

# Компьютерное моделирование при решении задач техносферной безопасности

Преподаватель:  
Шарай Елена Юрьевна

[e9.sharay@yandex.ru](mailto:e9.sharay@yandex.ru)

# Структура курса

1) 8 лекций и 17 практических занятий.

2) Контрольные мероприятия:

- 2 РК: 8 и 15 недели;
- 1 домашнее задание: 16 неделя;
- модули: 10 и 17 недели.

3) Экзамен.



# Особенности установки ANSYS

Продукт поддерживается только на **MS Windows 7, 8, 10 64-разрядных** компьютерах.

Путь обращения программы к своим папкам или папкам, созданным пользователем, не должен иметь букв русского алфавита, т.е. все имена и названия – на англоязычной раскладке.

Текущая бесплатная студенческая версия имеет следующие ограничения на размер сетки:

1. Структурные задачи (деформация твердого тела) – 32 000 конечных элементов;
2. Гидро-газодинамика – 512 000 расчетных узлов сетки.

# Литература

1. **Флетчер К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей, 2 т.
2. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика. Уч. пособие. Т. 6. Гидродинамика.
3. **Роуч П.** Вычислительная гидродинамика.
4. **Лоханский Я. К.** Основы вычислительной гидромеханики и теплообмена. Уч. пособие.
5. **Электронный журнал** для пользователей ANSYS  
[<http://www.ansysadvantage.ru/>]

# Лекция 1. Математическое моделирование и вычислительный

## эксперимент. Математическая модель.

**Моделирование** – процесс замещения объекта исследования некоторой его моделью и проведение исследований на модели с целью получения необходимой информации об объекте.

**Модель** – это физический или абстрактный образ моделируемого объекта, удобный для проведения исследований и позволяющий адекватно отображать интересующие исследователя физические свойства и характеристики объекта.

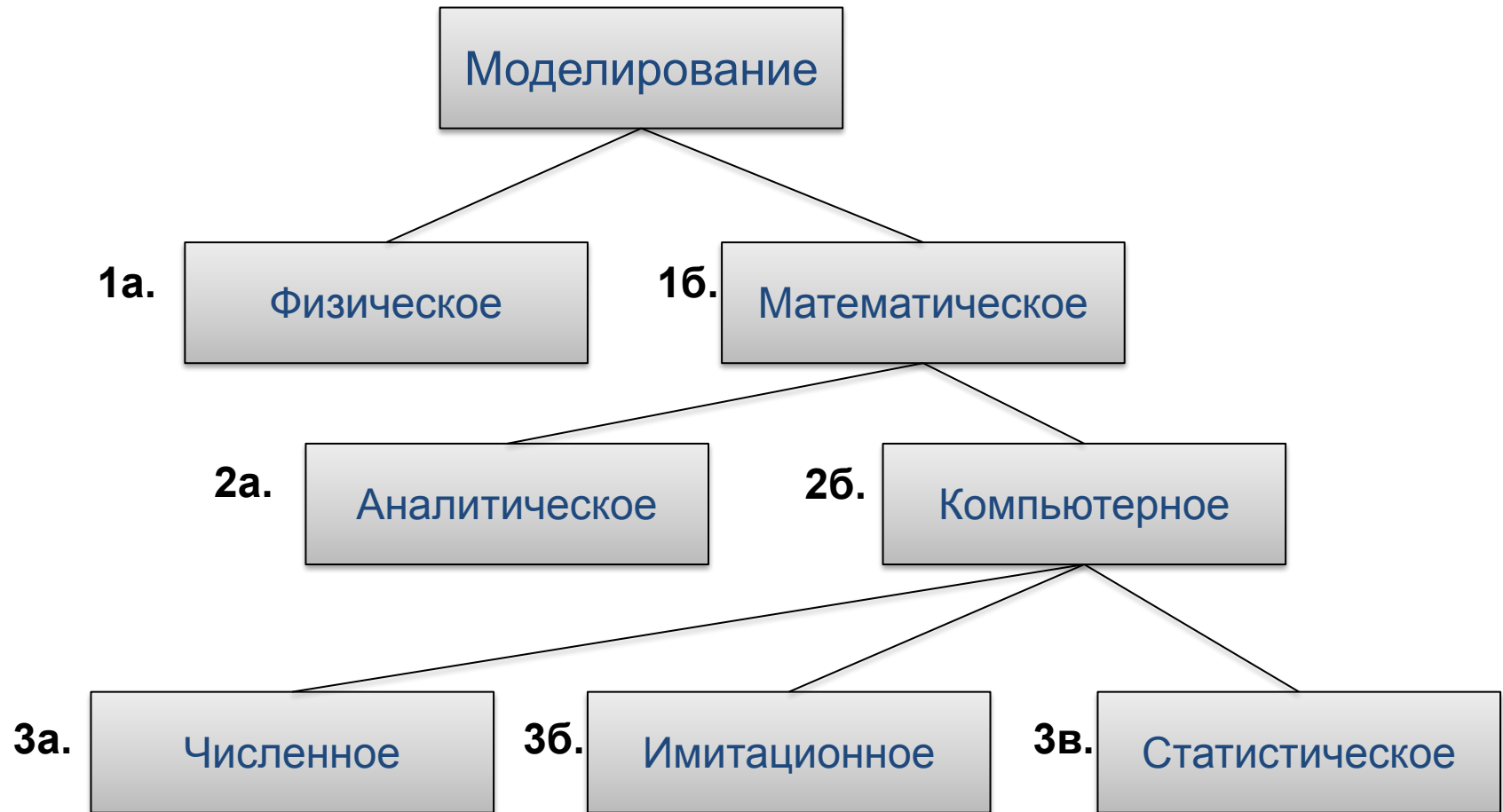
### **Достоинства моделирования:**

- легкость и доступность получения информации;
- сокращение сроков исследования;
- поведение в любых мыслимых ситуациях;
- уменьшением материальных затрат на исследование.

### **Недостатки моделирования:**

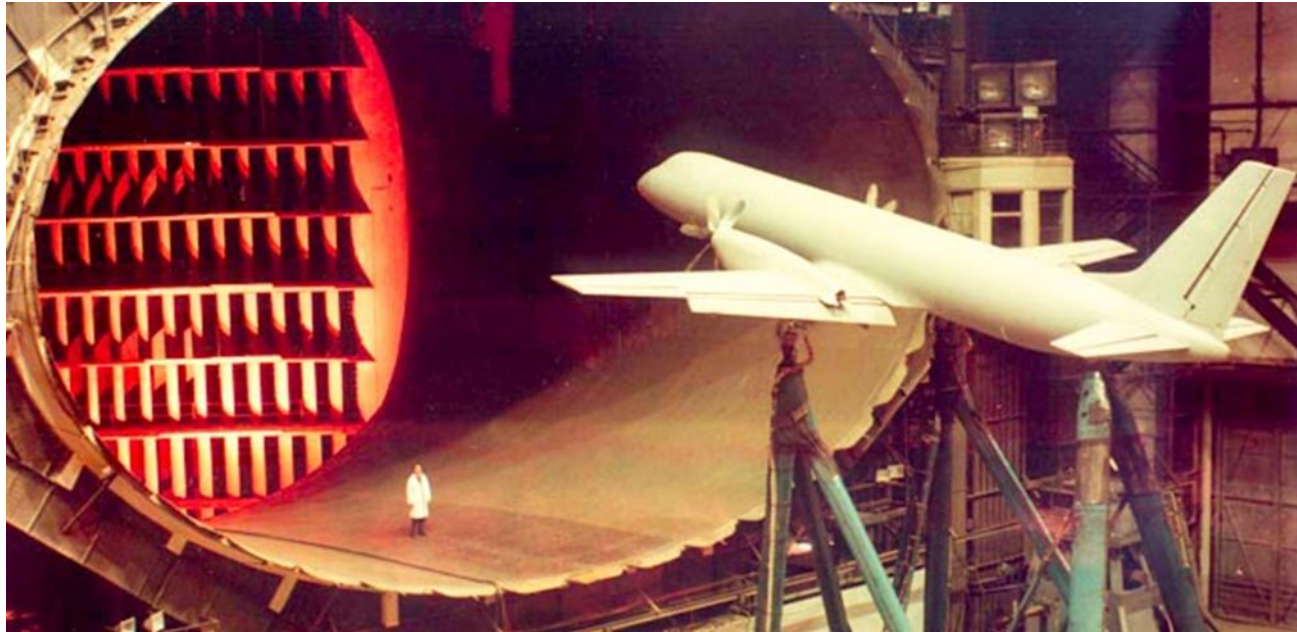
- невозможность учесть все свойства реального объекта (отбрасывание несущественных, упрощение).

