# CAE - инженерные расчеты

CAE (англ. Computer-Aided Engineering) это разнообразные программные продукты, обеспечивающие выполнение инженерных расчетов и физически подобной симуляции функционирования проектируемых изделий, проверки их работоспособности, прогнозирования длительности жизненного цикла, определения рабочих характеристик на этапе проектирования до изготовления опытных образцов и их испытаний, оптимизации этих характеристик.

Расчетная часть пакетов чаще всего основана на численных методах решения дифференциальных уравнений: методе конечных элементов, конечных объемов, конечных разностей и т. д. Это обусловлено тем, что расчетные системы, построенные на основе численных методов, в отличие от аналитических, практически не зависят от геометрической конфигурации анализируемого изделия.

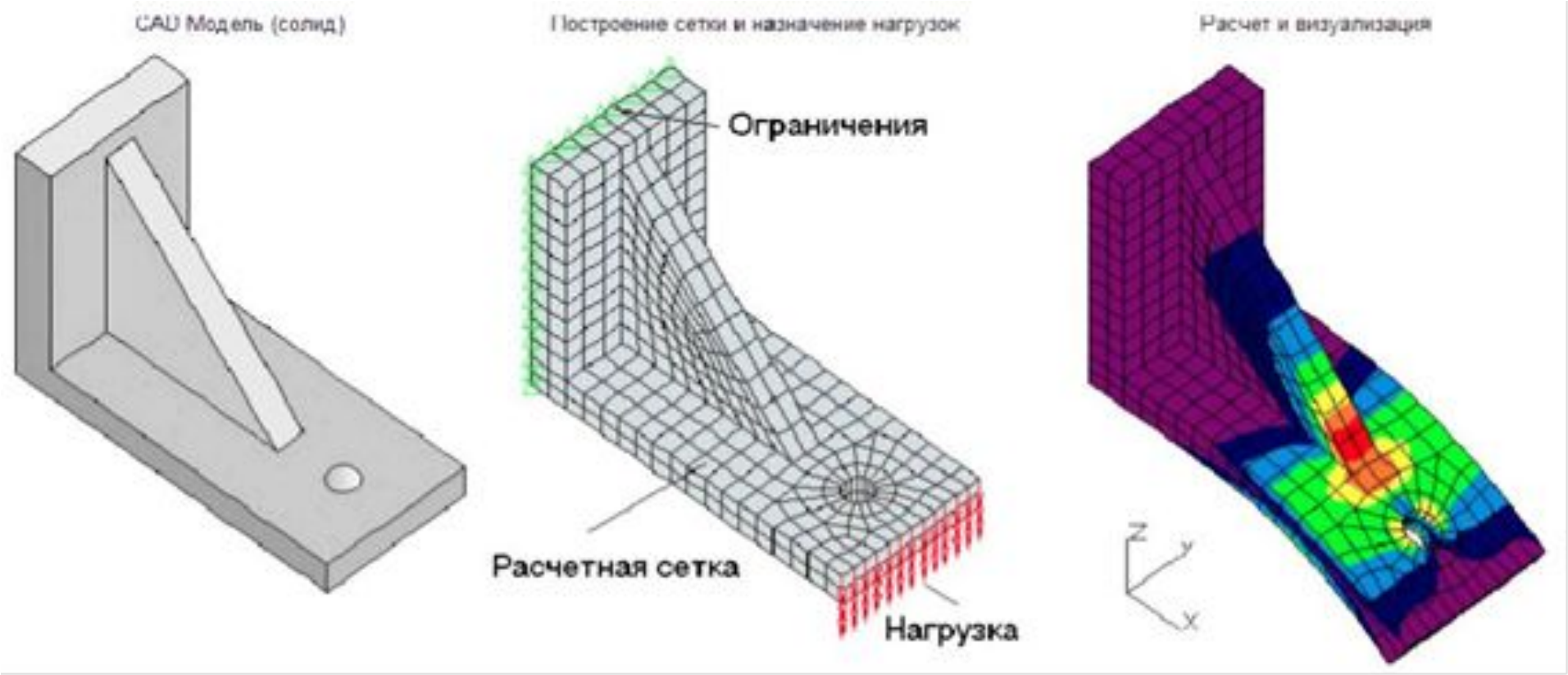
Отдельно стоит выделить системы симуляции и моделирования сложных технологических процессов, таких как литье металлов и пластмасс, штамповка, химическое фрезерование и т. д. Особенностью подобных расчетов является совместное решение задач, описывающих различные физические процессы - гидродинамические течения, отверждение, теплоперенос, химические реакции

Наряду с расчетом конструкций компьютерное моделирование и симуляция могут использоваться и для оптимизации проектов. Оптимизацию можно проводить для задач статики, устойчивости, установившихся и неустановившихся динамических переходных процессов, собственных частот и форм колебаний, акустики и аэроупругости. Все это делается одновременно, путем вариации параметров формы, размеров и других свойств проектируемого изделия. Эффективные алгоритмы оптимизации обрабатывают любое количество проектных параметров и ограничений. Вес, напряжения, перемещения, собственные частоты и многие другие характеристики могут рассматриваться либо в качестве целевых функций проекта (в этом случае их можно минимизировать или максимизировать), либо в качестве ограничений. Алгоритмы анализа чувствительности позволяют исследовать влияние различных параметров на поведение целевой функции и управлять процессом поиска оптимального решения. Кроме того, компьютерное моделирование применяется для планирования экспериментов (определение мест расположения датчиков) и оценки полноты полученных экспериментальных данных. Таким образом, численное моделирование задач прочности существенно экономит время, ресурсы, позволяет сократить объемы натурных испытаний, а также более тщательно оптимизировать конструкции.

# Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ, Finite Elements Method, FEM) наиболее распространенный численный метод решения задач прикладной механики, в первую очередь прочностных расчетов, механики деформируемого твердого тела, теплообмена. Суть метода заключается в том, что расчетная область разбивается на плоские или объемные, в зависимости от решаемой задачи, подобласти с элементарной геометрией (чаще всего методом триангуляции), для которых записаны простейшие системы дифференциальных уравнений. Каждая такая подобласть является конечным элементом, имеющим свой порядковый номер. Общие вершины конечных элементов называются узлами, которые также нумеруются. Кинематические граничные условия задаются в узлах на границе. Нагрузки на границе заменяются сосредоточенными силами в узлах, связь конечных элементов между собой осуществляется также в узлах. Процесс вычисления сводится к решению полученной системы элементарных

# Схема перехода от твердотельной модели к




Современные системы автоматизации инженерных расчетов, как правило, применяются совместно с CAD-системами, зачастую просто интегрированы в них. Таким образом, инженер может оперативно провести проверочные расчеты непосредственно в процессе создания конструкции и при необходимости изменить ее так, чтобы удовлетворить требованиям работоспособности.

Существенным достоинством расчетных систем перед проверочными натурными испытаниями является возможность определения элементов не только с недостаточной прочностью, но и с избыточной. Это позволяет оптимизировать геометрию деталей с целью снижения их массы, что особенно критично, например, в авиакосмической отрасли, двигателестроении.

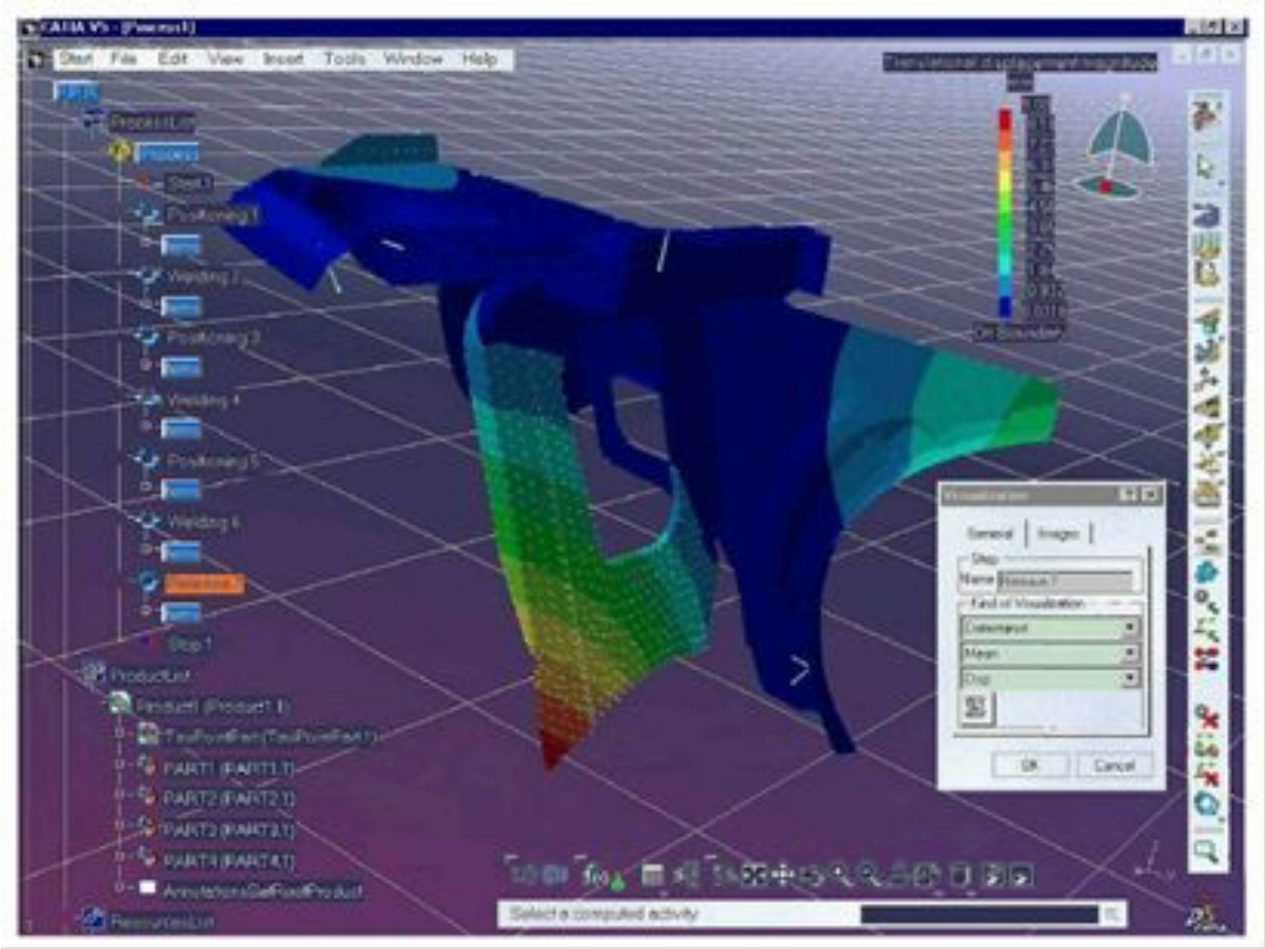
Расчетные системы позволяют «заглянуть» внутрь детали, что практически невозможно при натурных прочностных испытаниях, получить исчерпывающую картину распределения любых параметров: деформаций, напряжений, температурных полей и т. д. Что немаловажно - расчет может быть произведен не только для статического нагружения, но и в динамике, в сопряжении с кинематическим расчетом.

