

Что нельзя рассчитать – нельзя построить!  
*Мудрость ракетчиков*

# Система автоматизации инженерных расчетов FlowVision



**FlowVision**

# О философии

- **Расхожее мнение: лень – двигатель прогресса. Так ли это? Так почему же мы работаем все больше и больше?**
- **Двигатель прогресса – желание преобразовать мир так, чтобы в нем было больше места для мыслей, чем для физических действий**
- **Пример – автомобиль.**
  - **Мы рулим – максимум передвижения в комфорте при минимуме физических действий**
  - **И теперь половина человечества:**
    - **Разрабатывает и строит автомобили**
    - **Обслуживает и ремонтирует автомобили**
    - **Делает дороги**
    - **Добывает нефть и делает бензин**
  - **И где тут облегчение жизни?**



# О философии создания чего-нибудь

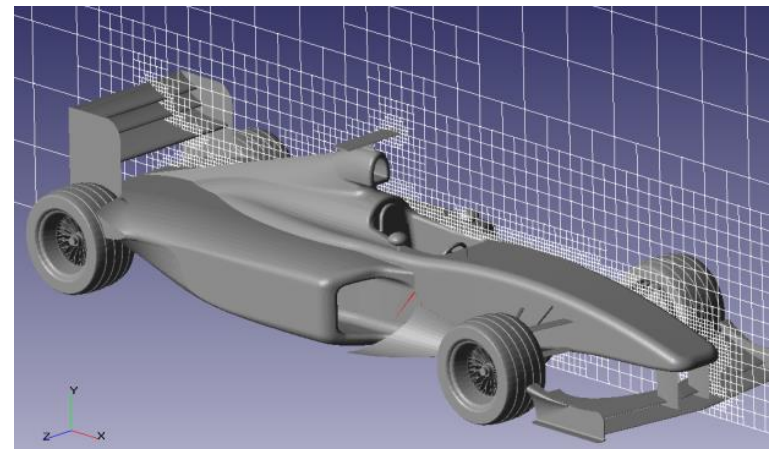
**В стародавние времена автомобиль создавался так**

1. Концептуальное проектирование, ТЗ, инженерные расчеты на логарифмической линейке
2. Рабочее проектирование – кульман, бумага, карандаш
3. Технологическая проработка – кульман, бумага, карандаш
4. Изготовление опытного образца и его испытание – полигон, если плохо – иди на 1 или 2.
5. Запуск в производство
6. Эксплуатация серийных образцов
7. Утилизация – выбросили на свалку или в печь



**Этапы создание автомобиля сейчас**

1. Концептуальное проектирование, ТЗ – CAD, CAE
2. Рабочее проектирование – CAD, CAE
3. Технологическая проработка – CAM, CAE
4. Подготовка УП для станков с ЧПУ - CAM
5. Изготовление виртуального образца и его численное моделирование, если плохо – иди 1 или 2 - CAE
6. Изготовление опытного образца и его испытание - полигон
7. Запуск в производство – CAE
8. Эксплуатация серийных образцов – CAE
9. Утилизация – CAE



# Немного о терминах

- **САПР/ CAD** – системы автоматизированного проектирования /Computer Aided Design
- **?/CAE** – Computer Aided Engineering  
Программные комплексы численного моделирования различных физических процессов.
- **ВГД/CFD** – вычислительная гидродинамика/Computational Fluid Dynamics
- **КЭ/FEA** – на самом деле всего лишь Finite Element Analysis , однако = задачи напряженно-деформированного состояния тел (в просторечии «прочностной анализ»)
- **Геометрия** (просторечие) – не наука, а математическая модель трехмерной поверхности тел



# Зачем нужна CAE?

1. Убрать ошибки проектирования
2. Сократить количество экспериментов – но не заменить эксперимент совсем!!!
3. Поставить невозможные и опасные эксперименты (например нештатный режим работы ядерного реактора или авария автомобиля/самолета/поезда)
4. Ускорить процесс создания объекта
5. Предсказать аварийные ситуации или разобрать аварийную ситуацию
6. Задачи экологии, чрезвычайных ситуаций, последствия ЧС
7. И, что не маловажно, – сэкономить материальные ресурсы



# Цена ошибки проектирования

Стадия жизненного цикла	Цена исправления ошибки	Моделирование:
Концептуальное проектирование	1\$	1) Работа концепт-модели 2) Работа ее основных агрегатов 
Рабочее проектирование	10\$	Функционирование конкретных частей и агрегатов 
Технологическая проработка	100\$	Технологические процессы 
Подготовка УП для станков с ЧПУ	1 000\$	Моделирование процесса обработки заготовки 
Изготовление опытного образца и его испытание	10 000\$	1) Выяснение причин отклонений параметров опытного образца от расчетных 2) Поиск путей совершенствования образца 3) Создание имитационных моделей
Запуск в производство	100 000\$	
Эксплуатация серийных образцов	1 000 000\$	1) Моделирование аварийных ситуаций 2) Анализ причин внештатных ситуаций 3) Моделирование работы при износе изделия



# Что такое CAE

**CAE - система моделирования «всего». Любая программа, моделирующая создаваемый объект**

**В машиностроении наиболее распространены CAE системы, построенные на решении задач механики сплошной среды (МСС)**



# CAE как наука

## МСС (Физика!)

- Упругость
- Пластичность
- Ползучесть
- Движение жидкости
- Акустика
- Химические реакции
- ...

## Вычматы (Математика!)

- сетки
- дискретизация
- аппроксимация
- Решение больших систем линейных уравнений

## Взаимодействие человека и машины (computer science!)

- Интерфейс, в частности, GUI и командная строка
- Методы графического представления информации
- Создание геометрической модели

**И везде параллельное программирование!**





# CFD как часть CAE

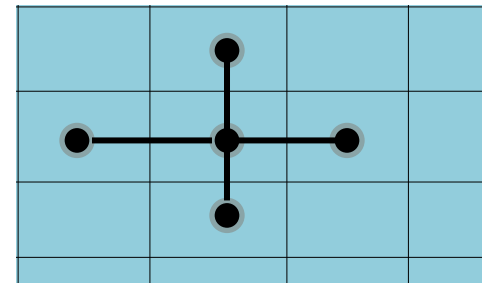
**CAE система FlowVision – средство моделирования движения жидкости и газа (CFD система)**

**Основы CFD систем – численное решение уравнений движения жидкости и газа с использованием сеточных методов.**



# Что такое «численное решение»

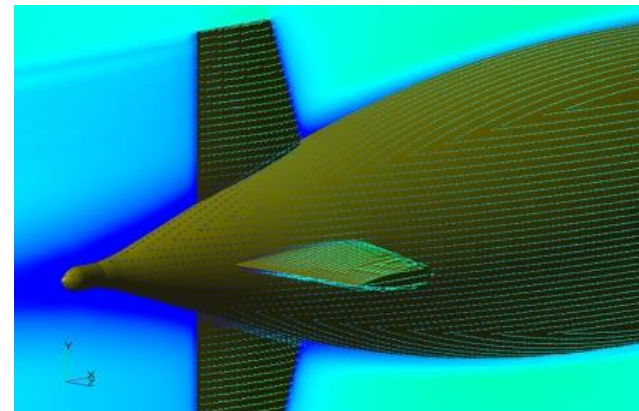
- **Метод сеток**
- **Расчетная область разбивается на большое/огромное количество ячеек (от  $10^3$  до  $10^9$ )**
- **В каждой ячейке уравнение движения жидкости линеаризируется и аппроксимируется численной схемой**
- **Получаем от  $10^3$  до  $10^9$  алгебраических уравнений**
- **Решают разными методами – от явных до прямых и итерационных неявных методов**



# Зачем нужны суперкомпьютеры для вычислительной гидродинамики?

- Старинное правило гидродинамиков:  
*Любая задача считается одну ночь на любом компьютере*
- Но в век доступных суперкомпьютеров имеем:  
*Задачи считаются неделю на суперкомпьютере*

**ПОЧЕМУ?!**



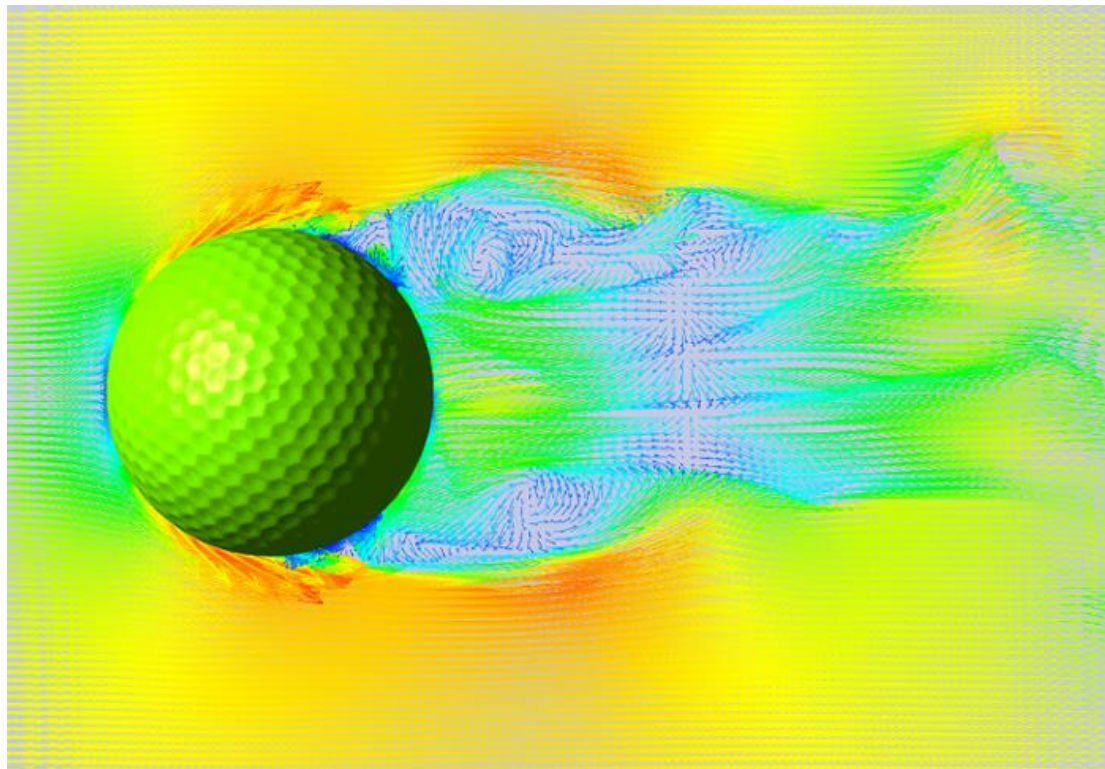
# Зачем нужны суперкомпьютеры для вычислительной гидродинамики?

- Типичная гидродинамическая задача сегодняшнего дня:
  - количество ячеек от 200 тыс до 2 млн
  - Оптимум – 20-50 тыс ячеек на ядро
  - Уровень «хорошей персоналки», максимум 2 4-х ядерных процессора
  - Одна ночь расчетов
- Эта же задача для суперкомпьютера:
  - Разрешение в 10 раз больше
  - В 1 000 раз больше размерность – количество ячеек уже 200 млн
  - Количество ядер – 4 000
  - В 10 раз меньше эффективный шаг по времени, т.е. в 10 раз больше «итераций по времени»



# Зачем нужны суперкомпьютеры для вычислительной гидродинамики?

- Решение большого количества сложных задач
- Решение численной задачи оптимизации
- Решение сложных задач с большим количеством важных и мелких деталей



# Гидродинамика

## Теоретическая

## Экспериментальная

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = F - \frac{1}{\rho} \text{grad}P + \nu \nabla^2 V$$

$V$  – вектор скорости с компонентами  $(V_x, V_y, V_z)$ ;  
 $F$  – вектор объемных сил с компонентами  $(F_x, F_y,$

$F_z)$ ;

$\rho$  – плотность жидкости;

$P$  – давление;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;

$\nabla^2 V$  – вектор с проекциями  $(\nabla^2 V_x, \nabla^2 V_y, \nabla^2 V_z)$ .



## Вычислительная гидродинамика (ВГД)

Моделирование трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах и визуализация этих течений методами компьютерной графики.

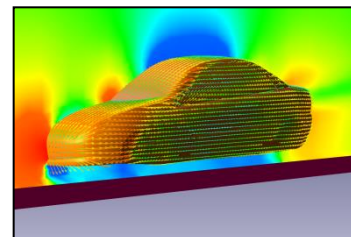
Основной задачей ВГД является численное решение уравнений Навье-Стокса, описывающих динамику жидкости.

Дополнительно, обычно, учитываются различные физико-химические эффекты: горение, турбулентность или потоки сквозь пористую среду.

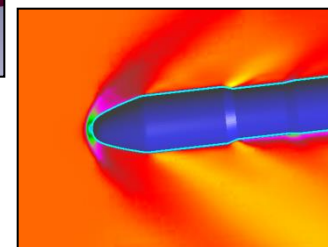


# Основные области применения ВГД

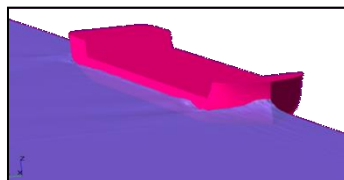
- Автомобильная промышленность



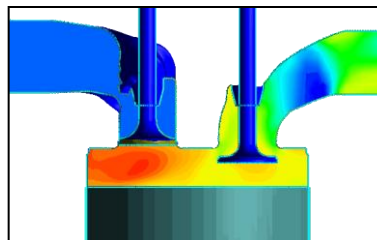
- Аэрокосмическая промышленность



- Судостроение

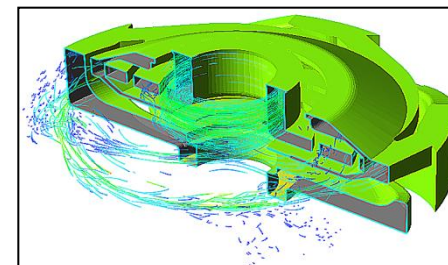


- Атомная энергетика

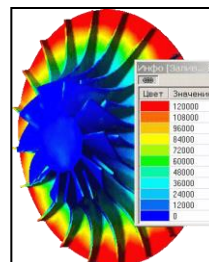


- Двигателестроение

- Нефтяная и газовая промышленность



- Турбомашиностроение



## **Эксперимент против численного моделирования**

- **ВГД более информативно**
- **ВГД обычно быстрее и дешевле эксперимента**
- **Иногда численное моделирование единственно возможный способ решить задачу**
- **Но эксперимент никто не может отменить!**





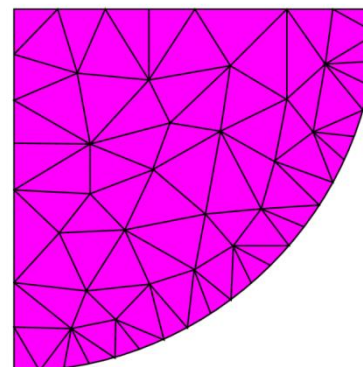
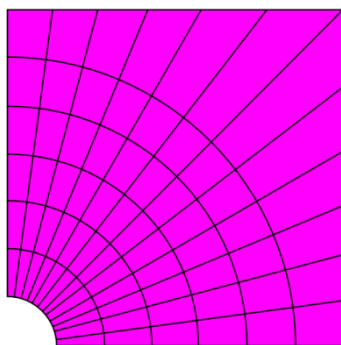
## Какие CAE-системы наиболее известны?