# Классификация видов моделирования систем и объектов



1а.

## Физическое моделирование



Аэродинамическая труба Т-101

Размеры объектов испытаний:

- размах крыла – 18 м;
- длина фюзеляжа – 30 м;
- площадь крыла – 35 м<sup>2</sup>



# 16. Математическое моделирование

## История математического моделирования

- Первые методы Ньютона (численный метод решения алгебраических уравнений), Лагранжа, Эйлера (численный метод решения обыкновенных дифференциальных уравнений), аль-Хорезми ( среднеазиатский математик 9 в. аль) и др.
- Решения практической задачи в 30-х годах XX века в Великобритании при создании системы противовоздушной обороны.
- Конец 40-х — начало 50-х годов XX века – появление ЭВМ и ракетно-ядерная программа.
- Конец XX — начало XXI веков – появление высокоэффективных методов моделирования, рассчитанных на современные компьютеры.

# 16. Математическое моделирование

## Применения математического моделирования в различных областях

- энергетика: управление ядерными реакторами, моделирование термоядерных процессов, прогнозирование энергетических процессов, управление энергоресурсами;
- космонавтика: расчет траекторий и управления полетом космических аппаратов, моделирование конструкций летательных аппаратов, обработка спутниковой информации;
- медицина: моделирование, прогнозирование эпидемий, инфекционных процессов, управление процессом лечения, диагностика болезней;
- производство: управление техническими и технологическими процессами и системами, ресурсами (запасами), планирование, прогнозирование оптимальных процессов производства;
- экология: моделирование загрязнения экологических систем, прогноз причинно-следственных связей в экологической системе, откликов системы на те или иные воздействия экологических факторов

## 2а. Аналитическое моделирование

Аналитическая модель исследуется следующими методами:

- **аналитическим**, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости для искомых характеристик системы;
- **численным**, когда, не умея решать уравнения в общем виде, стремятся получить числовые результаты, но при конкретных начальных данных;
- **качественным**, когда не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения).

## 2а. Аналитическое моделирование

Аналитическая модель представляет собой уравнение процесса или систему уравнений.

### Пример 1.

Модель, описывающая путь, пройденный автомобилем при равноускоренном движении с момента начала движения:

$$S(t) = v_0 t + at^2,$$

где  $v_0$  и  $a$  – начальная скорость и ускорение.

Для того, чтобы вычислить значение пути  $S(t)$  в заданный момент времени  $t = \tau$  достаточно подставить конкретные значения и выполнить расчет при  $t = \tau$ .

## 2а. Аналитическое моделирование

### Пример 2.

Процесс малых колебаний маятника описывается обыкновенным дифференциальным уравнением:

$$ml \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + mg\varphi(t) = 0,$$

где  $m$  и  $l$  – масса и длина подвеса маятника;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\varphi(t)$  – угол отклонения маятника в момент времени  $t$ .

Из этого уравнения можно найти точные значения интересующих характеристик с помощью методов решения дифференциальных уравнений.

$$\varphi(t) = A \left( \sqrt{\frac{g}{l}} \cdot t + \varepsilon \right),$$

где  $A$  и  $\varepsilon$  – постоянные, зависящие от начальных условий.

$$A = \sqrt{\varphi_0^2 + \frac{l}{g} \dot{\varphi}_0^2}$$

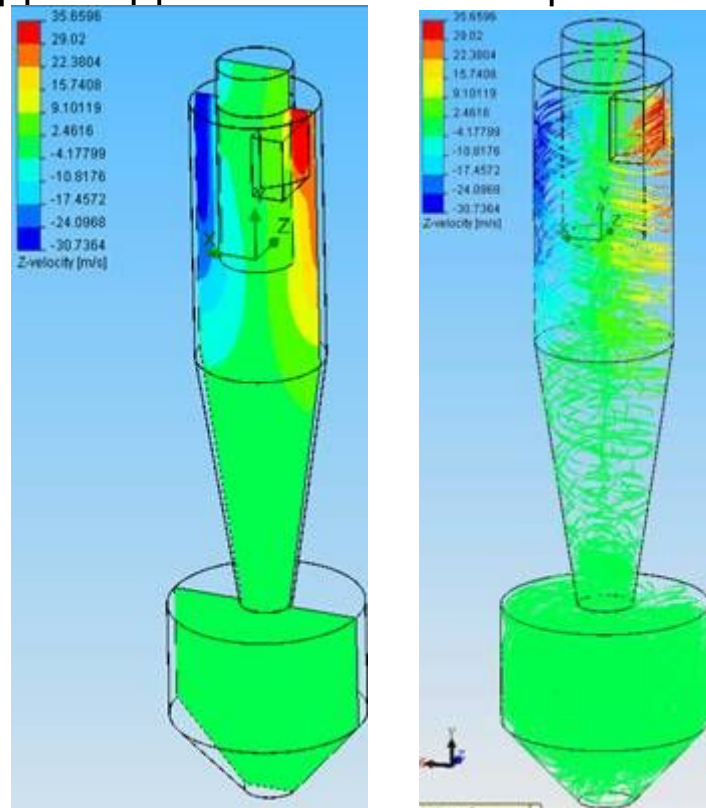
$$tg \varepsilon = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

## 26. Компьютерное моделирование

### 3а. Численное моделирование

#### Пример

Расчет эффективности работы и энергозатрат нестандартного циклона на основе уравнений Навье-Стокса и Лагранжевой модели движения частиц.



## 26. Компьютерное моделирование

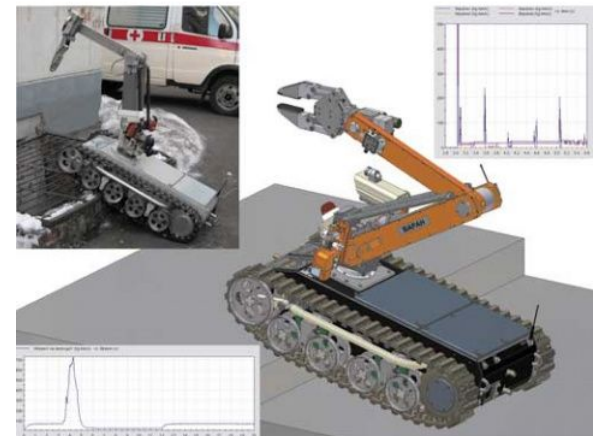
### 3б. Имитационное моделирование

#### Примеры

1. Визуализация дорожной сети и транспортных потоков и оценка эффективности решений в сфере организации дорожного движения.