Современные расчетные системы обеспечивают:

- комплексный анализ характеристик конструкций, включая расчет напряженно-деформированного состояния, собственных частот и форм колебаний;
- анализ устойчивости;
- решение задач теплопередачи;
- исследование установившихся и неустановившихся процессов;
- исследование акустических явлений;
- исследование нелинейных статических процессов;
- исследование нелинейных динамических переходных процессов;
- расчет критических частот и вибраций роторных машин;
- анализ частотных характеристик при воздействии случайных нагрузок.

Предусмотрена возможность моделирования практически всех типов материалов, включая композитные и эластичные

Анализ напряженно-деформированного состояния детали в системе ANSYS



Моделирование аварийного удара автомобиля

# Моделирование кинематики

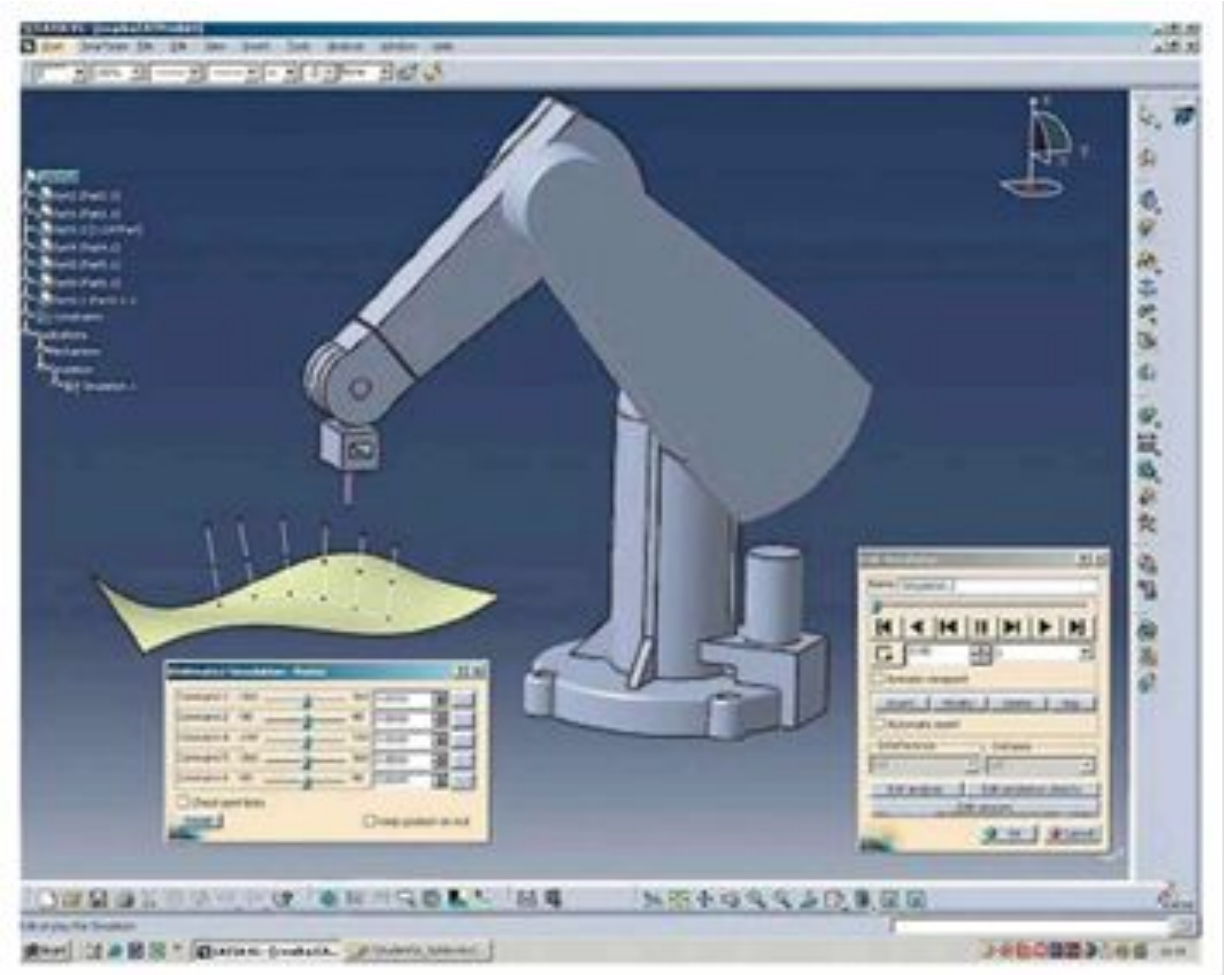
Пространственные механизмы являются важной составляющей современной техники и производственных технологий, например шасси самолетов и автомобилей, механизация крыла и механизмы управления самолетов, промышленные роботы-манипуляторы последовательной и параллельной структуры, стрелковое оружие, бытовая техника и т. д.