- **Phoenix** – первый коммерческий код в мире
- **Fluent** – номер 1 в мире
- **CFX** – наверное, лучшая из классических программ
- **StarCD** – номер 2 в мире
- **FlowVision, EFD.Lab, Flow3D** – автоматическая генерация расчетных сеток

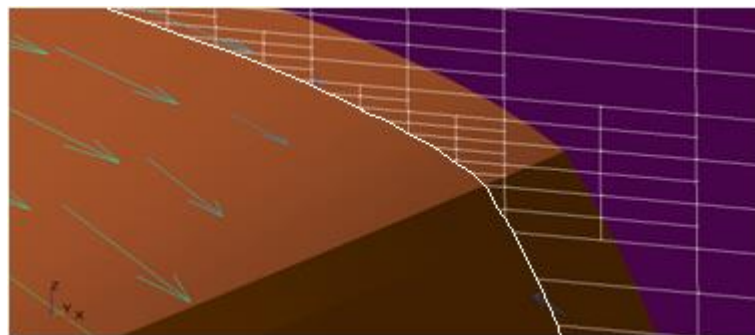


## Основные различия между классикой и модерном

- **Phoenix, Fluent, CFX, StarCD** – криволинейные сетки

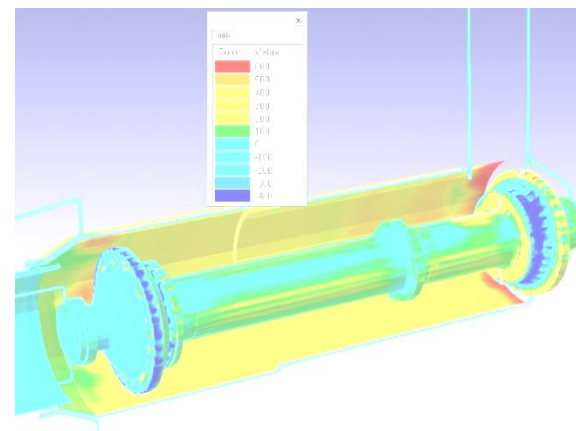
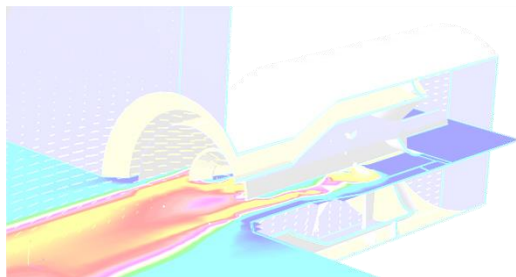


- **FlowVision, EFD.Lab, Flow3D** – изначально прямоугольная сетка, cut-cell метод



# FlowVision – сделано в России

- Разрабатывается с 1991 года выпускниками МФТИ (ФАКИ, ФУПМ) и МГУ (ВМК), ставшими сотрудниками ИАП РАН, ИММ РАН и ВЦ РАН.
- С 1999 г. – команда разработчиков вошла в компанию «ТЕСИС».
- Вложено более 200 человеко-лет
- Сейчас команда разработчиков FlowVision – 20 человек



# FlowVision - эволюция

**1991-1998 год – FV1,**

Fortran, параллельность (транспьютеры). «Ступенчатая» аппроксимация границы, горение,  $k-\epsilon$  модель турбулентности.

**1995 год – начата разработка FV2,**

c++, windows, «гладкая» аппроксимация границы методом подсеточного разрешения, большое количество моделей движения жидкости.

**2000 год – коммерческая эксплуатация FV2**

**2004 год – начата разработка FlowVision-HPC (FV3).**

Параллельные вычисления, распределенная архитектура, FSI - сильные взаимодействия жидкости и конструкций (вместе с КЭ кодами).

**2006 год – коммерческая эксплуатация FV-HPC**

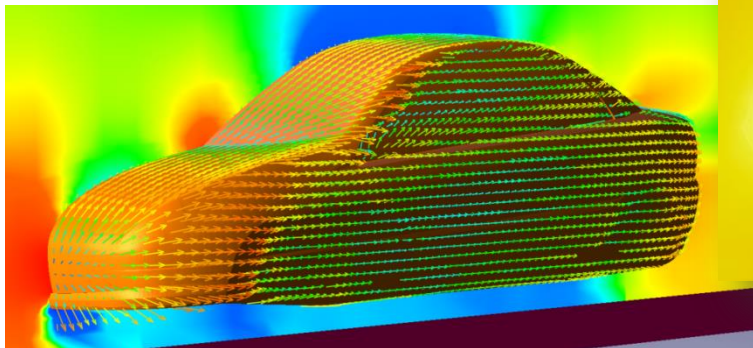
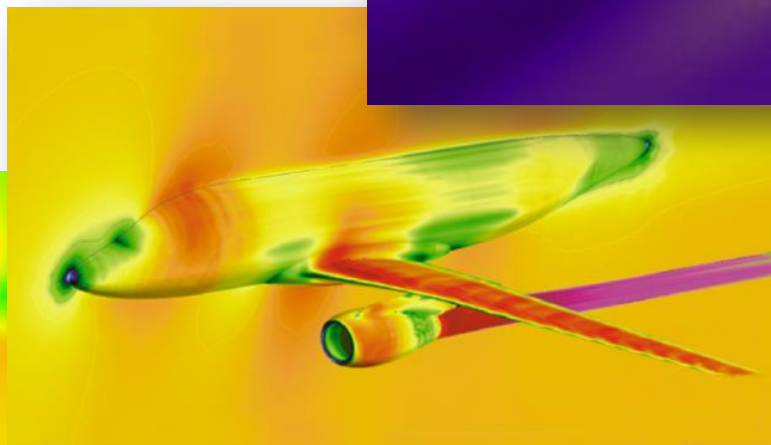
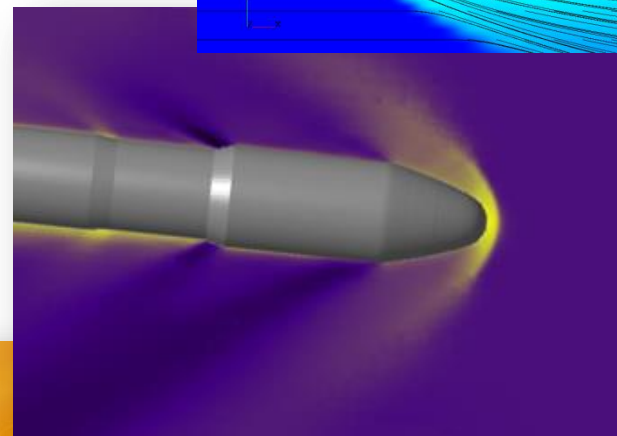
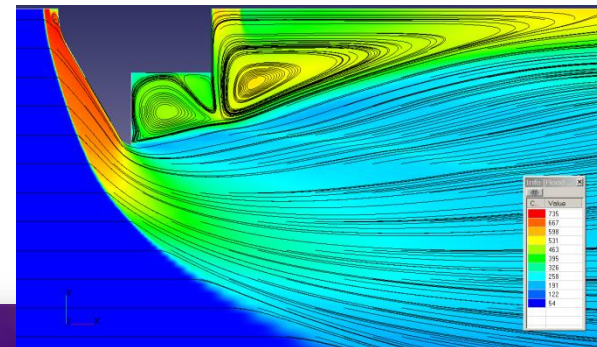


# FlowVision – классы задач

## Задачи внешнего обтекания

### Все типы течений:

- несжимаемое
- дозвуковое
- трансзвуковое
- сверхзвуковое
- гиперзвуковое

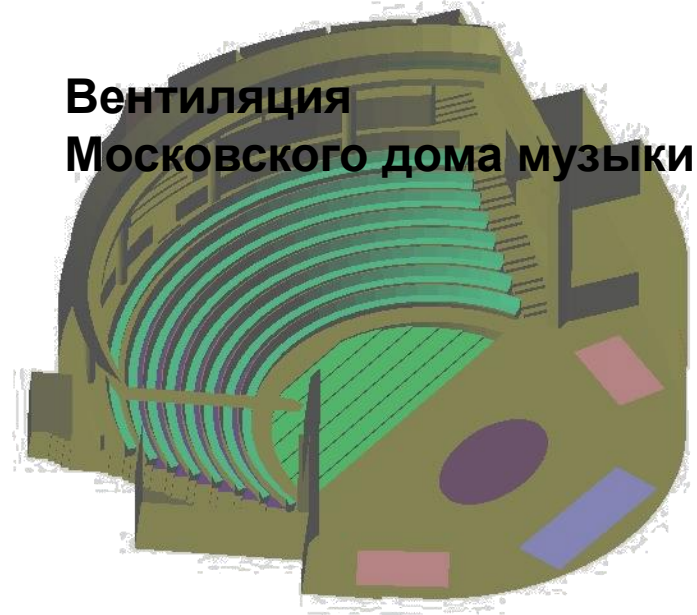


# FlowVision – классы задач

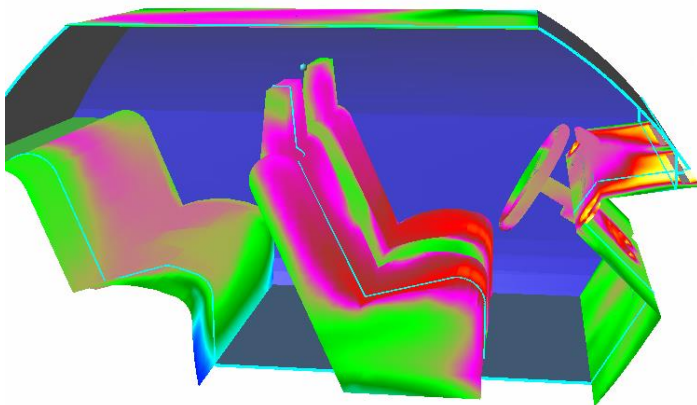
## Задачи внутренних течений:

- дозвуковые и сверхзвуковые
- вынужденная, естественная и смешанная конвекция

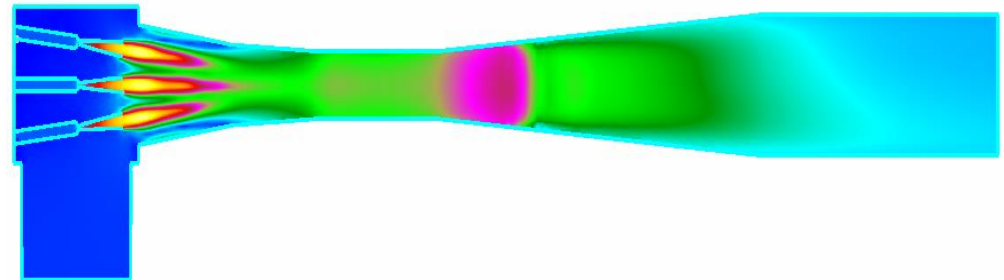
Вентиляция  
Московского дома музыки



Салон автомобиля

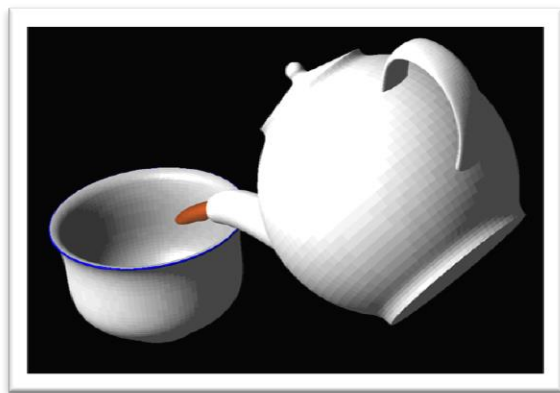


Паровой эжектор

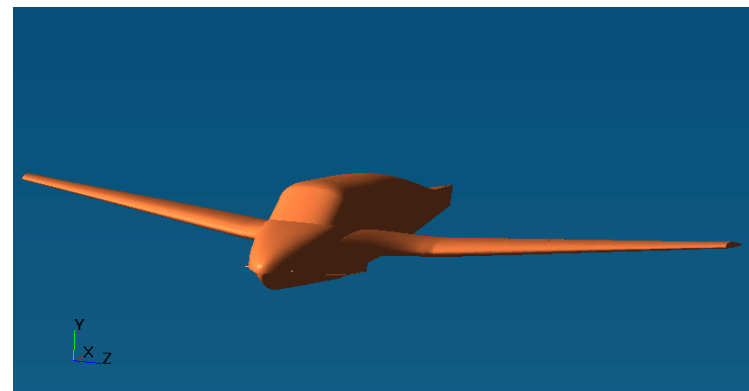


# FlowVision – классы задач

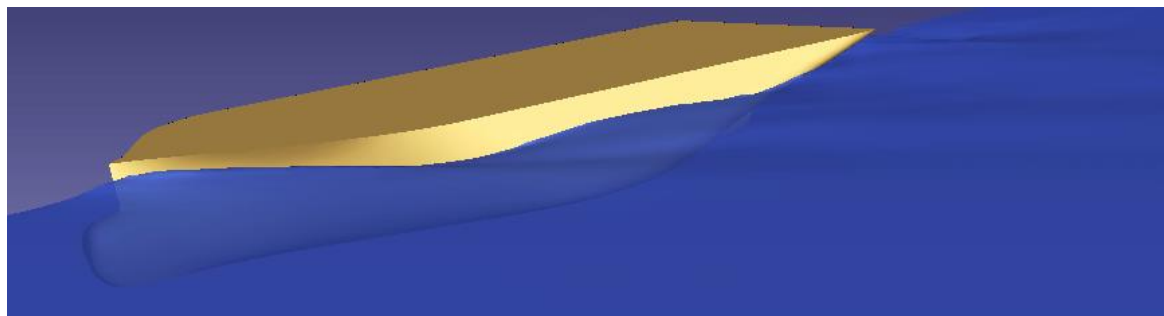
**Многофазные течения со  
свободными  
поверхностями**



**Посадка на воду гидросамолета**



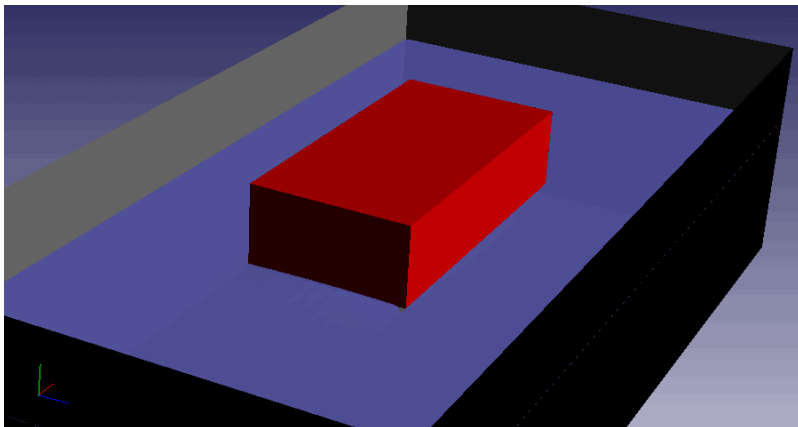
**Обтекание судна**



# FlowVision – классы задач

Течения около тел,  
движущихся в области  
расчета

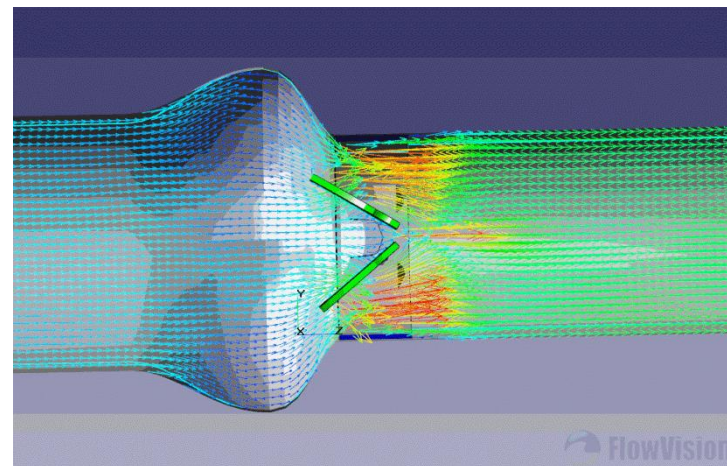
Плавающий бокс со смещенным  
центром тяжести