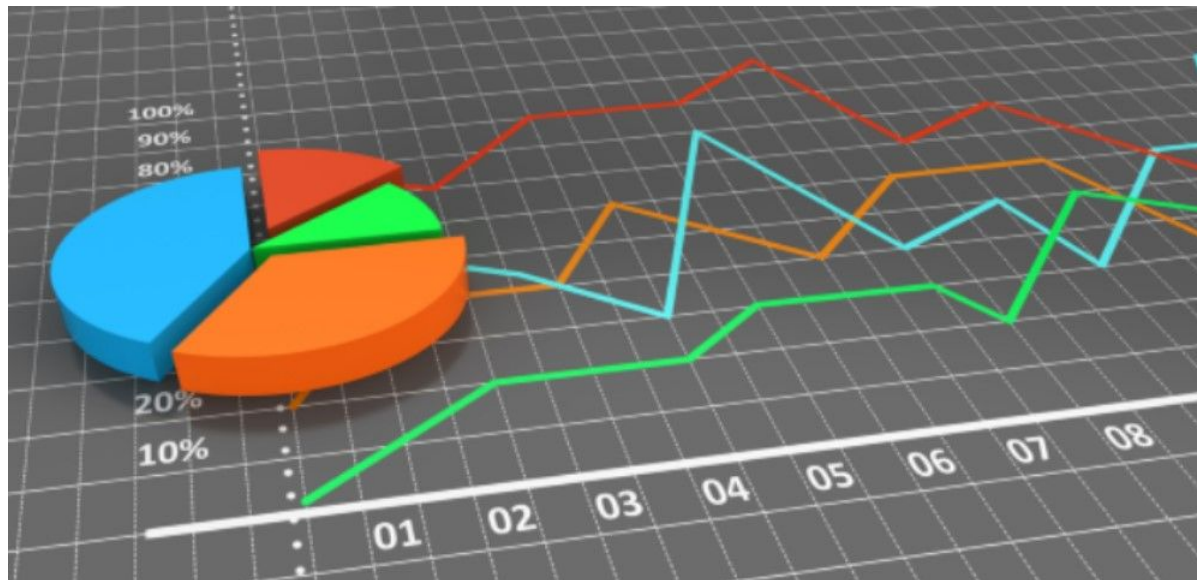
2. Имитация действий робота.



## 26. Компьютерное моделирование

### 3в. Статистическое моделирование

Метод получения с помощью компьютера статистических данных о процессах, происходящих в моделируемой системе. Для получения представляющих интерес оценок характеристик моделируемой системы с учетом внешних воздействий внешней среды статистические данные обрабатываются и классифицируются с использованием методов математической статистики.





# Вычислительный эксперимент

**Вычислительный эксперимент (ВЭ)** - метод исследования явления, процесса или машины, для которых разработана компьютерная модель.

Сущность этой методологии состоит в замене исходного объекта его математической моделью и исследовании современными вычислительными средствами математических моделей.

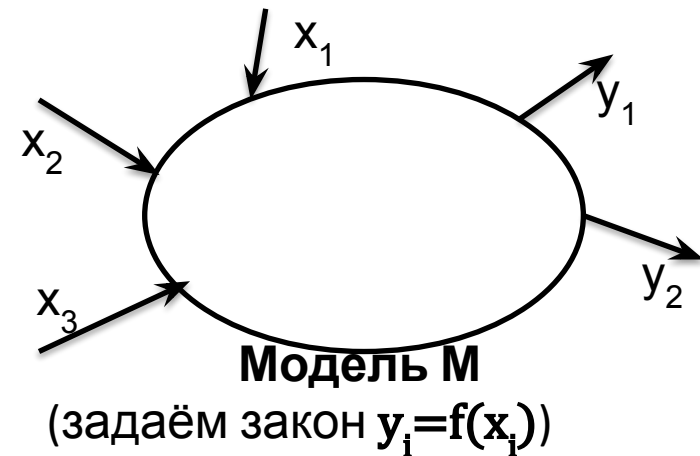
## Типы вычислительного эксперимента:

- поисковый вычислительный эксперимент
- оптимизационный вычислительный эксперимент
- диагностический вычислительный эксперимент
- вычислительный эксперимент в ситуациях, когда имеется большой разрыв между возможностями теории и эксперимента

# Этапы вычислительного эксперимента

## 1 этап

Строится модель исследуемого объекта, отражающая в математической форме важнейшие его свойства – законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, и т.д.



# Этапы вычислительного эксперимента

## 2 этап

Выбор или разработка вычислительного алгоритма для реализации модели на компьютере.

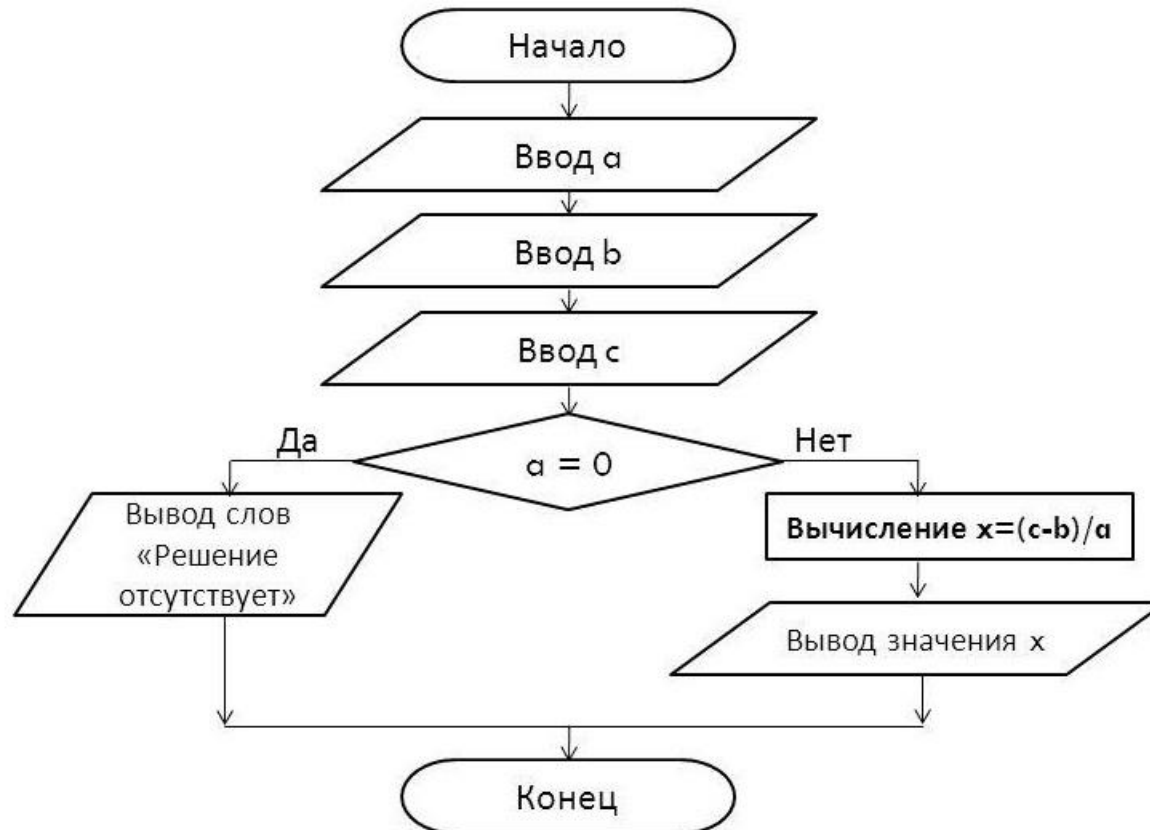
**Вычислительный алгоритм** - точное предписание действий над входными данными, задающее вычислительный процесс, направленный на преобразование произвольных входных данных в полностью определенный этими данными результат.

