповерхности кинетической энергии турбулентности

41



26 сек



28 сек

# Значения КПД при сквозном расчете всего проточного тракта и при расчете его отдельных элементов

42

Общее число узлов расчетных сеток	Объемный расход 368 м³/с		Объемный расход 319.2 м³/с	
	КПД всей гидротурбины при расчете по частям, %	КПД всей гидротурбины при расчете проточного тракта в целом, %	КПД всей гидротурбины при расчете по частям, %	КПД всей гидротурбины при расчете проточного тракта в целом, %
2 547 010	83.46	85.41		86.18
5 624 563	90.65	93.37		93.73
38 099 030	94.98		95.46	
Экспериментальное значение КПД при объемном расходе 330 м³/с, %				95.27

# Литература

43

- Болдырев Ю.Я., Викторов Е.Д., Шиндер Ю.К. и др. Отчет о НИР: «Сравнительный анализ результатов расчета 3-х мерного потока жидкости в типовых элементах гидромашин, основанный на применении пакетов гидродинамических программных комплексов Cadrun, Fluent и CFX» СПб. СПбГПУ. 2005, С. 136.
- Болдырев Ю.Я., Викторов Е.Д., Шиндер Ю.К. и др. Отчет о НИР: «Разработка методических вопросов расчета потерь энергии в элементах проточной части гидротурбин с применением вычислительной гидродинамики» СПб. СПбГПУ. 2007, С. 70.