Опыт Маха



Сердечный клапан



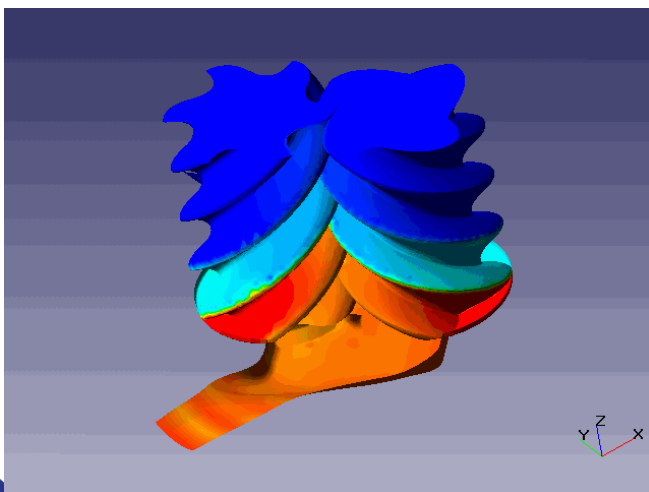


# FlowVision – классы задач

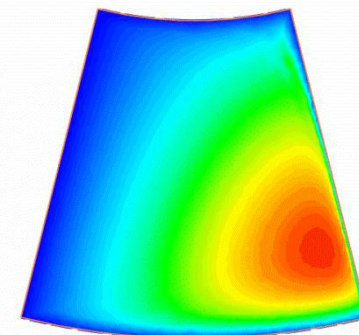
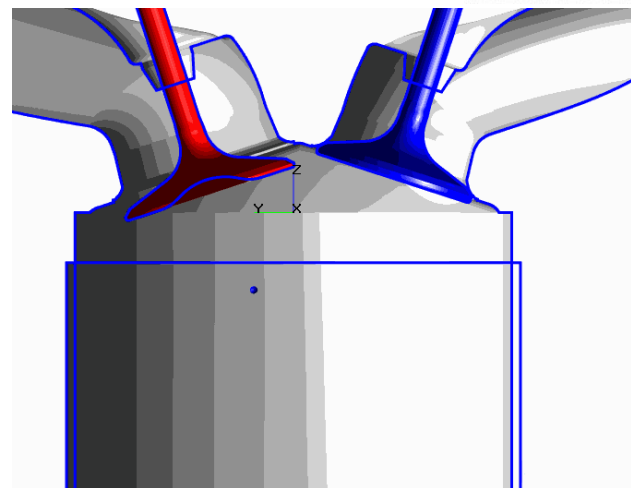
Течения с учетом очень малых зазоров

Возникновение подъемной силы в опорном подшипнике

Винтовой компрессор



ДВС



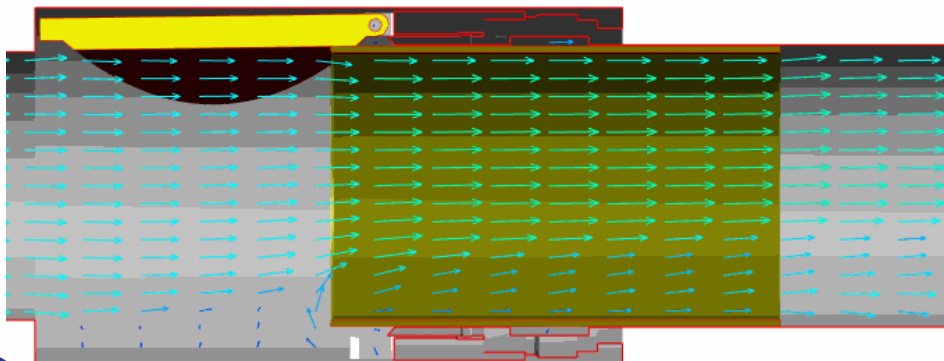
FlowVision

# FlowVision – классы задач

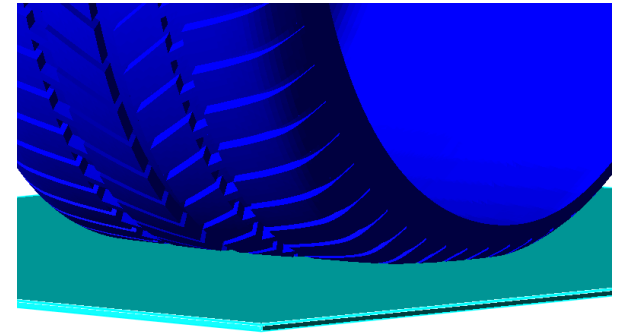
**Взаимодействие жидкости и конструкций:**

**сопряжение с КЭ программами  
расчета деформаций тел**

**Закрытие клапана в  
трубе высокого  
давления**

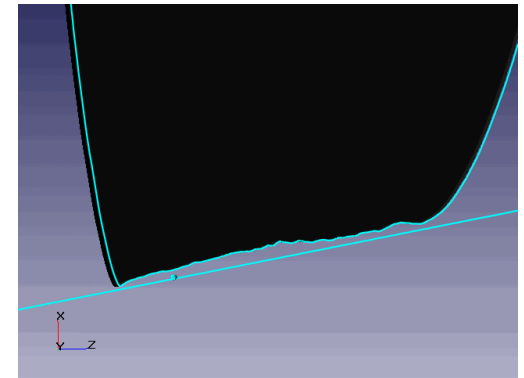


**Гидропланирование  
автомобильного колеса**

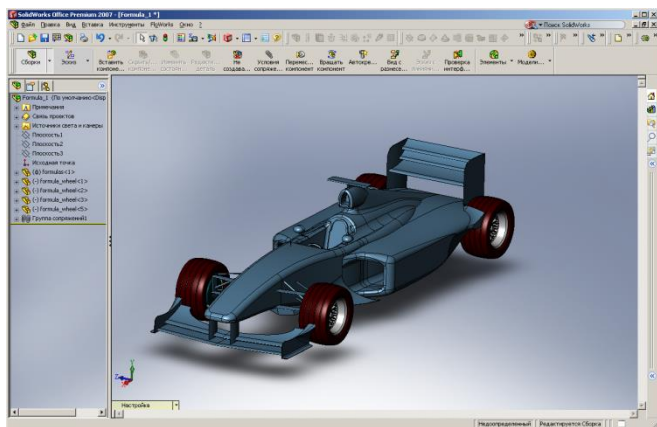


z-y  
x

**Утечка масла через  
маслосъемный колпачок**

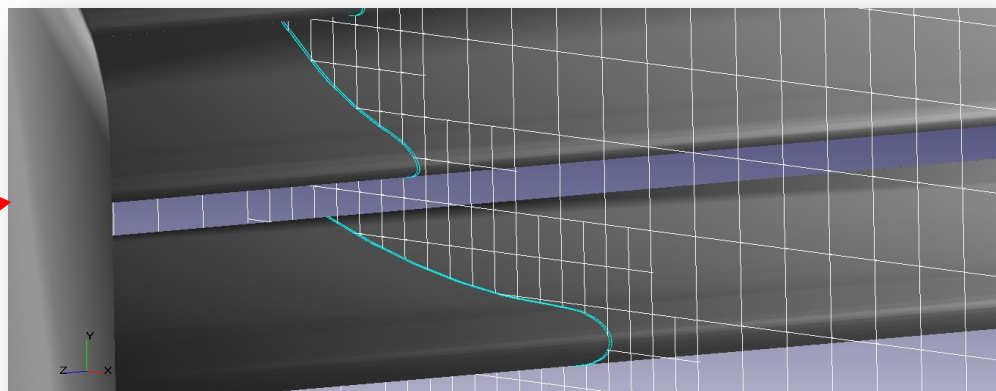
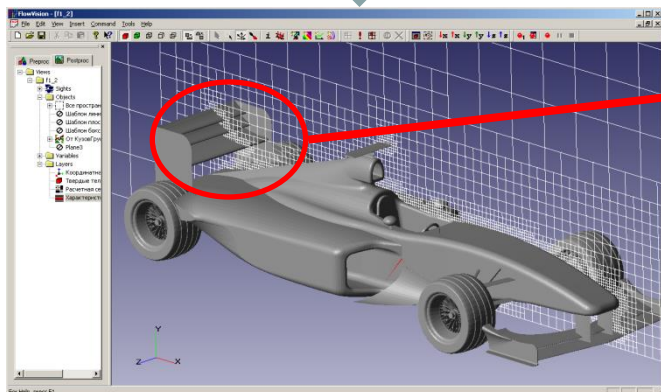


# Автоматическая генерация сетки



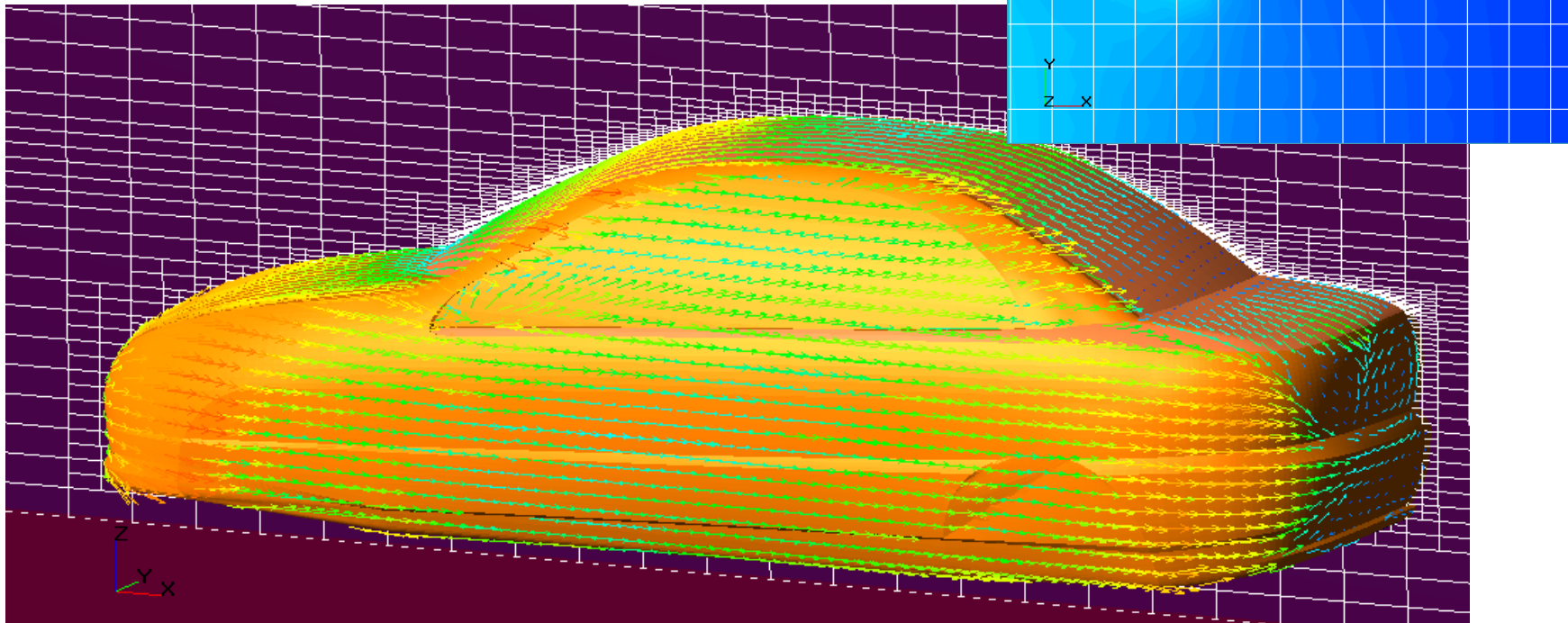
- Прямой импорт геометрии из САПР → простое определение геометрии
- Метод подсеточного разрешения геометрии → точная аппроксимация криволинейной границы
- Локальная динамическая адаптация сетки → разрешение особенностей геометрии и потока

Генерация сетки  
занимает  
< 1 мин



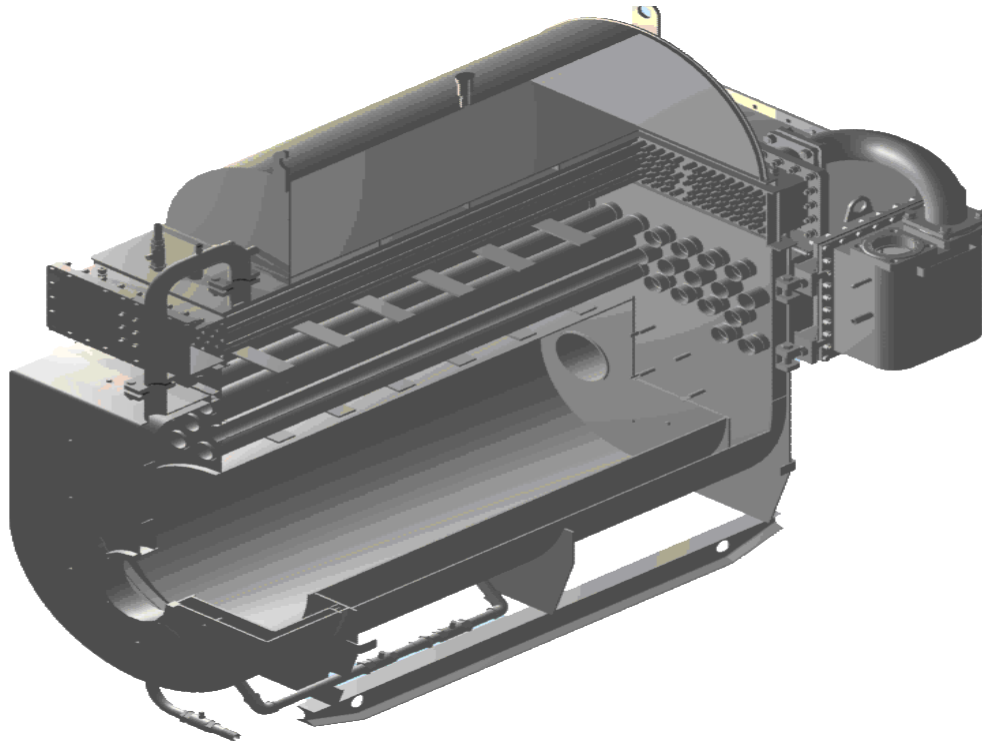
# Адаптация сетки

- По границе расчетной области
- По величинам градиентов решения



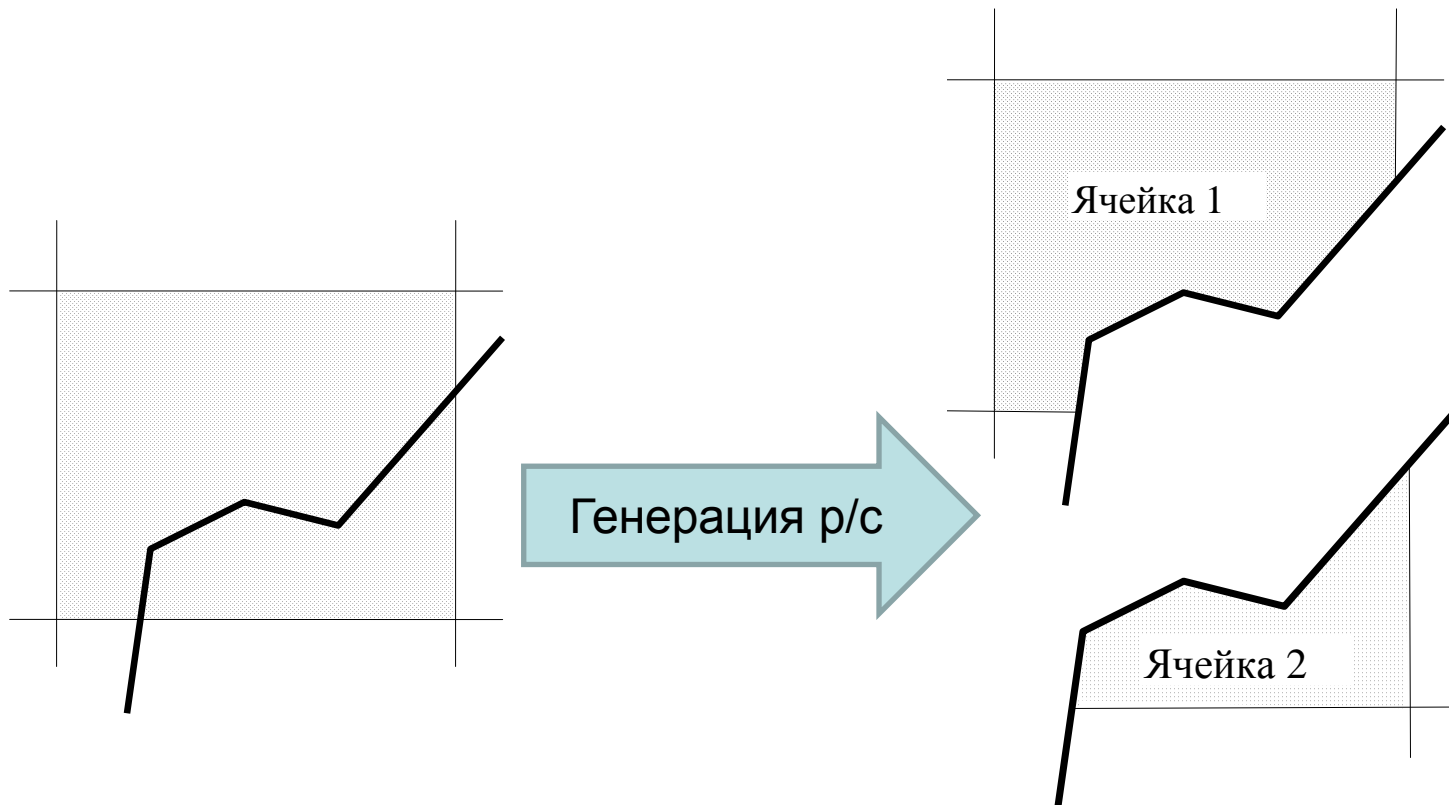
## Описание границы области расчета

- Поверхность расчетной области в виде триангулированной поверхности
- Геометрический формат – STL, WRML – поставляет любая система САПР