Так как конструирование сложных механизмов осуществляется с использованием MCAD-систем, то логичным стало использование полученных геометрических моделей для моделирования и анализа их движения. Проектирование кинематики отличается высокой геометрической сложностью и в существенной степени определяет качество конечного продукта, стоимость его изготовления и эксплуатации.

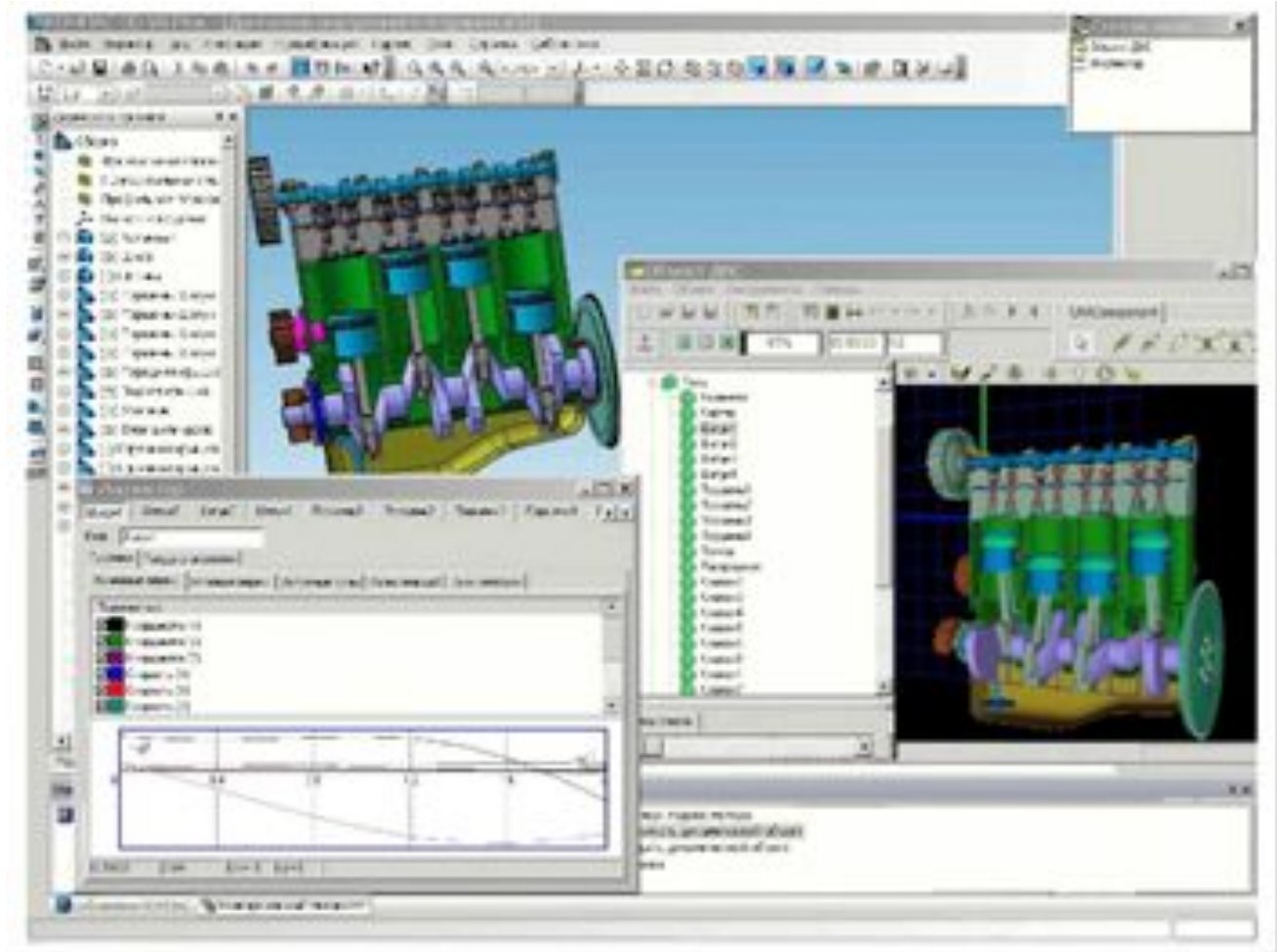
В 70-80-е годы, в период активного развития рабочих станций и их применения для проектирования изделий машиностроения, появились первые системы для динамического и кинематического анализа пространственных механизмов, такие как ADAMS, ANSYS Mechanical, COSMOS Motion и др. К настоящему времени эти системы получили признание специалистов и вошли в повседневную практику работы сотен тысяч инженеров.