Необходимо получить искомые величины с заданной точностью на имеющейся вычислительной технике. Вычислительные алгоритмы должны не искажать основные свойства модели, они должны быть адаптирующимися к особенностям решаемых задач и используемых вычислительных средств. Т. е. алгоритм должен быть корректным.

Вычислительный алгоритм называется **корректным**, если:

**1.** Он позволяет после выполнения конечного числа элементарных для вычислительной машины операций преобразовать любые входные данные в результат.

### Алгоритм решения уравнения $ax + b = c$



2. Результат устойчив по отношению к малым возмущениям входных данных.

Пусть дана система двух линейных уравнений:

$$\begin{aligned}u + 10v &= 11, \\ 100u + 1001v &= 1101.\end{aligned}$$

Её решением является пара чисел **(1; 1)**.

«Возмутим» правую часть первого уравнения на 0.01.

$$\begin{aligned}u + 10v &= \mathbf{11.01}, \\ 100u + 1001v &= 1101.\end{aligned}$$

Получим новую, «возмущённую» систему, решением которой является пара чисел **(11.01; 0,00)**, не имеющая ничего общего с решением невозмущённой системы.

Изменение значения одного параметра на 0.01 привело к совсем другому решению. Задача является вычислительно неустойчивой.

# Этапы вычислительного эксперимента

## 3 этап

Создание программного обеспечения для реализации модели и алгоритма на компьютере.

Программный продукт должен учитывать важнейшую специфику математического моделирования, связанную с использованием ряда математических моделей, многовариантностью расчетов. Это подразумевает широкое использование комплексов и пакетов прикладных программ, разрабатываемых, в частности, на основе объектно-ориентированного программирования.

# Этапы вычислительного эксперимента

## 4 этап

Проведение расчетов на компьютере.

Результат получается в виде некоторой цифровой информации, которую далее необходимо будет расшифровать.

Точность информации при вычислительном эксперименте определяется:

- достоверностью модели, положенной в основу эксперимента;
- правильностью алгоритмов и программ (проводятся предварительные «тестовые» испытания);
- техническими характеристиками вычислительных устройств, на которых выполняются расчеты.

# Этапы вычислительного эксперимента

## 5 этап

Обработка результатов расчетов, их анализ, сопоставление с экспериментальными данными и выводы.

На этом этапе могут возникнуть необходимость уточнения математической модели (усложнения или, наоборот, упрощения), предложения по созданию упрощенных инженерных способов решения и формул, дающих возможности получить необходимую информацию более простым способом.



# Области применения вычислительного эксперимента

- Фундаментальные науки: механика, физика, астрофизика и др., для которых отмечается наивысший уровень математизации.
- Техника и промышленность, технология с целью оптимизации производственных процессов.
- Исследование моделей экологически опасных объектов с целью выработки практических рекомендаций по обеспечению условий безопасности функционирования работающих установок и проектируемых объектов.
- Медицина и т.д.

# Математическая модель

**Математическая модель** – приближенное описание реального процесса, выраженное с помощью математических соотношений.

Любая математическая модель описывает реальный процесс лишь с некоторой степенью приближения к действительности.

Математические модели могут представлять собой системы дифференциальных уравнений (обыкновенных или в частных производных), системы алгебраических уравнений, матричные уравнения, линейные, нелинейные уравнения и т.д.

# Основные требования к математическим моделям

- адекватность (соответствие модели своему оригиналу);
- объективность (соответствие научных выводов реальным условиям);
- простота (не засоренность модели второстепенными факторами);
- чувствительность (способность модели реагировать изменению начальных параметров);
- устойчивость (малому возмущению исходных параметров должно соответствовать малое изменение решения задачи);
- универсальность (широта области применения).

# Этапы создания модели

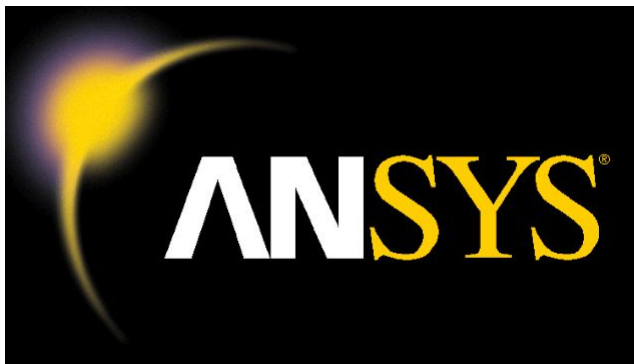


# Инструменты компьютерного инженерного анализа

**CAE-инструменты** (*Computer Aids Engineering*) – инструменты автоматического инженерного анализа.

CAE-инструменты предназначены для:

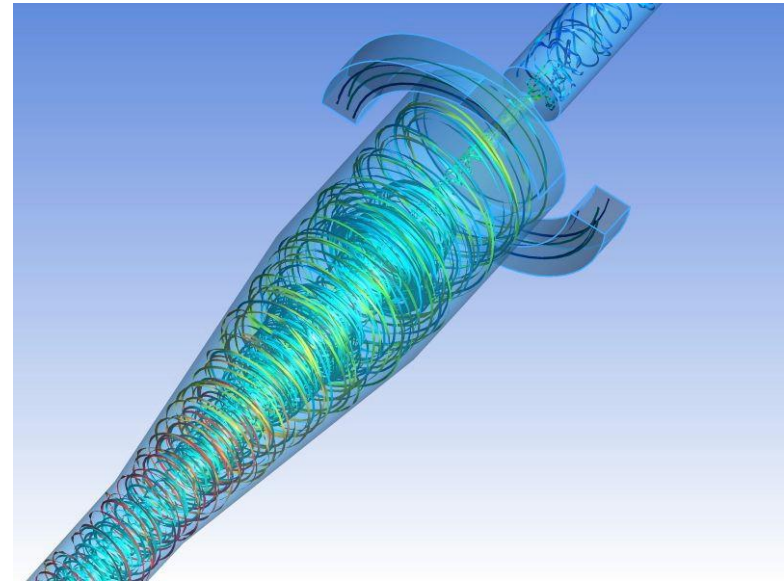
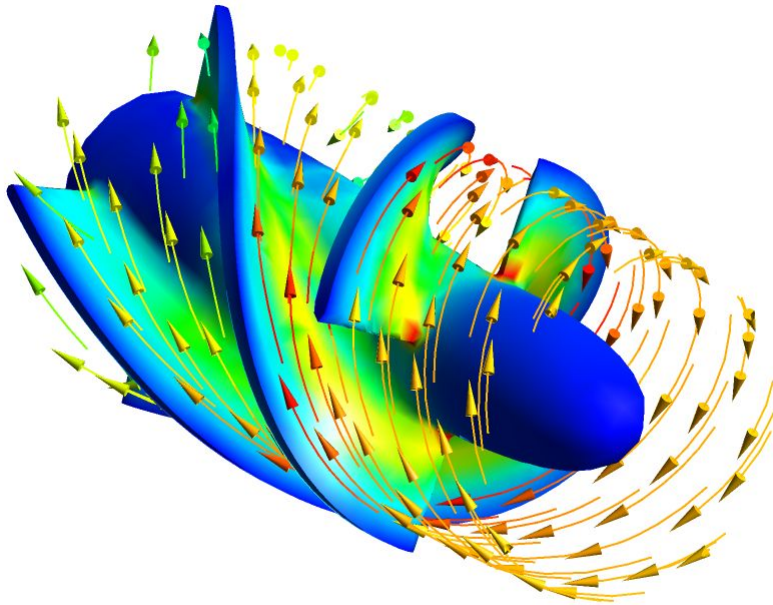
- оптимизации разработок на начальных этапах проектирования;
- снижения стоимости выпускаемой продукции;
- сокращения цикла разработки нового изделия;
- минимизации количества натуральных испытаний;
- научных исследований с возможностью свободного управления параметрами, произвольного их изменения, вплоть до придания им нереальных, неправдоподобных значений;
- проведения вычислительного эксперимента там, где натуральный эксперимент невозможен из-за удаленности исследуемого явления в пространстве либо из-за его значительной растянутости во времени, либо из-за возможности внесения необратимых изменений в изучаемый процесс.