# Метод «подсеточного разрешения геометрии»

- Вводится прямоугольная начальная расчетная сетка
- Обрезание ячеек поверхностями



# Неявный метод расщепления по физическим переменным

$$(1) \quad \frac{\rho^{(s)} \mathbf{V}^{(s+1)} - \rho^n \mathbf{V}^n}{\tau} + \frac{1}{\Omega} \sum_{faces} (\rho^{(s)} \mathbf{V}^{(s)} \cdot \mathbf{s}) \mathbf{V}^{(s+1)} = -\vec{\nabla} P^{(s)} + \rho^n \mathbf{F}^n$$

$$(2) \quad \frac{\rho^{(s+1)} \mathbf{V}^{(s+1)} - \rho^{(s)} \mathbf{V}^{(s+1)}}{\tau} = -\vec{\nabla} P^{(s+1)} + \vec{\nabla} P^{(s)} \quad \text{Здесь } (s) \text{ - итерация, } \rho^{(s)} = \rho(P^{(s)})$$

Применяя уравнение неразрывности

$$\frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\tau} + \frac{1}{\Omega} \sum_{faces} \rho^{n+1} \mathbf{V}^{n+1} \cdot \mathbf{s} = 0$$

к (2), получаем:

$$(3) \quad \frac{\rho(P^{(s+1)}) - \rho^n}{\tau} + \frac{1}{\Omega} \sum_{faces} \rho^{(s)} \mathbf{V}^{(s+1)} \cdot \mathbf{s} = \tau (\Delta P^{(s+1)} - \Delta P^{(s)})$$

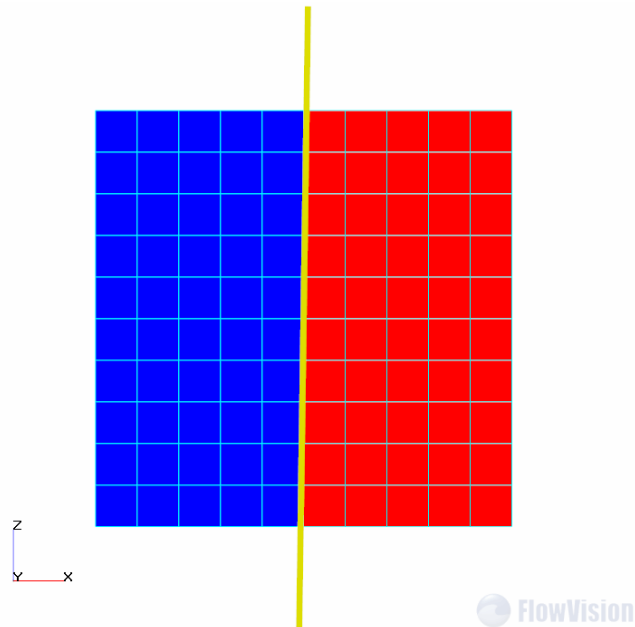
Алгоритм: стартуем  $\rho^{(0)} = \rho^n, \quad \mathbf{V}^{(0)} = \mathbf{V}^n$

1. Решаем (1) для  $\mathbf{V}^{(s+1)}$
2. Решаем (3) для  $P^{(s+1)}$
3. Находим  $\mathbf{V}^{(s+1)}$ , скорость удовлетворяет уравнению неразрывности
4. Go to 1



# Моделирование подвижных тел

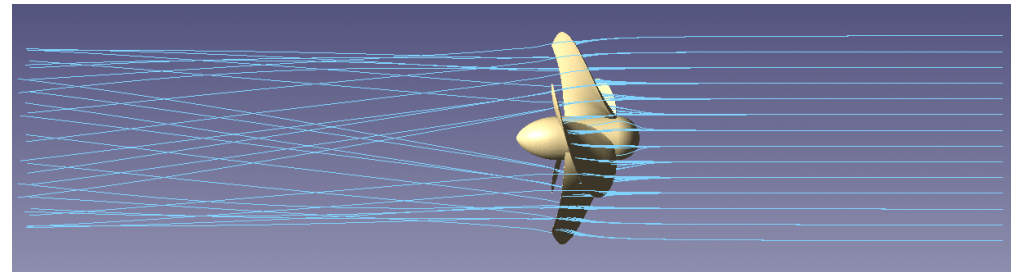
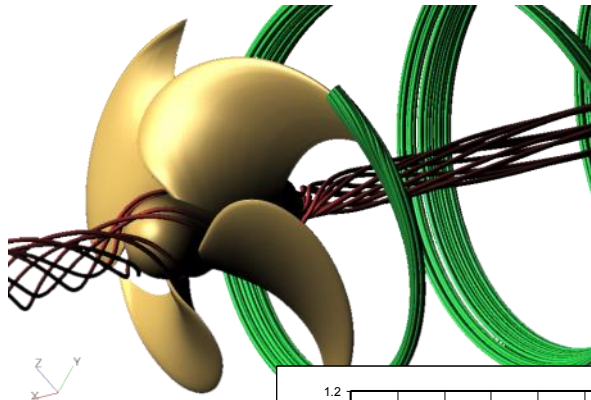
- Эйлеров подход – сетка неподвижна. Ячейки появляются, исчезают, меняют объем
- Ячейки заметаются телом, данные из под них передаются по направлению движения тела
- Передача данных из под тела происходит правильно даже в том случае, если тело тоньше ячейки!





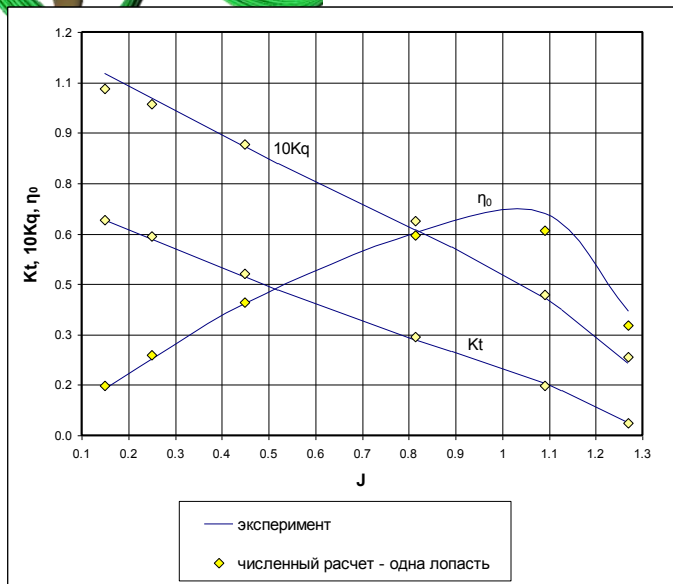
# А если сравнить с классикой (Fluent)?

## Моделирование винта судна – упор и момент

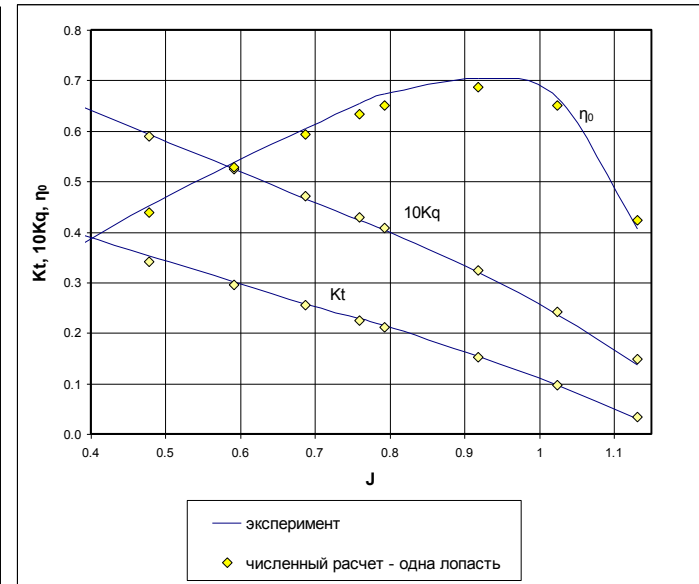


FlowVision

Fluent



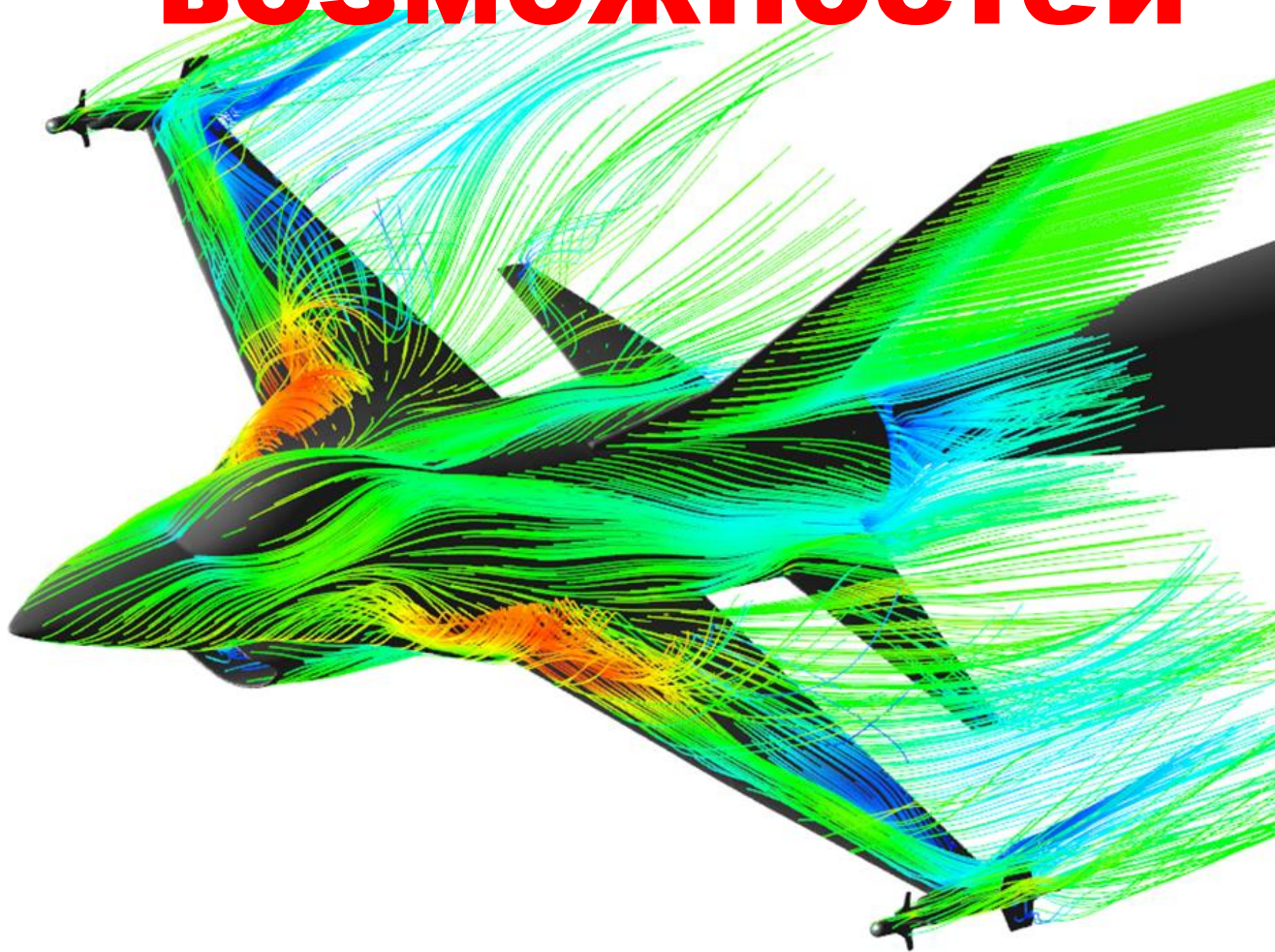
~400 тыс. расчетных ячеек



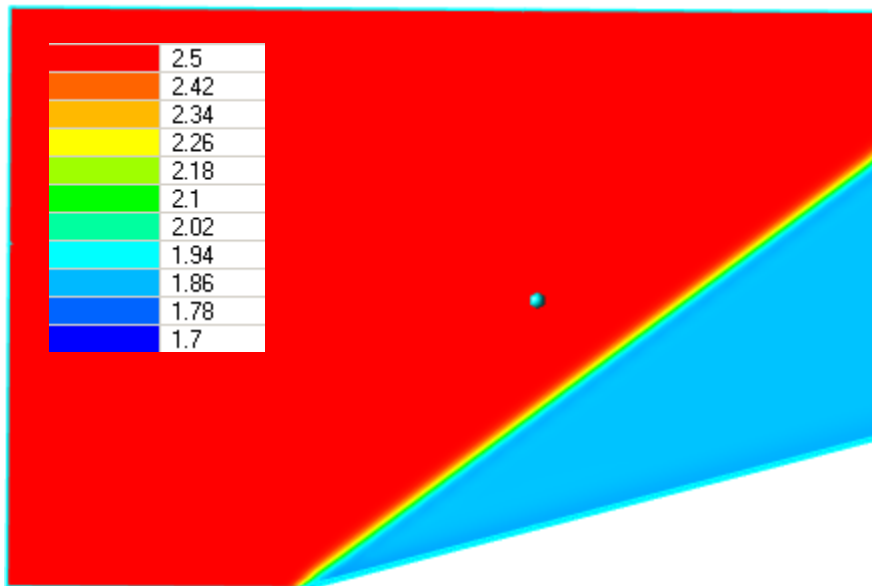
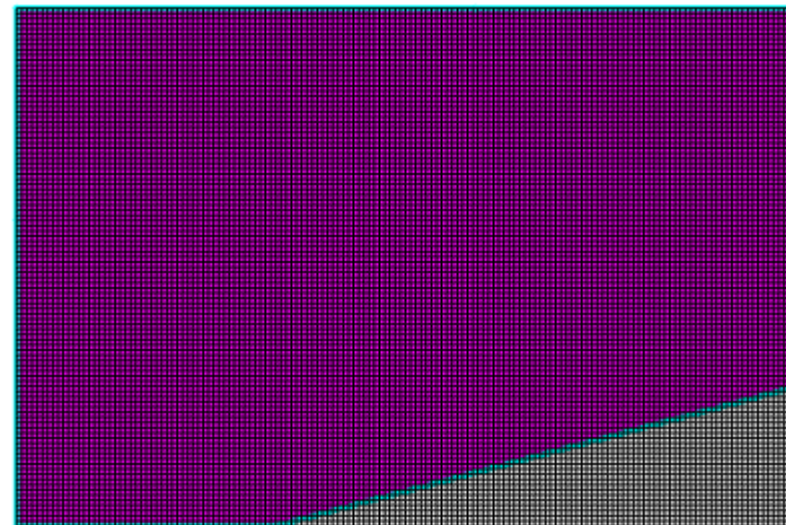
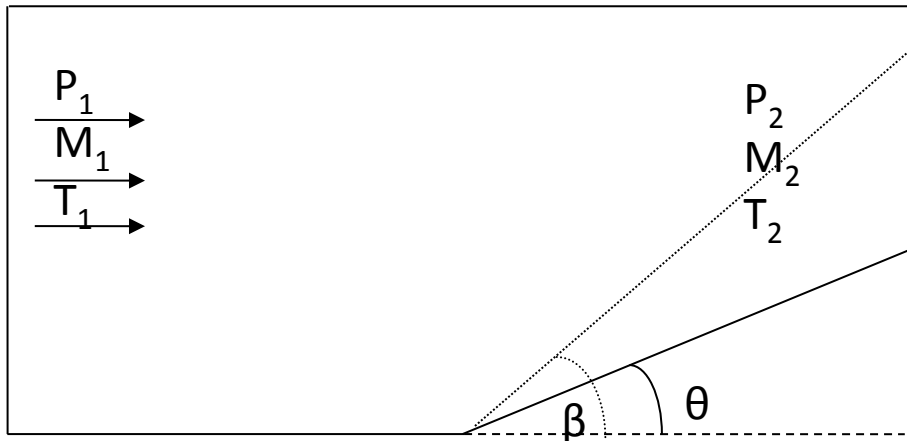
~2 млн. расчетных ячеек