Инженерные системы моделирования кинематики обеспечивают возможность решения как **прямых**, так и **обратных** задач. Прямая задача заключается в том, чтобы по известным усилиям и другим характеристикам приводов (пневмо- и гидроцилиндров, электродвигателей и т. п.) определить скорости и траектории движения всех элементов, составляющих механизм. При решении обратной (часто употребляется термин инверсная) задачи - напротив: по известной или заданной траектории и скорости перемещения одного из звеньев (как правило, конечного) требуется определить траектории остальных звеньев, силы, действующие на них, и, соответственно, требуемые силовые и скоростные

Моделирование прямой задачи кинематики в CATIA



Решение обратной задачи кинематики в КОМПАС 3D



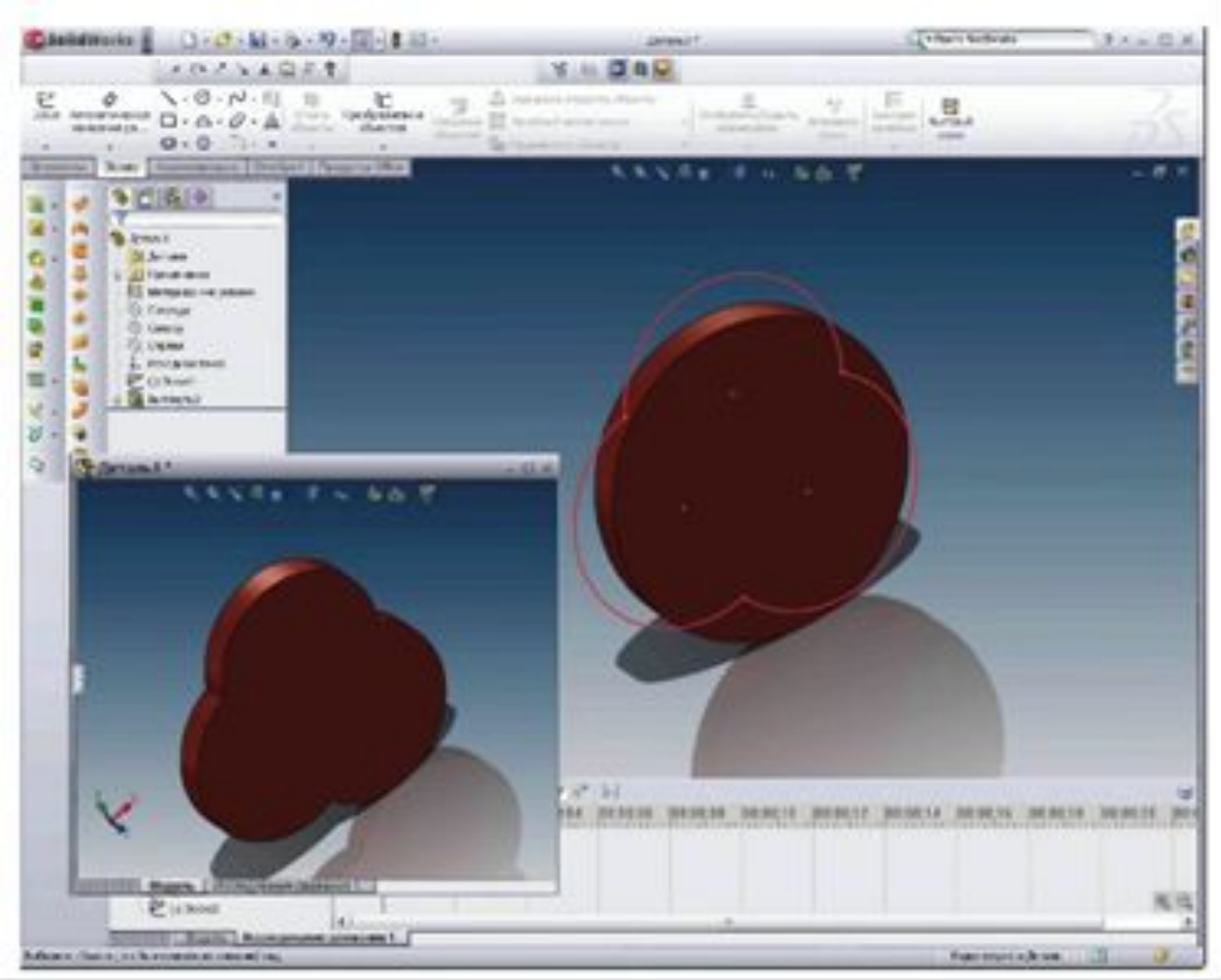
Еще одной важной задачей, решаемой в кинематических расчетных системах, является **определение работоспособности механизмов**:

- отсутствие заклиниваний;
- предупреждение нежелательных касаний и столкновений элементов механизма;
- вписывание механизма в заданные габариты.