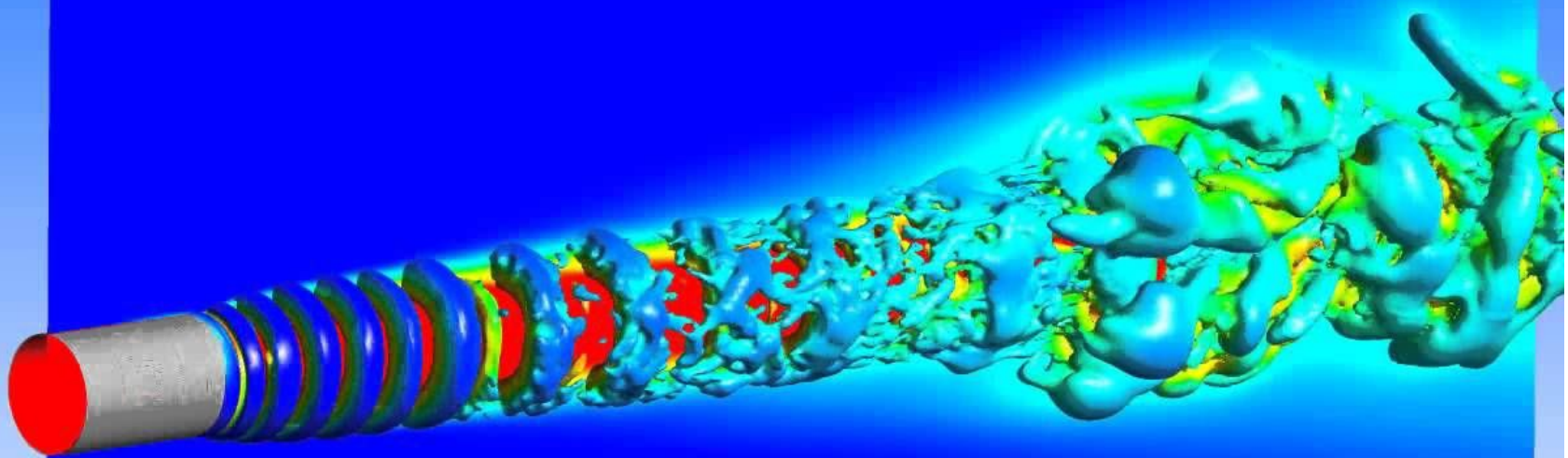


- **ANSYS** – программный продукт, являющийся широко известным CAE-инструментом, появившийся более 30 лет назад, развивающийся и совершенствующийся и по сей день.
- Это передовой комплекс средств компьютерного инженерного моделирования, использующий в своей основе метод конечных элементов.
- Инструменты ANSYS позволяют решать всевозможные задачи из различных областей науки: конструкционные, тепловые, гидрогазодинамические, электромагнитные, акустические, междисциплинарные.