# Тестирование базовых возможностей



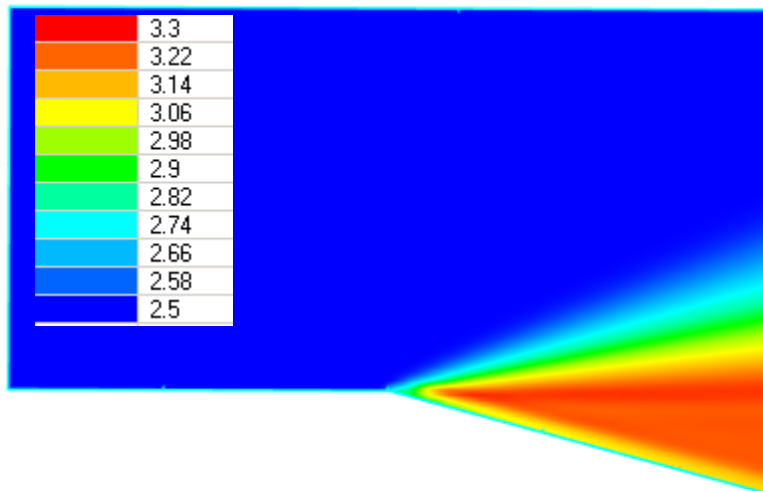
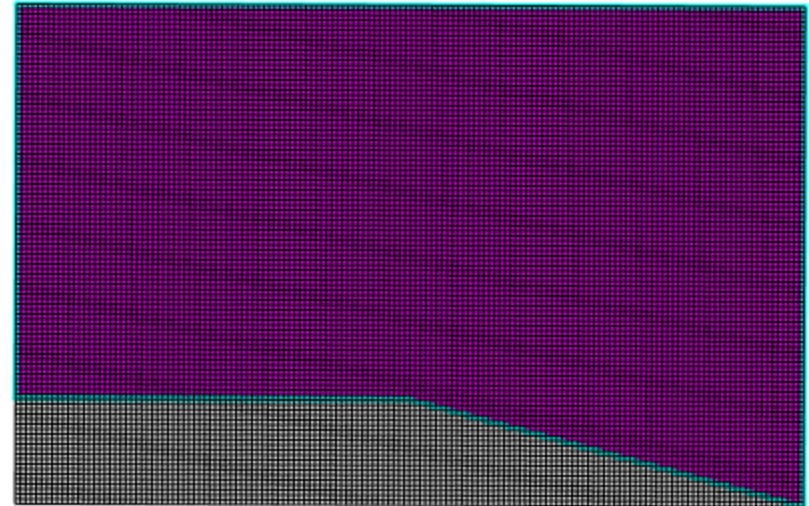
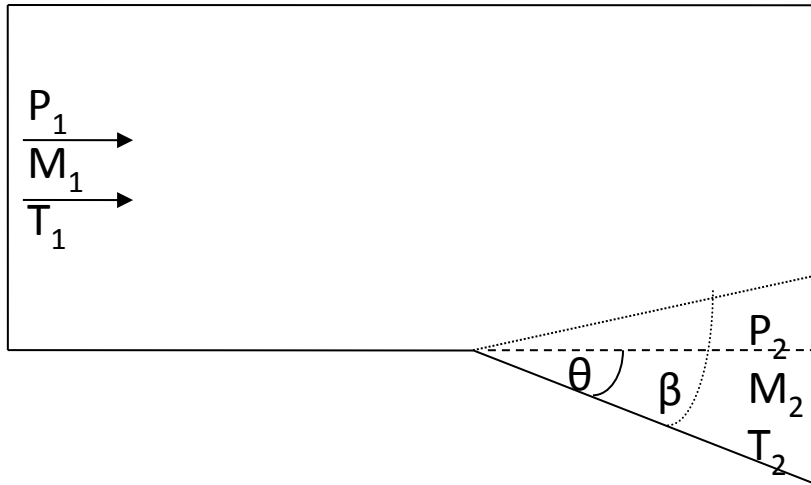
# Сверхзвуковое обтекание клина



	Погрешность расчета, %
$M_2$	+0.2
$P_2$ , Па	-0.2
$P_{02}$ , Па	0.2
$T_2$ , К	-0.09
$T_{02}$ , К	0.0002



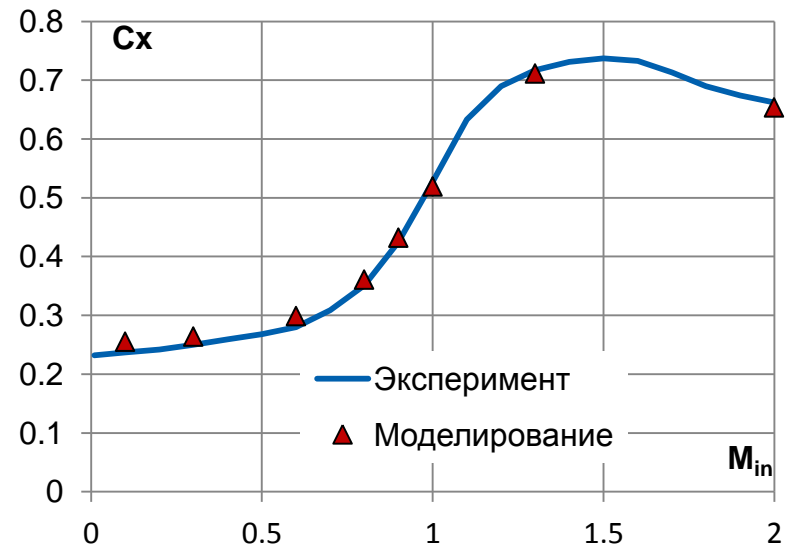
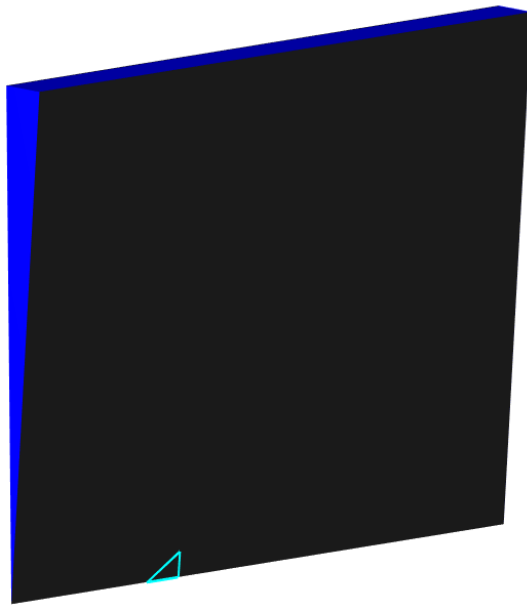
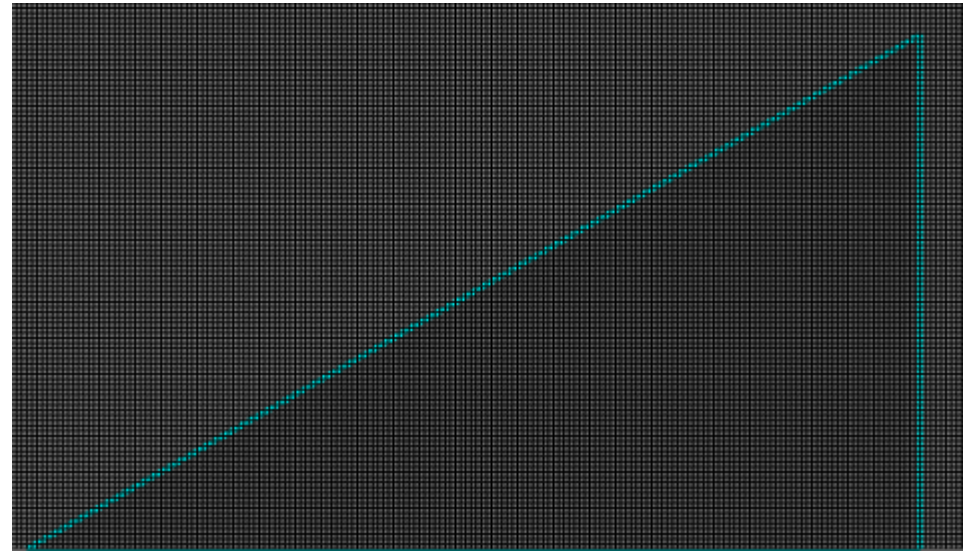
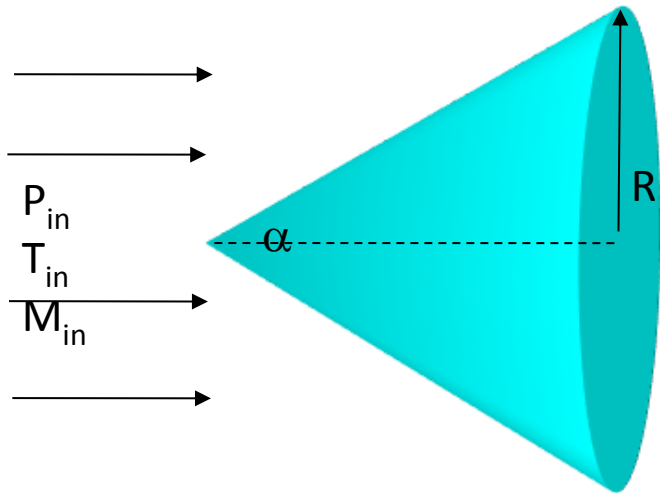
# Течение Прандтля-Майера



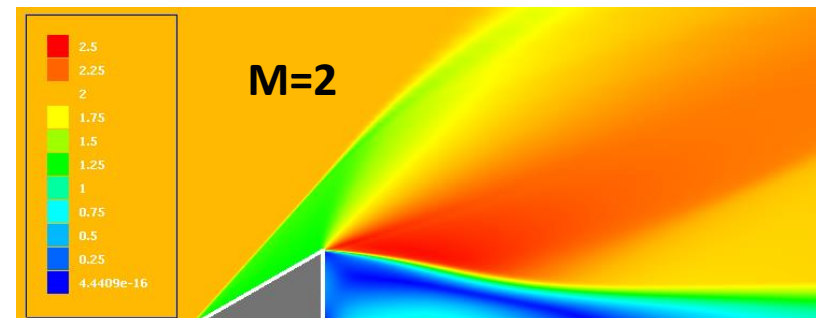
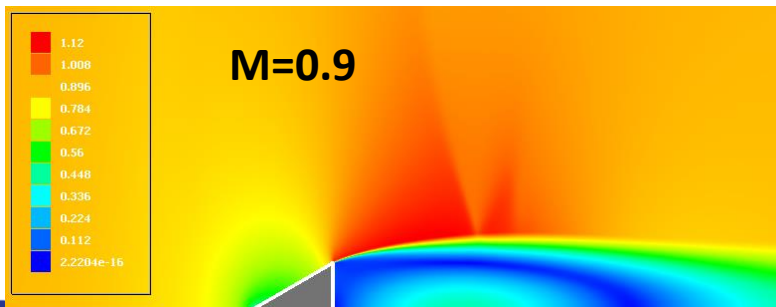
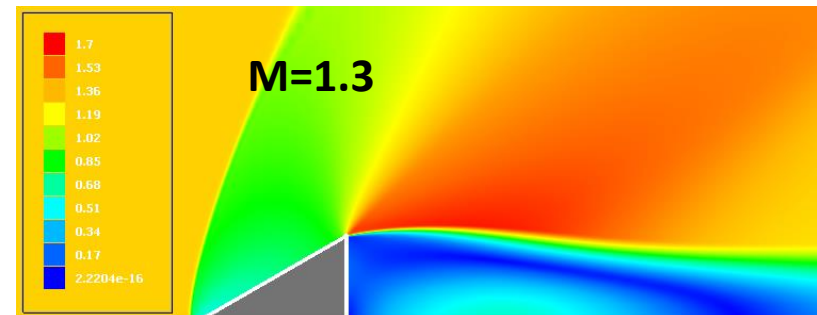
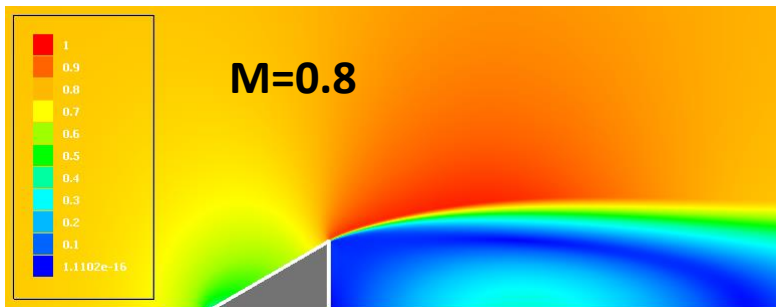
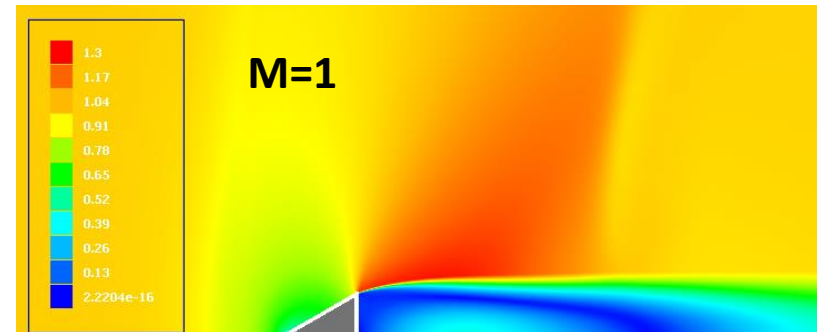
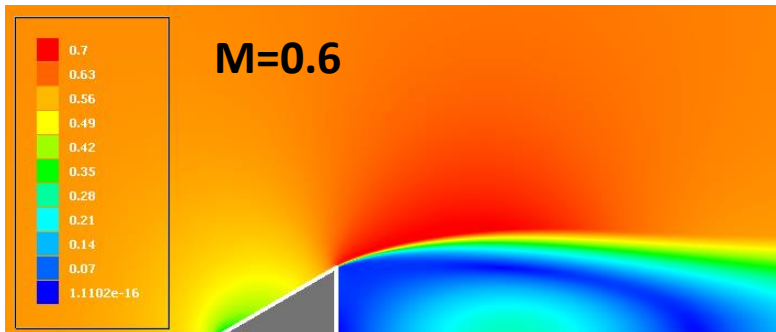
	Погрешность расчета, %
$M_2$	+1
$P_2$ , Па	-0.2
$P_{02}$ , Па	4.5
$T_2$ , К	-1.4
$T_{02}$ , К	0.0002