И наконец, моделирование кинематики обеспечивает решение задач не только анализа механизмов, но и их **синтеза**. По заданной траектории и циклограмме работы механизма можно рассчитать форму кулачков, направляющих, требуемые размеры звеньев рычажных механизмов, параметры зубчатых колес и т. п.

Результаты таких вычислений могут быть использованы как эскизы для построения твердотельных моделей деталей с наперед заданной точностью.

Построение геометрии кулачка по заданной траектории в COSMOS Motion



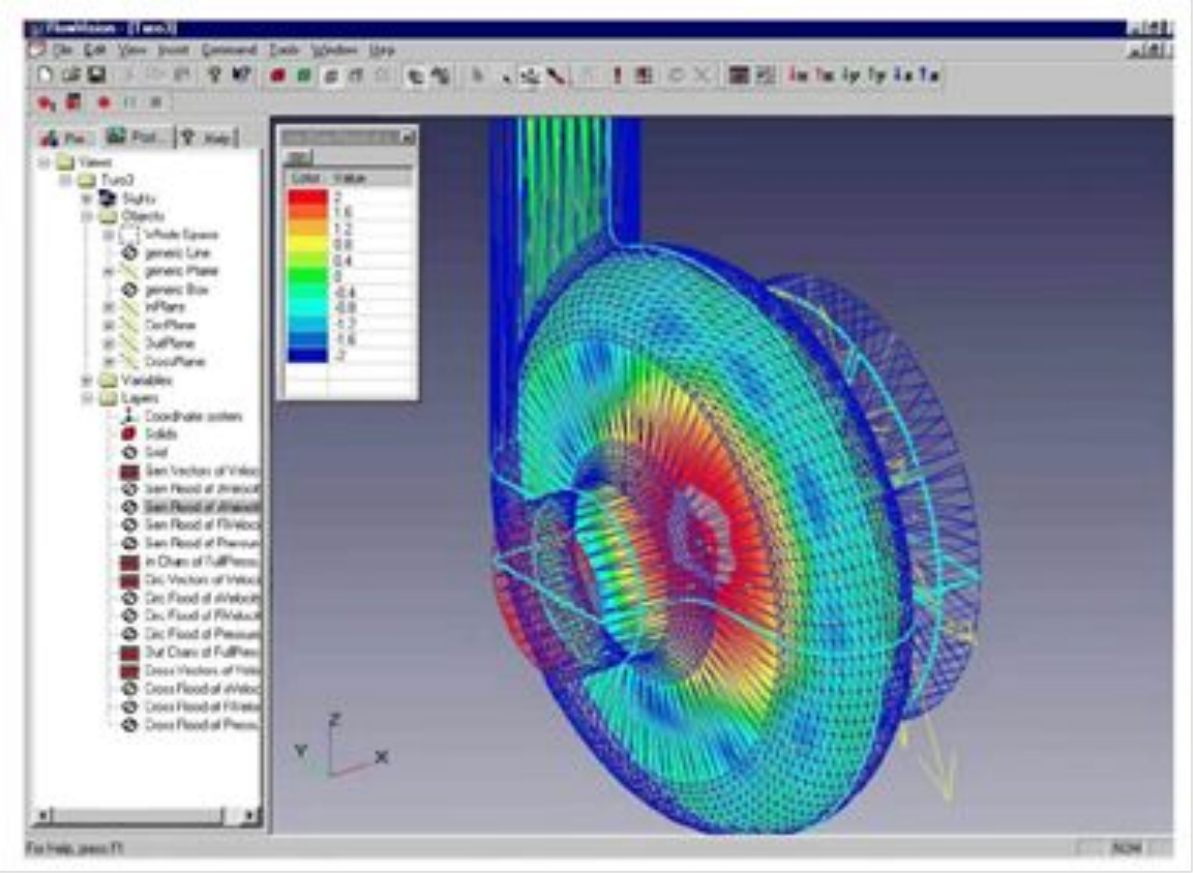
# Аэрогидродинамические расчеты

Вычислительная гидрогазодинамика (CFD, Computational Fluid Dynamics) широко при-меняется как в традиционных для нее отраслях: авиации, судостроении, проектировании автомобилей, - так и при создании бытовой техники, полиграфического и медицинского оборудования и т. п.