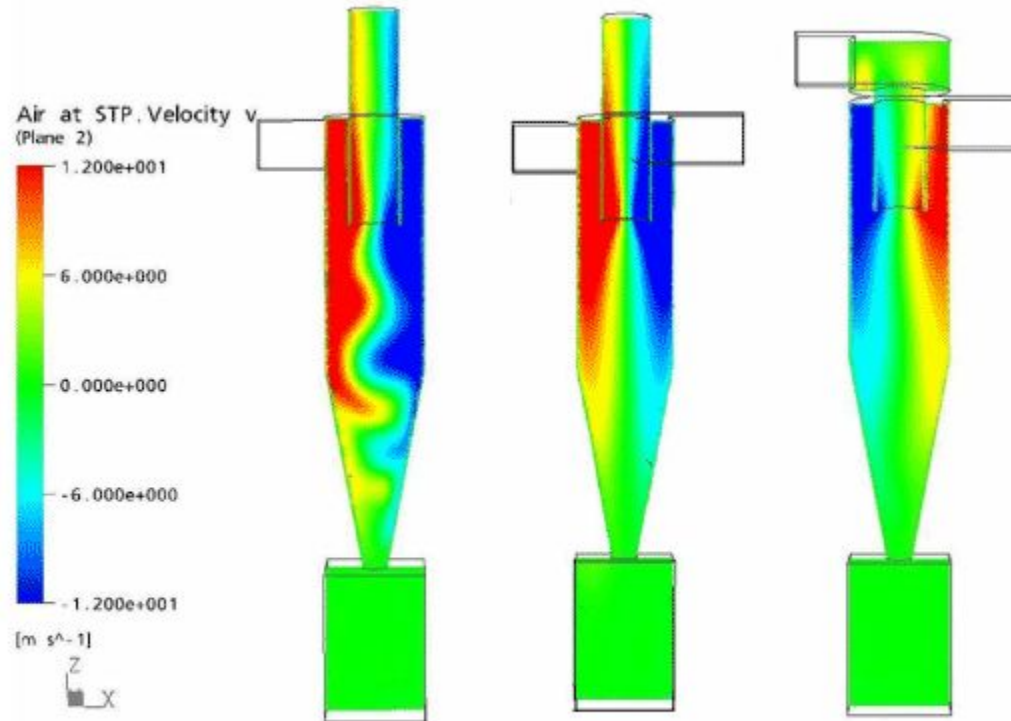
# Основные возможности ANSYS

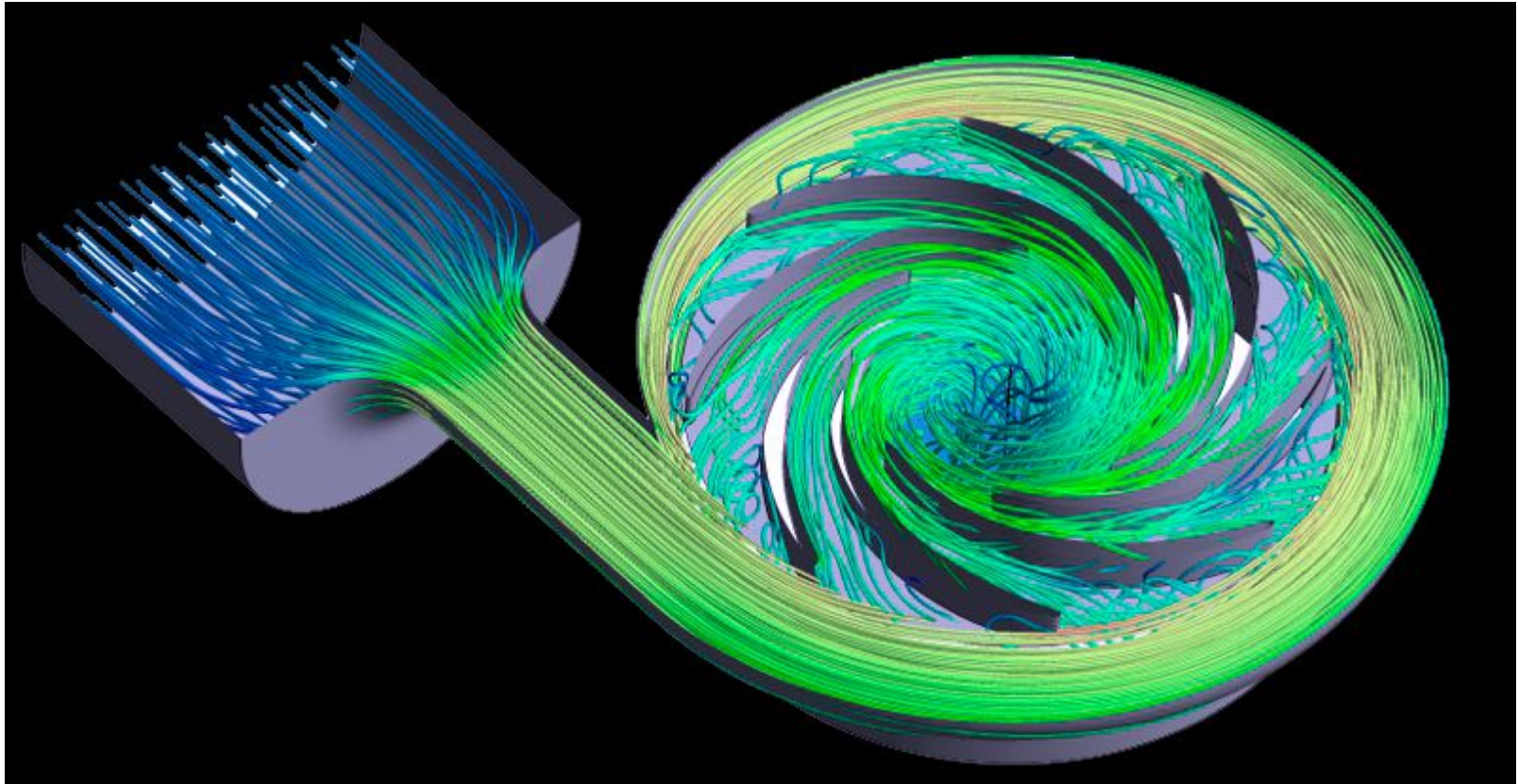
- *вычислительная гидродинамика*





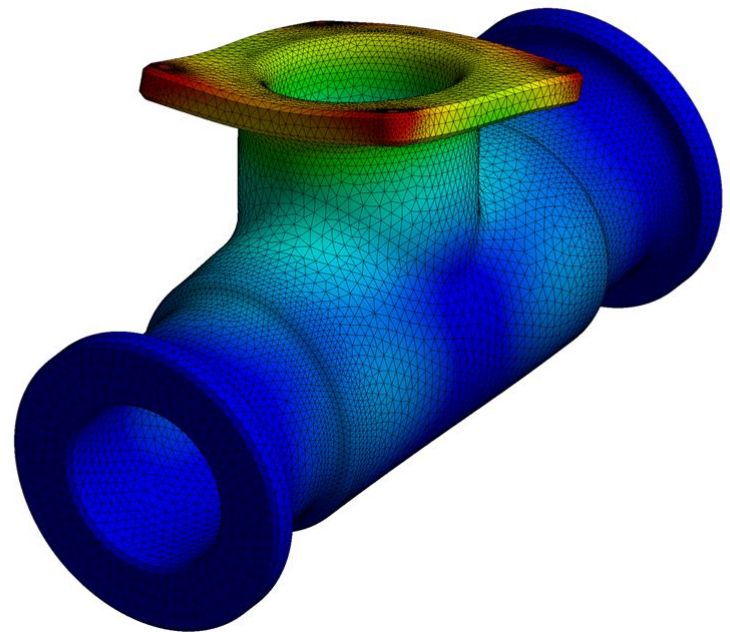
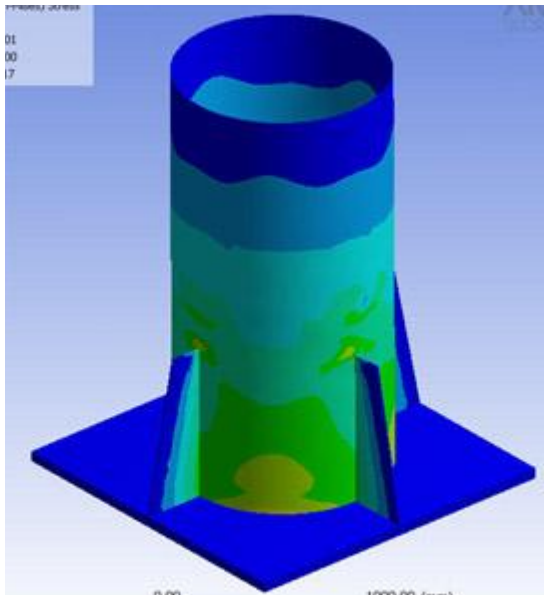