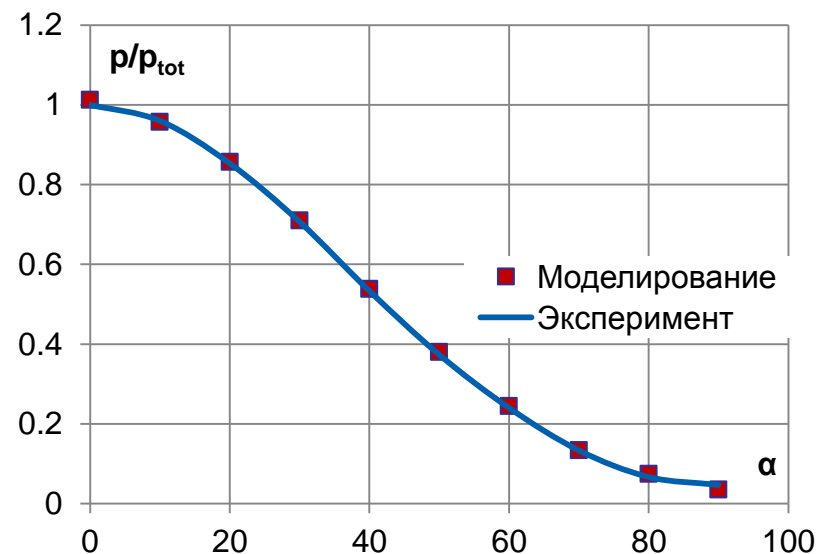
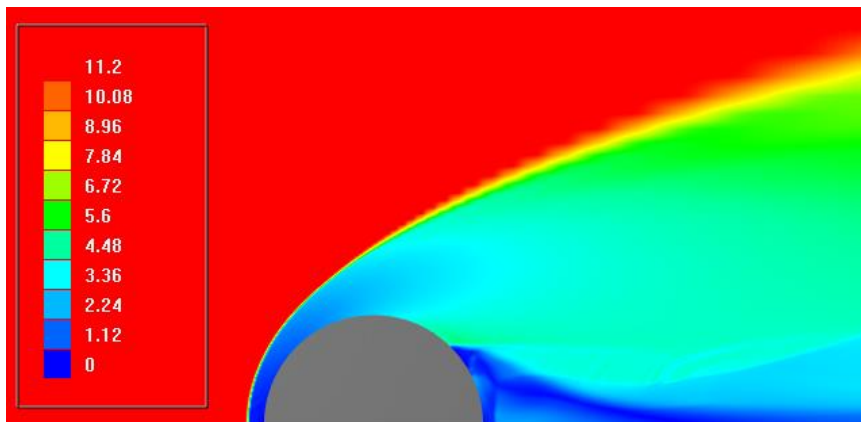
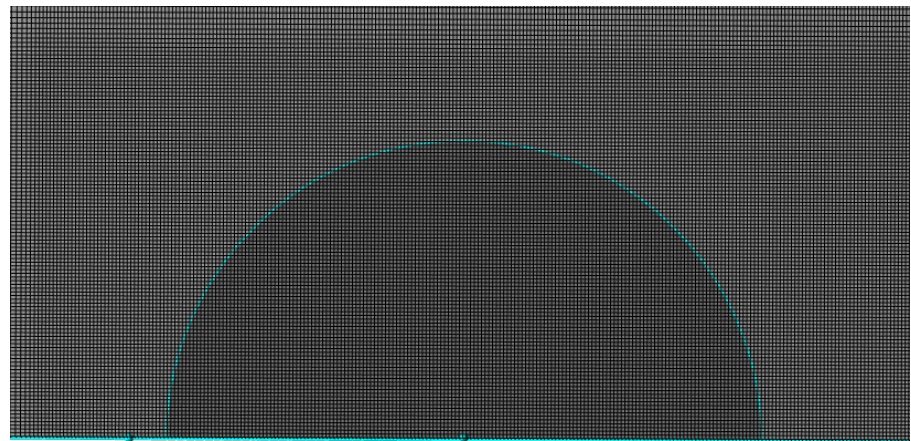
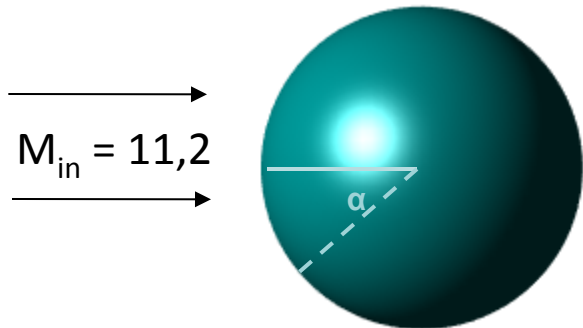
# Обтекание конуса



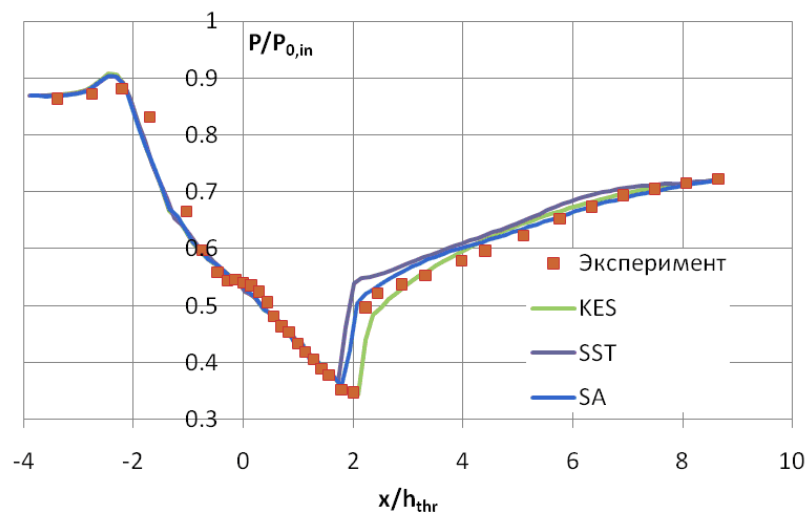
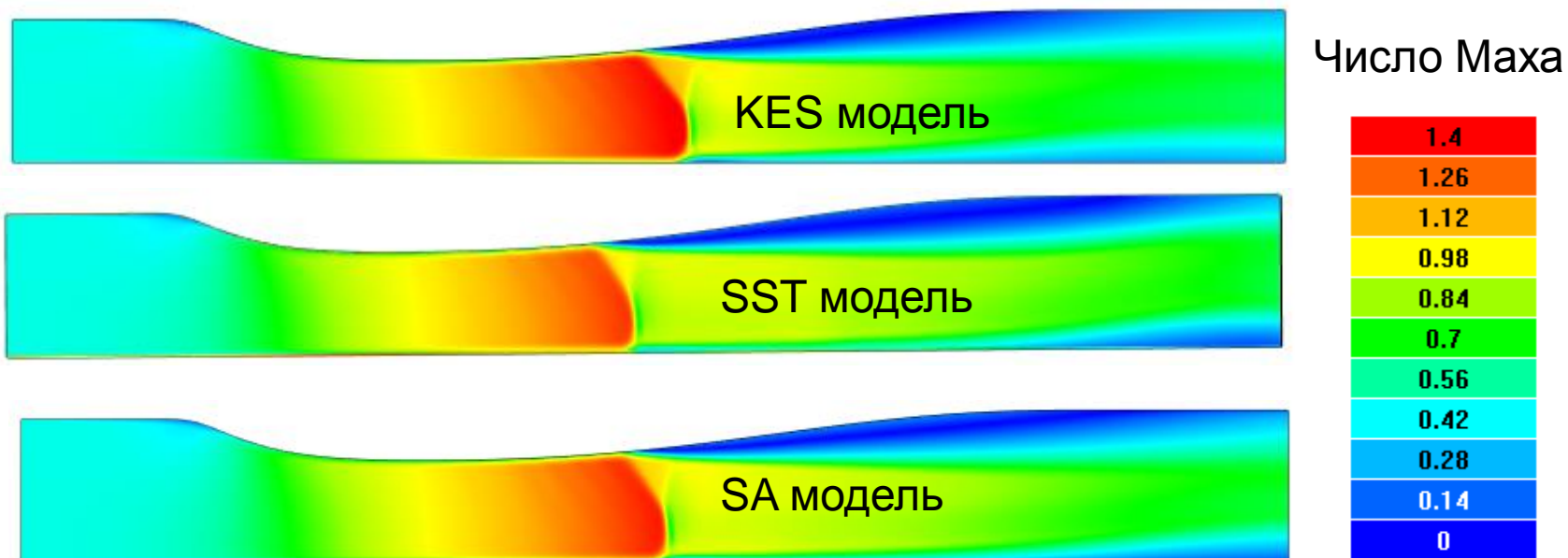
# Обтекание конуса