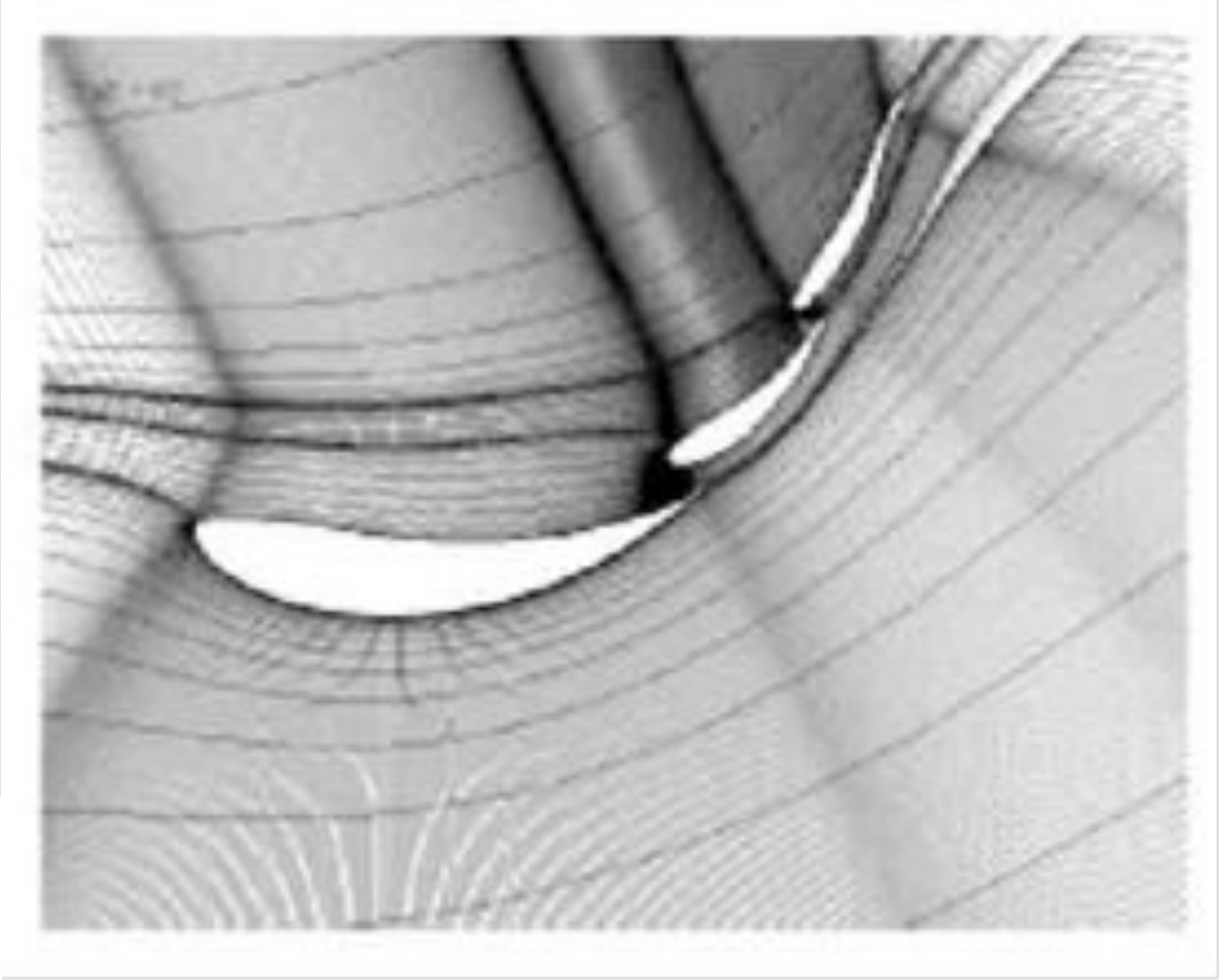
Расчеты осуществляются с использованием численных методов и алгоритмов для решения и анализа задач течений жидкостей и газов, как правило, состоящих в решении уравнений Навье-Стокса методами конечных объемов, конечных элементов, конечных разностей и др. Современные программные комплексы для моделирования течений в жидкости и газах позволяют рассчитывать широкий диапазон течений по числу Маха, многофазные и много-компонентные течения, течения в несжимаемых жидкостях.

При рассмотрении актуальных промышленных задач расчетная модель должна обеспечивать точную передачу геометрии без упрощений, характерных для задач расчета напряженно-деформированного состояния.