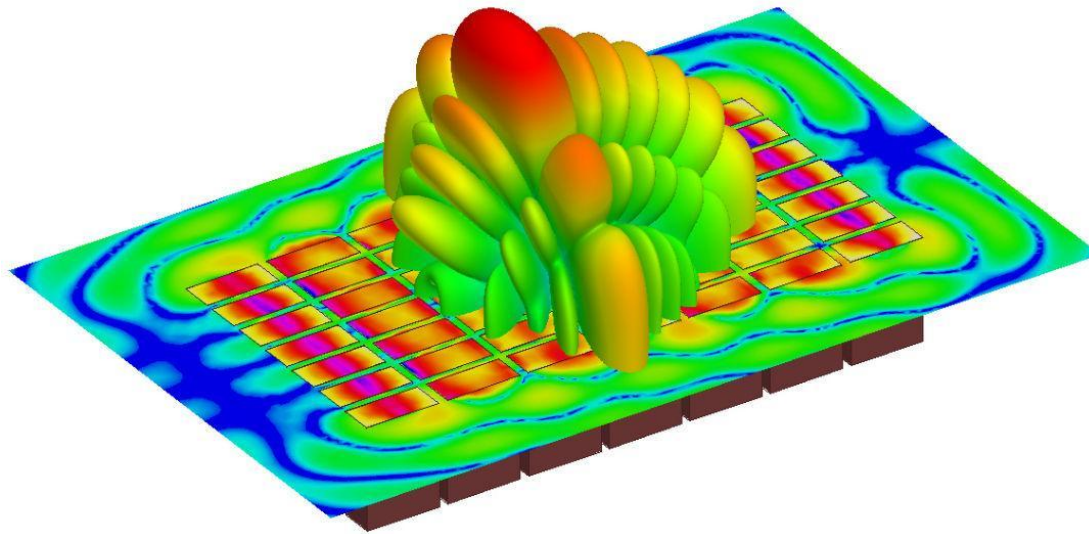
# Основные возможности ANSYS

- *механика деформируемых тел*



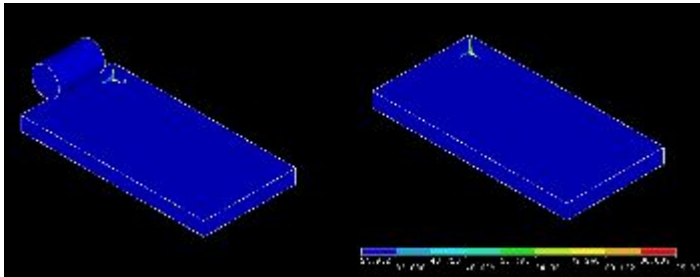
# Основные возможности ANSYS

- *Электромагнетизм*

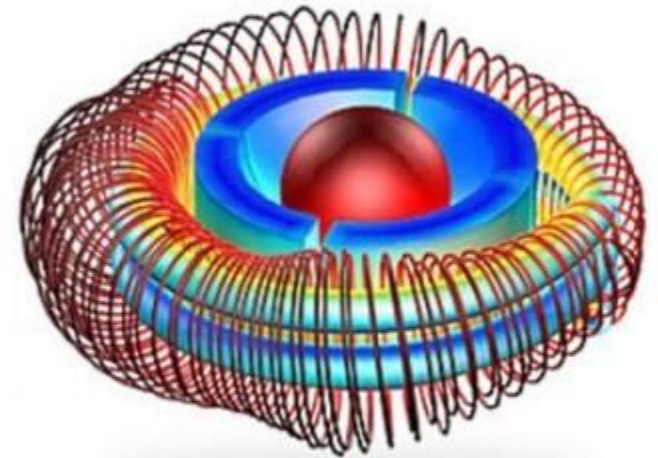


# Основные возможности ANSYS

- *Междисциплинарные расчеты*



**Пример расчета радиационного теплообмена между катящимся цилиндром и пластиной в основании**



*ANSYS Maxwell*

# Этапы моделирования гидродинамических процессов на базе ANSYS WORKBENCH в приложении ANSYS CFX

## 1 этап. Подготовка геометрии для численных расчетов

### 1. Выделение проточной части модели для исследования

Пакеты численного моделирования используются для прогнозирования рабочего процесса механизма или детали. В гидродинамике нас интересуют исключительно гидродинамические характеристики изделий, следовательно, только то место, где течет жидкость (или газ).

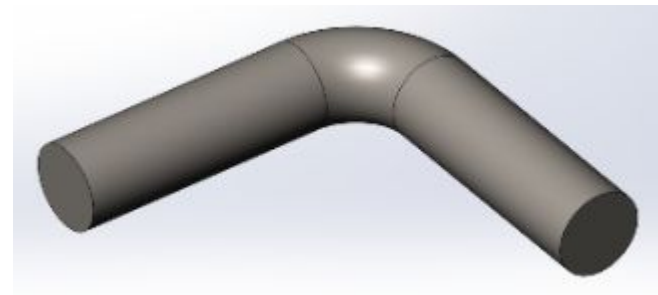
**Проточная часть** – это область изделия, гидродинамические характеристики которой необходимо проверить или изучить.

**ANSYS CFX работает исключительно с геометрией проточной части и всякую твердую модель считает объемом жидкости.**

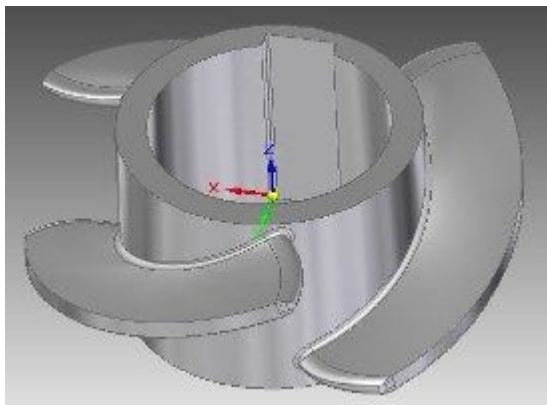
- Пример: необходимо изучить течение жидкости/газа в колене трубопровода.  
**!!!** Не нужно рисовать саму трубу, показывать сварные швы, крепеж и пр. Достаточно построить геометрию проточной части.



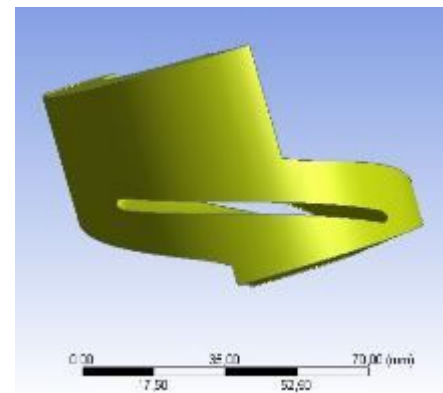
Отрезок трубы (колено)



Проточная часть трубы



Рабочее колесо насоса



Проточная часть колеса

## 2. Инструменты для создания геометрических моделей

Простые конфигурации удобнее всего создавать в различных внешних CAD-системах:

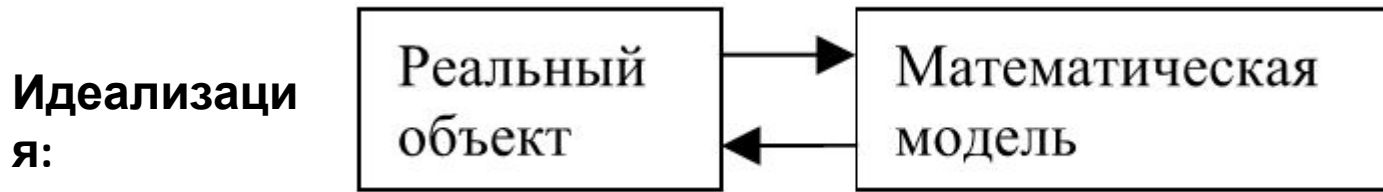
- **КОМПАС**
- **3D**
- **Solid Works**
- **Solid Edge**
- **CATIA**
- пр.