# Сверхзвуковое обтекание сферы



# Трансзвуковое течение в сопле

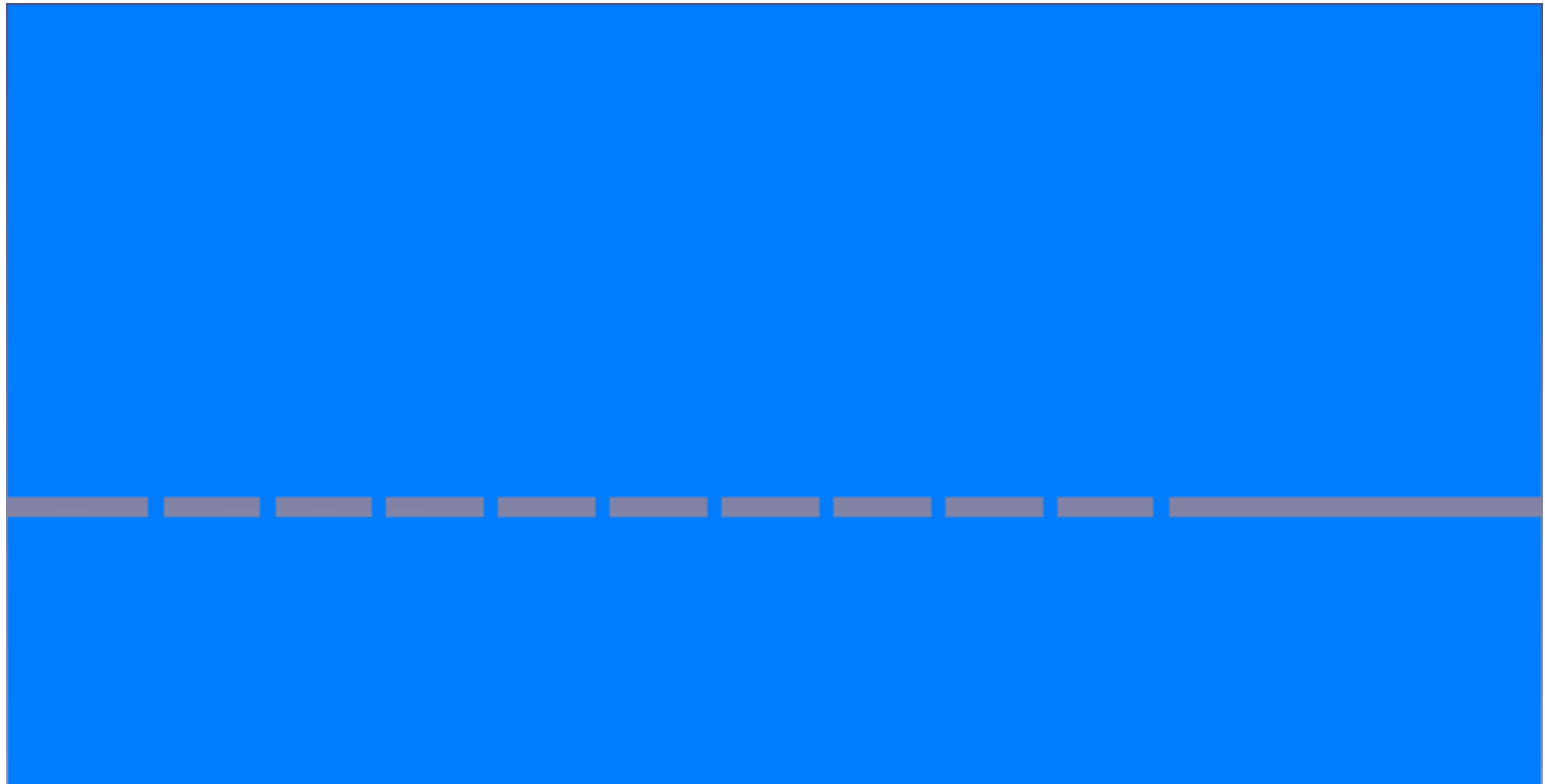




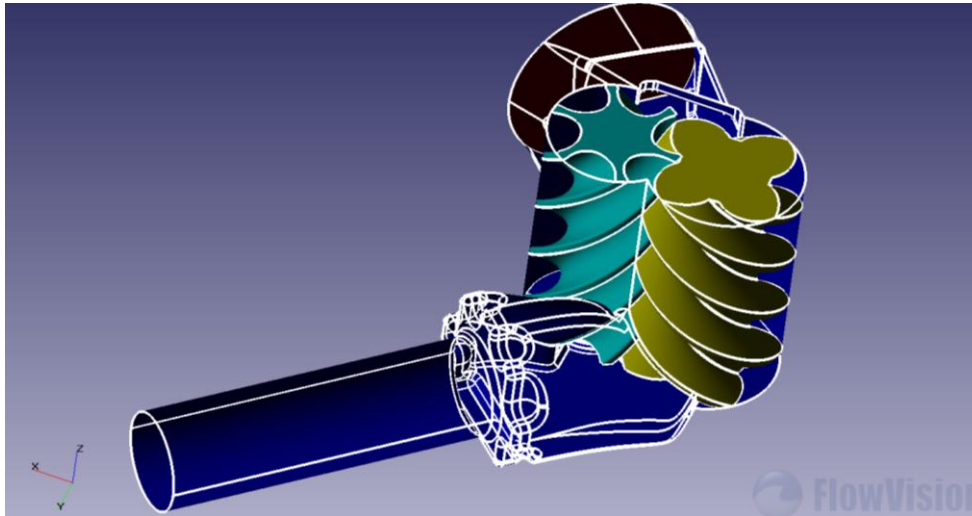
# Моделирование движения тел



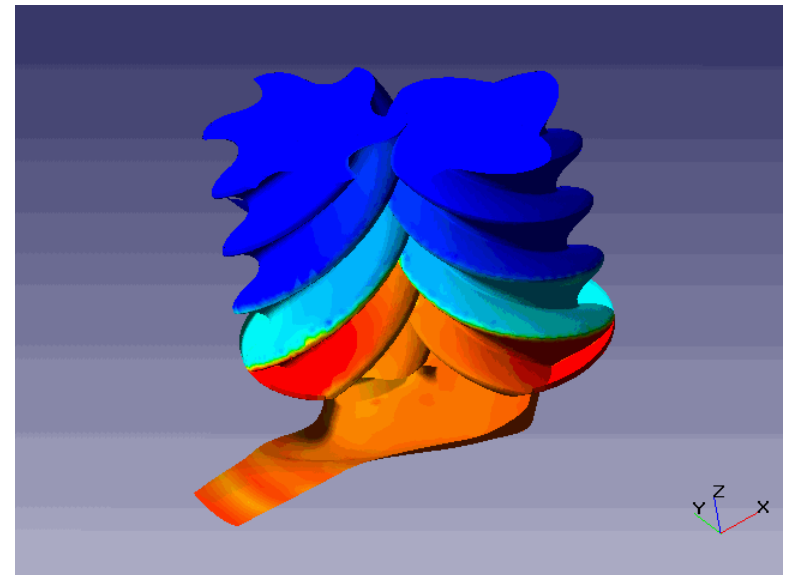
# Опыт Маха



# Моделирование винтового компрессора

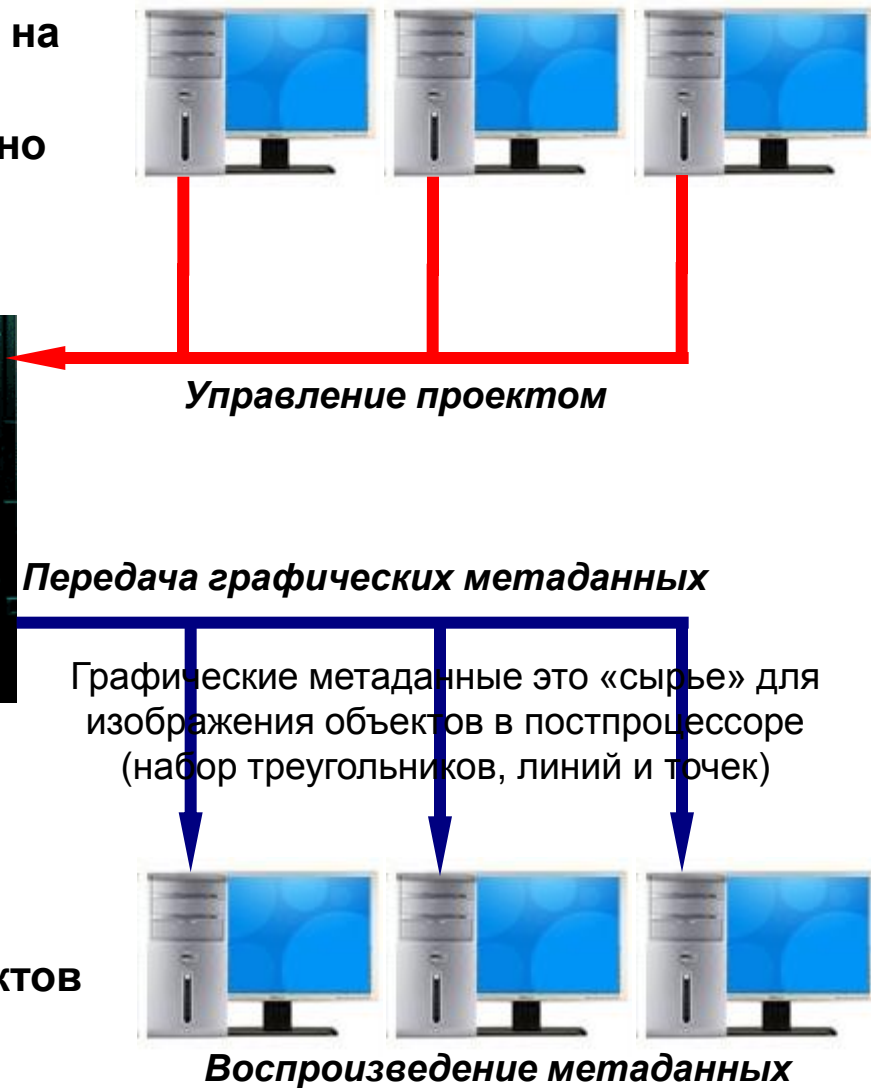


**Учитывались тепловые зазоры между роторами!**



# FlowVision – клиент-серверная архитектура и параллельная визуализация

- Пользователь Windows может легко работать на Linux кластере без каких-либо знаний Linux
- Несколько пользователей могут одновременно работать с одним проектом FlowVision

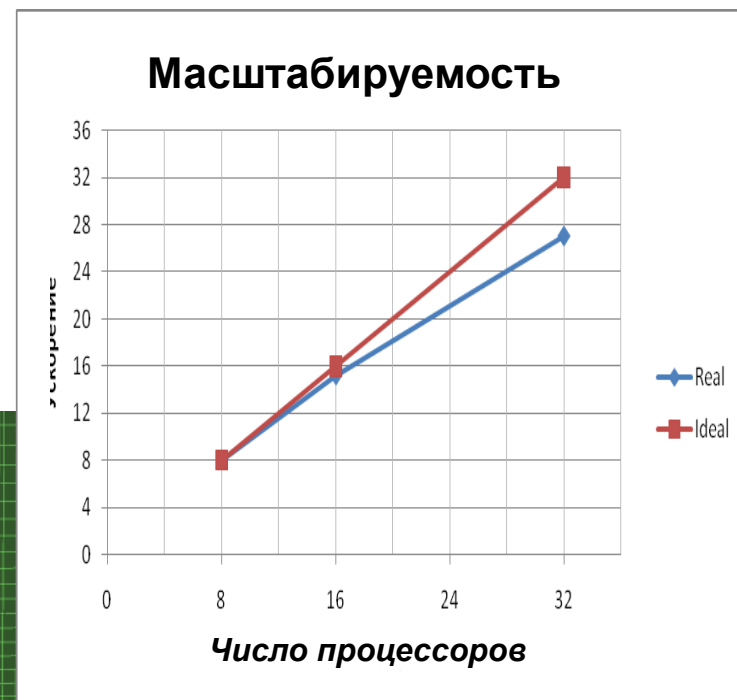
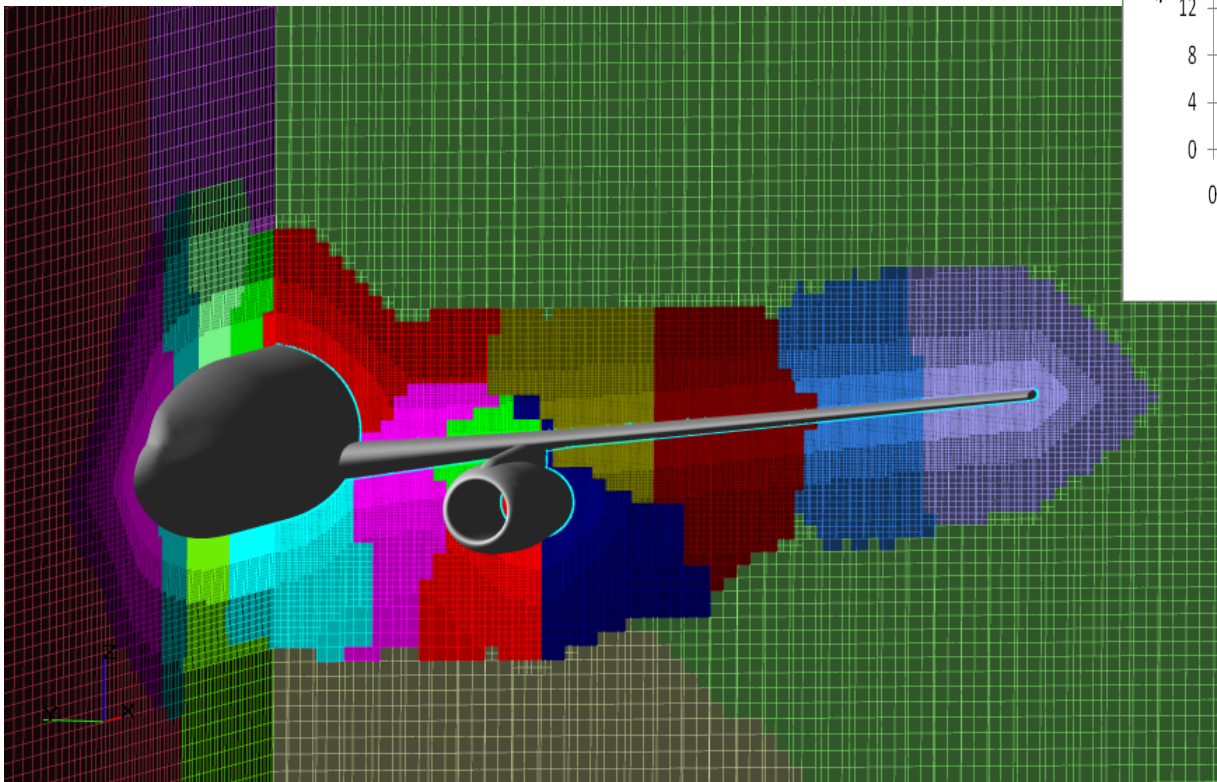


- Быстрая визуализация CFD результатов, полученных на кластере
- Возможность визуализации больших проектов FlowVision



# Параллельная эффективность

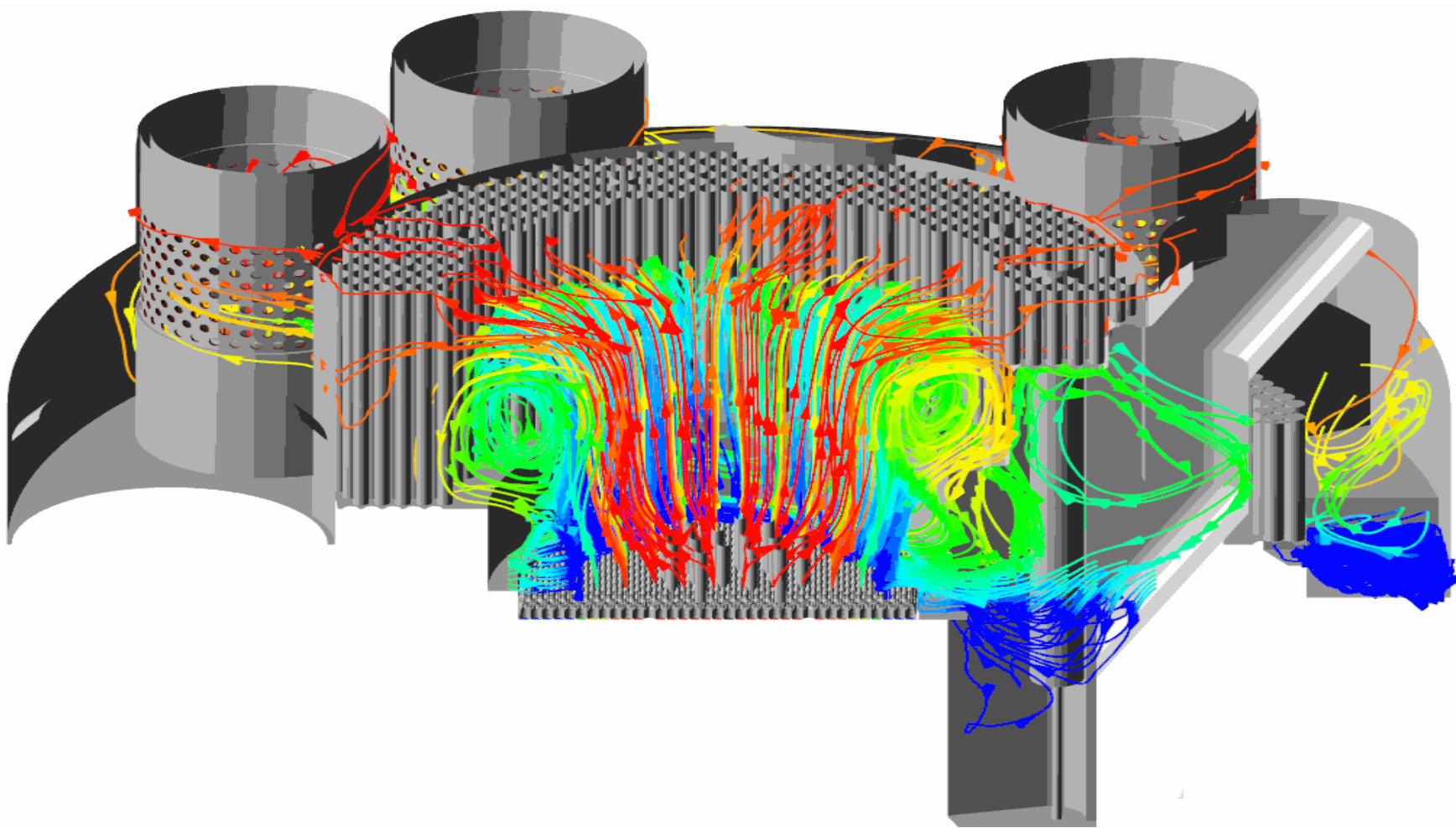
- Компьютерные системы с распределенной памятью
- Компьютеры с разделяемой памятью
- Автоматическая декомпозиция расчетной области



**Декомпозиция расчетной области:**  
 Различные цвета расчетных ячеек соответствуют ячейкам, рассчитываемым на разных процессорах

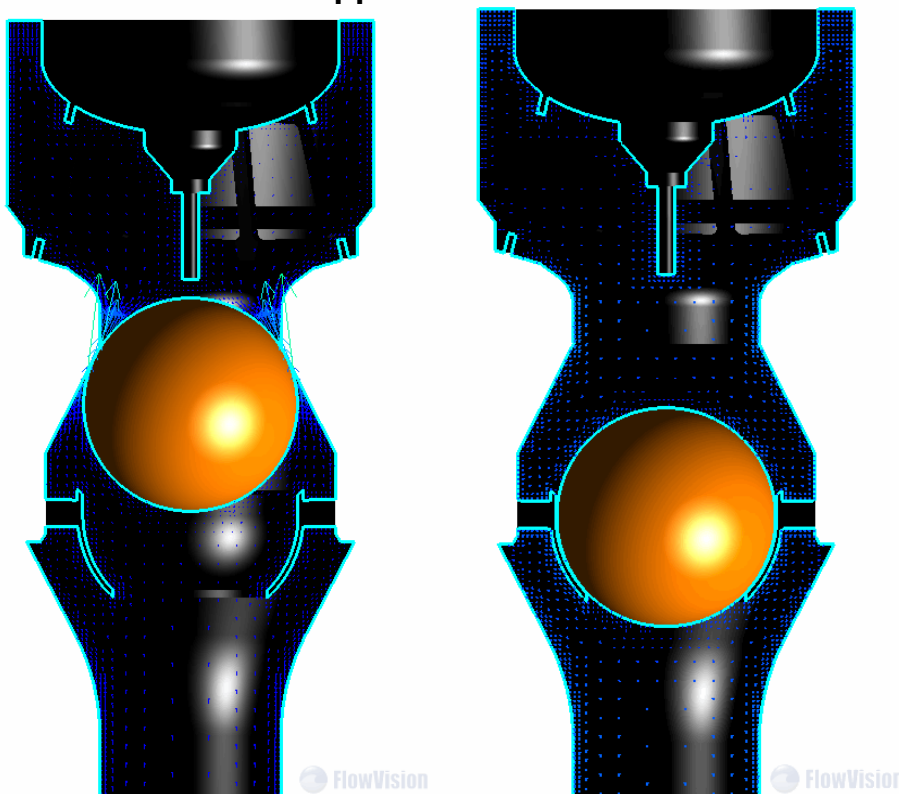


# Очень интересные проекты

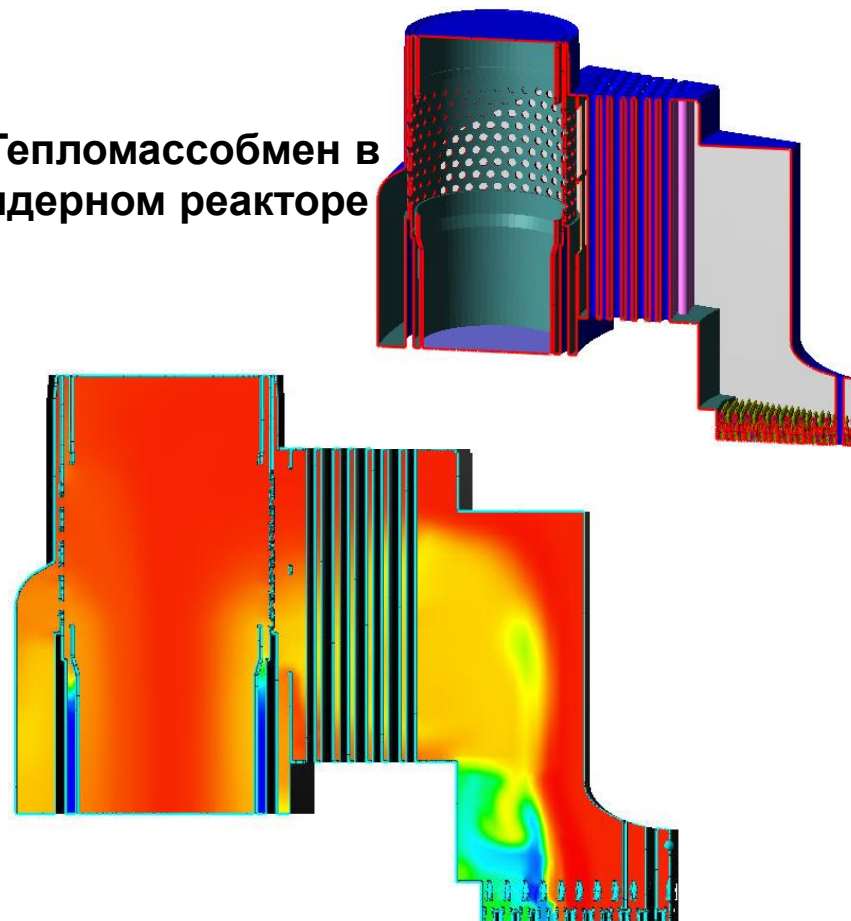


# Безопасность ядерных реакторов

Моделирование устройства регулирования температуры в ядерном реакторе в случае отказа системы охлаждения

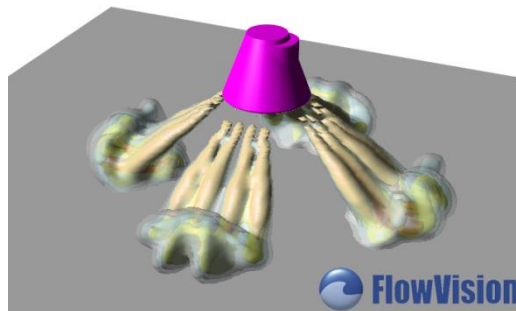
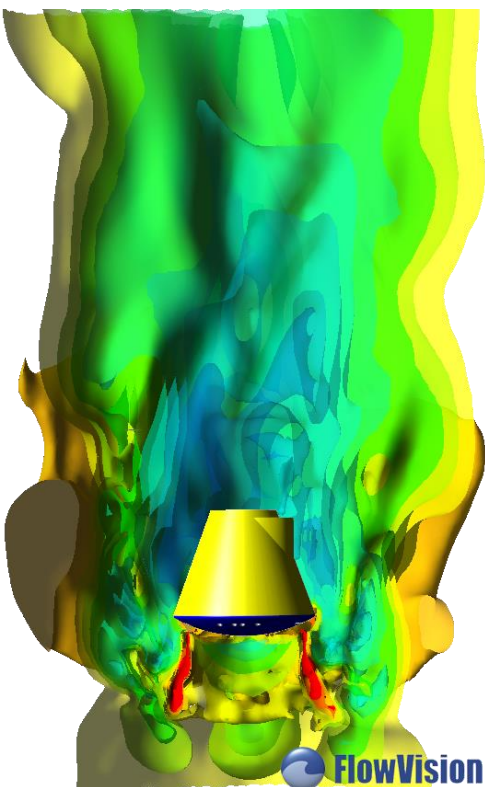


Тепломассобмен в ядерном реакторе

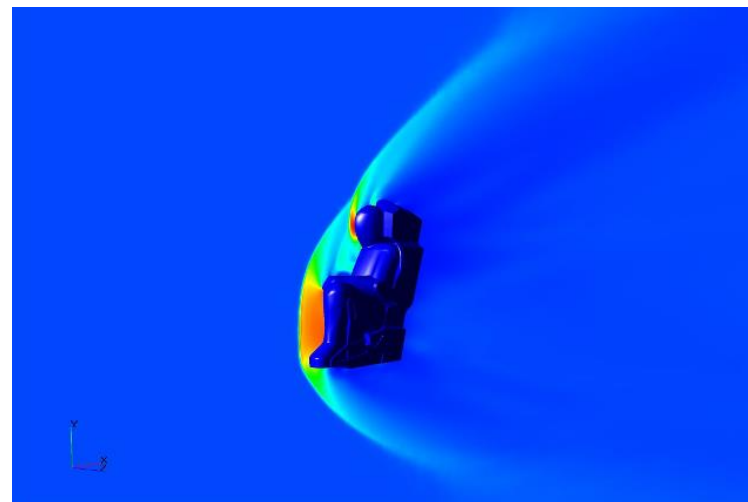


# Космонавтика и авиация

Наш новый космический корабль



Если в воздухе случится непредвиденное – спасти самую дорогую часть самолета – пилота!

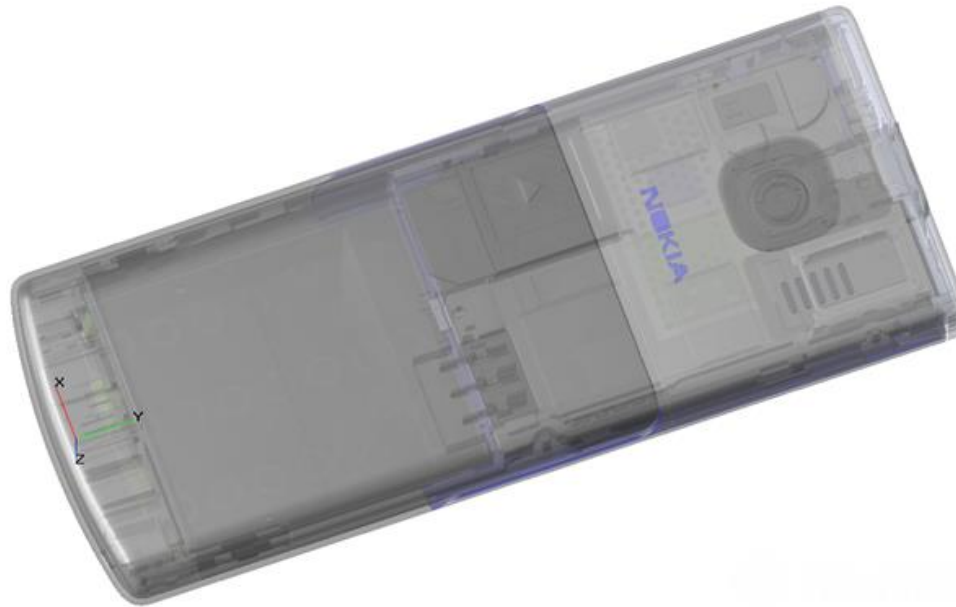


(by authority of RSC Energia)





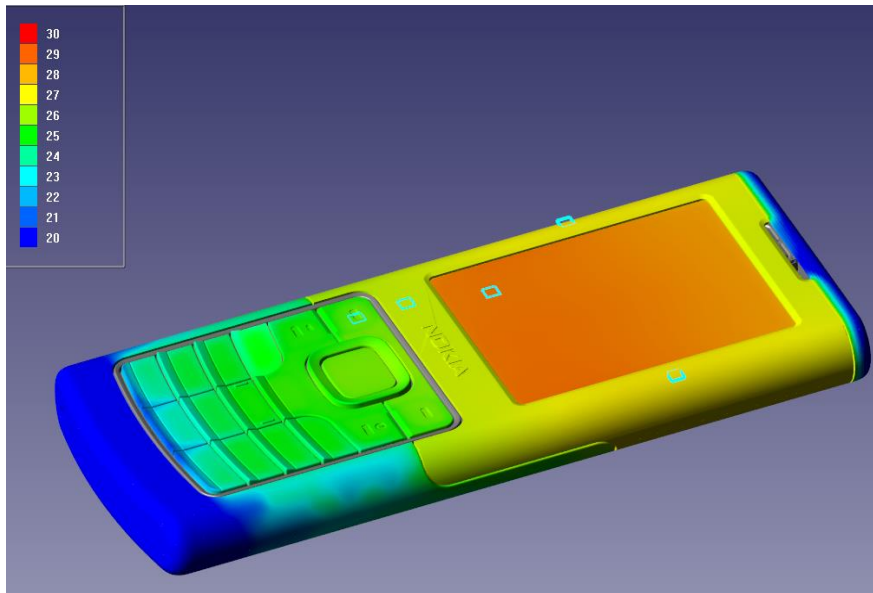
# Теплообмен в мобильном телефоне



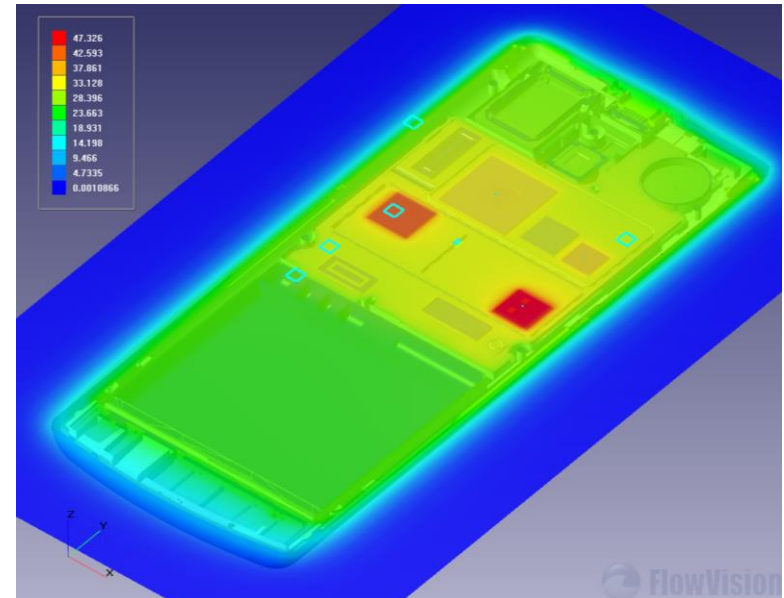
- 250 частей
- Полностью автоматическое построение сетки
- 10 различных материалов + воздушная фаза
- Сопряженный теплообмен в воздухе и деталях
- Радиационный перенос
- Субмикронные зазоры между деталями
- 30 млн ячеек



# Теплообмен в мобильном телефоне: Результаты



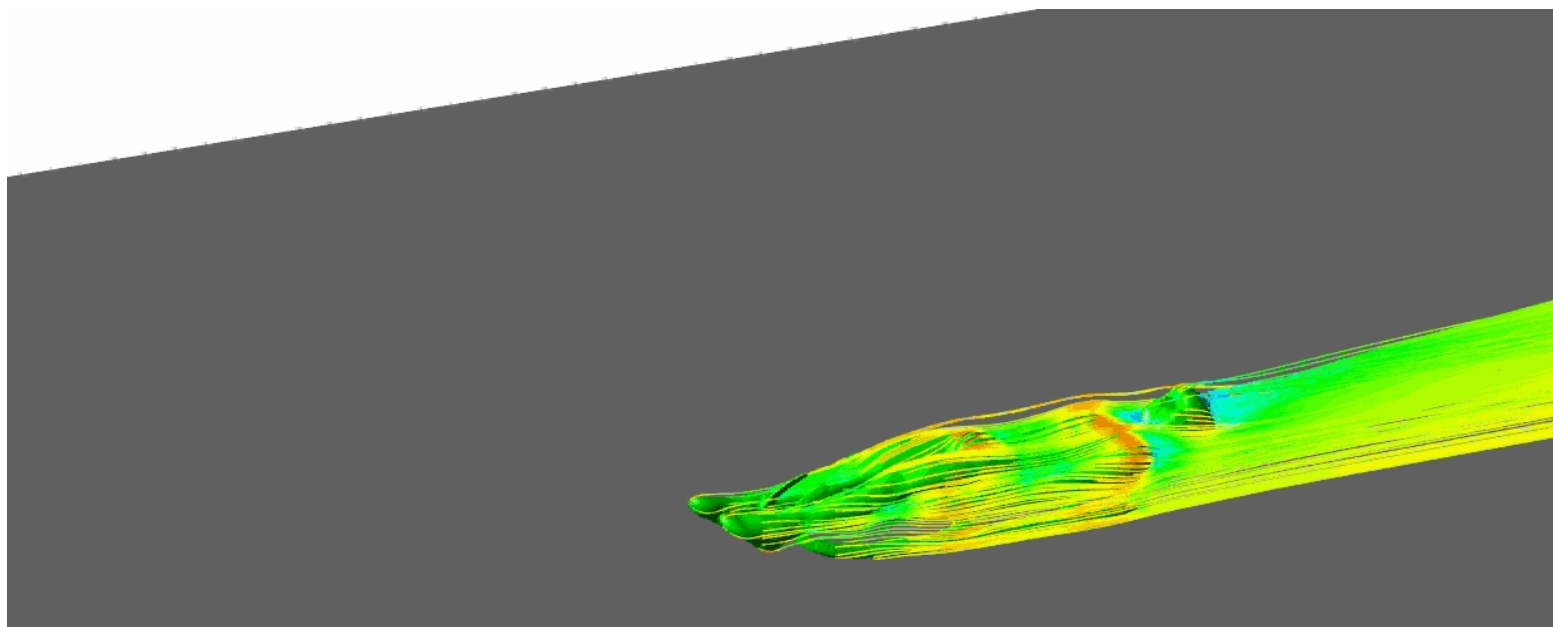
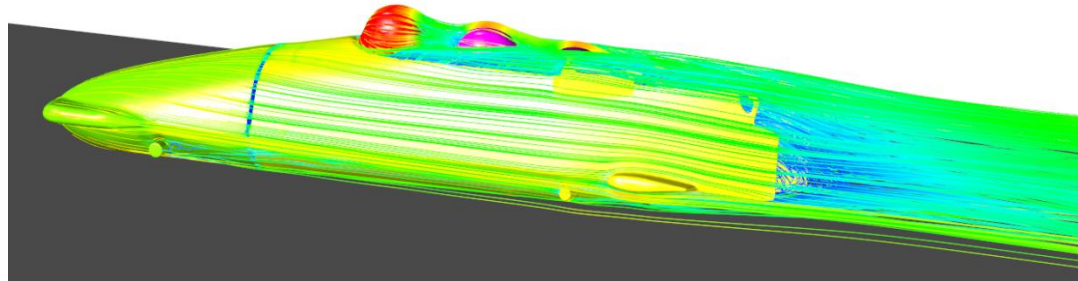
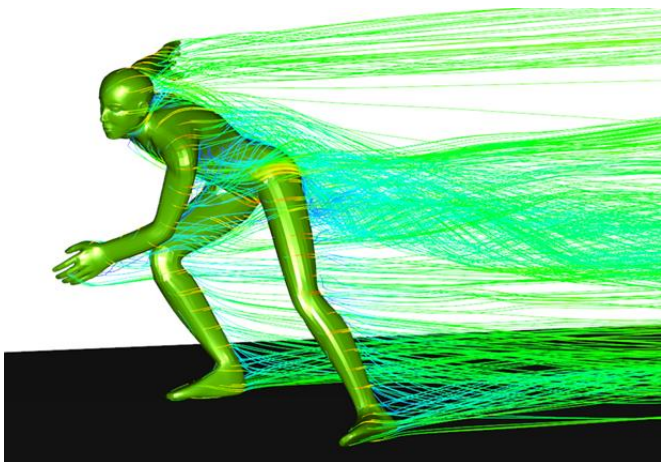
- Распределение температуры на поверхности телефона
- Видно, что внутренняя структура создает неоднородное распределение температуры



- Распределение температуры в сечении телефона
- Видно, что некоторые детали сильно разогреты



# Зимние виды спорта



## Заключение

- CAE – это чрезвычайно интересная область, созданная на стыке наук МСС, вычислительной математики, программирования, компьютерной графики и методов визуализации
- Занимаясь в этой области, вы соприкасаетесь со всем новым и интересным, что создается в нашем мире.
- **Go to engineering, young men!**