Для формирования проточных частей межлопастных каналов в динамических машинах (турбины, насосы, вентиляторы) рекомендуется применять специализированные программные модули ANSYS CFX:

- Design Modeler
- BladeGen



### 3. Разработка геометрической модели



внесение погрешности

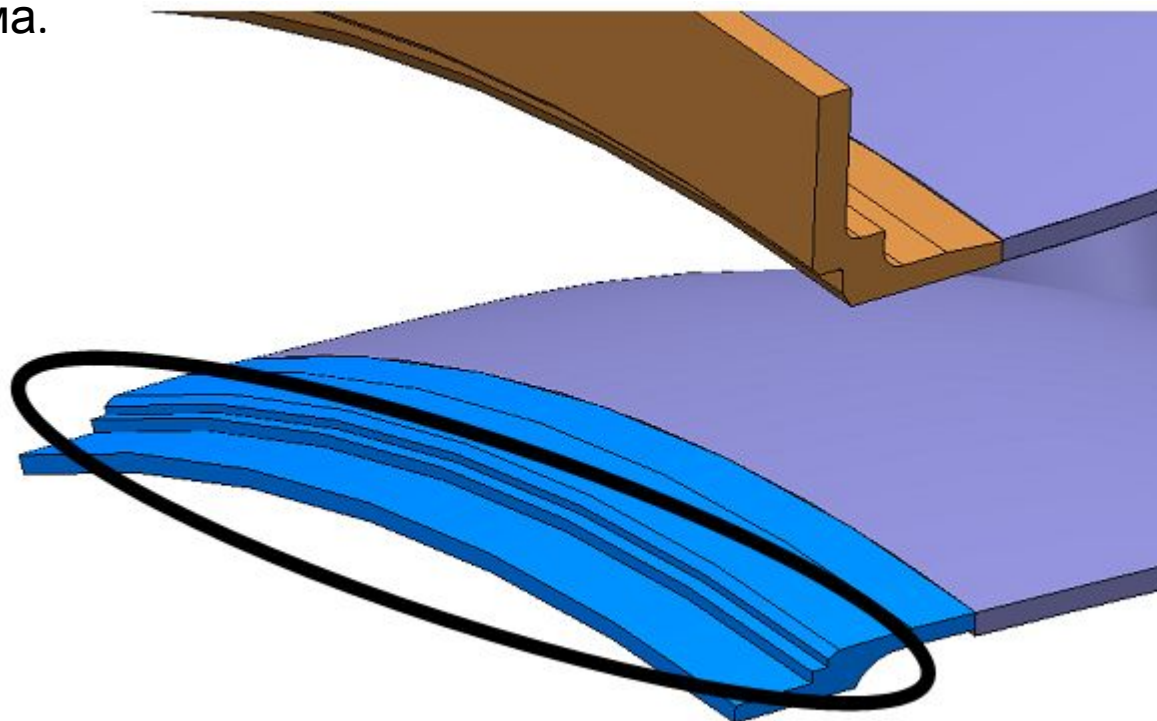
**Упрощение геометрии необходимо для качественного описания модели методом конечных объемов**

- упрощение геометрии за счёт удаления мелких элементов и объектов, не влияющих на моделируемый процесс;
- объединение (если это возможно) объектов малой размерности (погасить отверстия, скругления);
- объединение поверхностей для уменьшения их количества;
- избегание узких поверхностей;
- удаление несущественных щелей и зазоров;
- декомпозиция геометрии в виде разделения сложной геометрии на несколько более простых с сохранением связи между ними;
- использование части геометрии для симметричных осесимметричных деталей (используют сектор детали с границами периодичности или симметрии);
- удаление ненужной геометрии.

## Примеры упрощения геометрии

Элементы, описывающие ступенчатый переход диаметров, при создании сетки обычно имеют низкое качество, что приводит к неточному описанию рабочего объема.

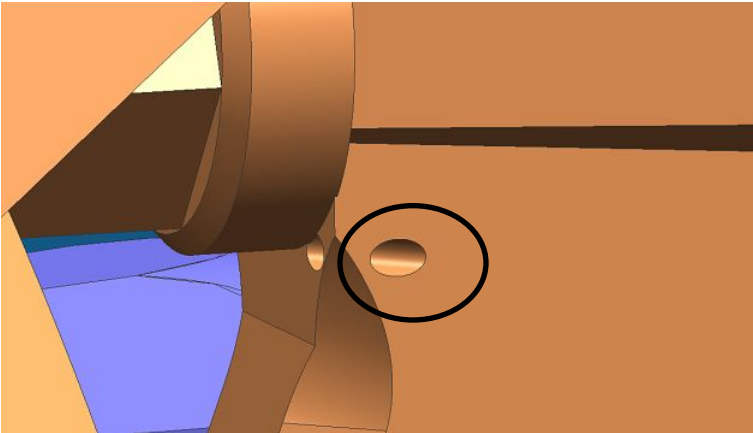
1.



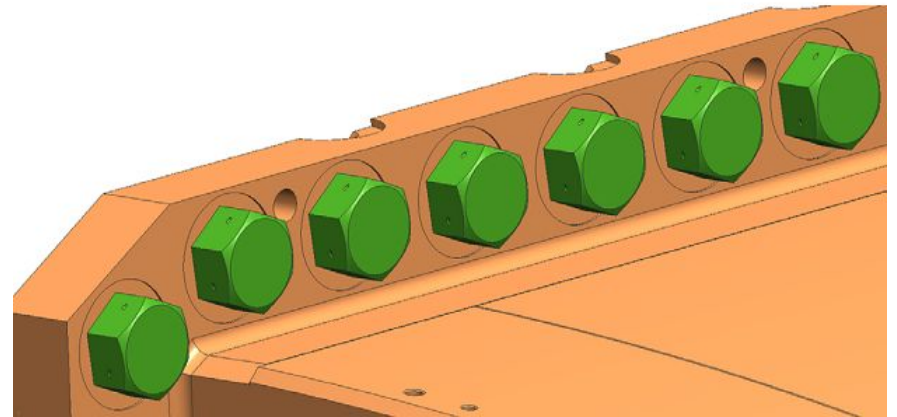
Ступенчатый переход диаметров

Технологические отверстия, «ушки», карманы, элементы крепления незначительно влияют на течение рабочей жидкости, и их можно удалить из геометрии. Как правило, эти элементы имеют маленькие геометрические размеры, что требует тщательного описания этой зоны геометрии, на которую понадобится большое количество элементов сетки. Это приведет к увеличению размера файла увеличит время, необходимое для построения сетки. Также результатом измельчения элементов в этой зоне геометрии может стать низкое качество элементов, расположенных рядом и имеющих большой размер.

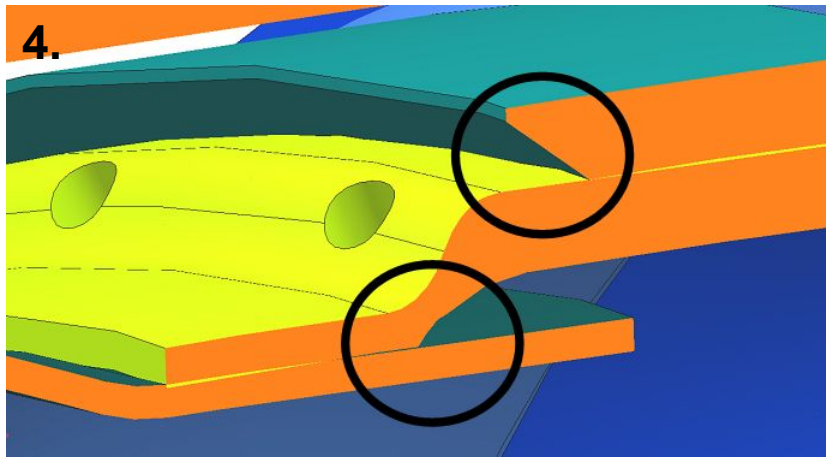
2.



3.



Технологическое отверстие



Крепежные элементы

Острые углы

**Вносимые в геометрию изменения должны незначительно менять расчетную область. При этом не должен меняться характер течения, не должны образовываться дополнительные зоны обратных токов и т.д.**

**Всегда следует помнить, что ЧМ – это всегда компромисс опыта самого инженера, точности результата, мощности вычислительной техники, времени расчета, времени построения модели и т.д.**