## Расчет течения в вихревом насосе



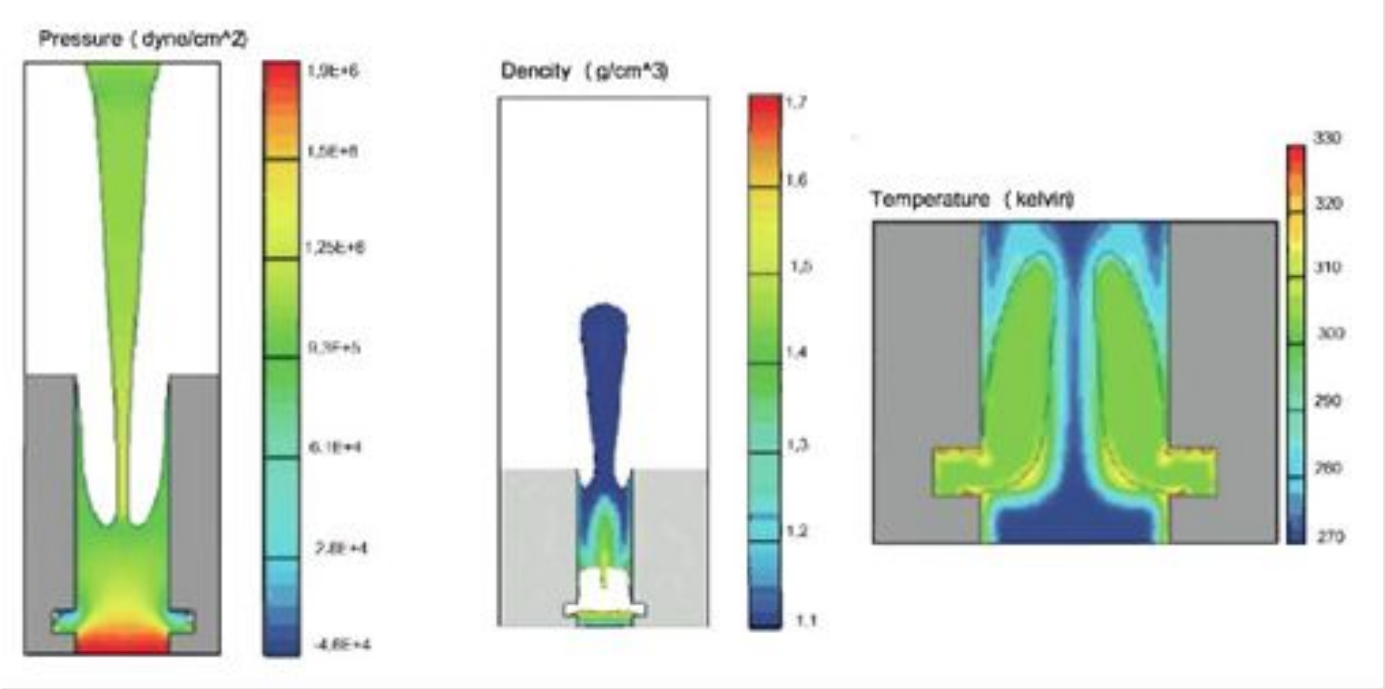
## Расчетная сетка для моделирования обтекания антикрыла гоночного автомобиля



В ряде случаев даже наличие геометрической симметрии в модели не позволяет рассматривать половину модели ввиду несимметричности течения. Это приводит к серьезному увеличению размерности и увеличению времени счета. Характерные размерности для задач внешнего обтекания могут быть до 50 млн элементов и более, в зависимости от детализированности геометрии и примененных расчетных моделей.

Первоначально вычислительная гидроаэродинамика использовалась применительно к задачам проектирования авиационной, космической техники и судостроения. С развитием программных средств и повышением производительности настольных ПК она находит все более широкое применение и в других отраслях. Некоторые, ставшие привычными продукты было бы очень трудно спроектировать без ее использования, например струйные принтеры. Использование CFD при проектировании струйных принтеров оправдано и дает ряд преимуществ для изучения того, как форма, размер и скорость испускаемой капли зависят от таких параметров, как импульс управляющего давления, форма форсунки, коэффициент поверхностного натяжения, и многое другое.

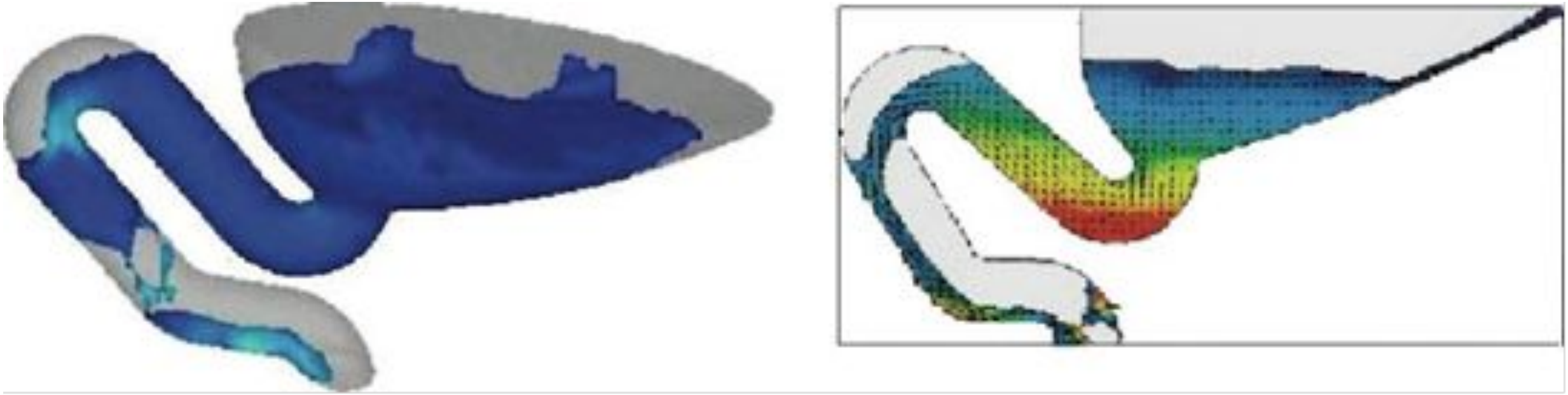
**Моделирование образования капли в струйном**



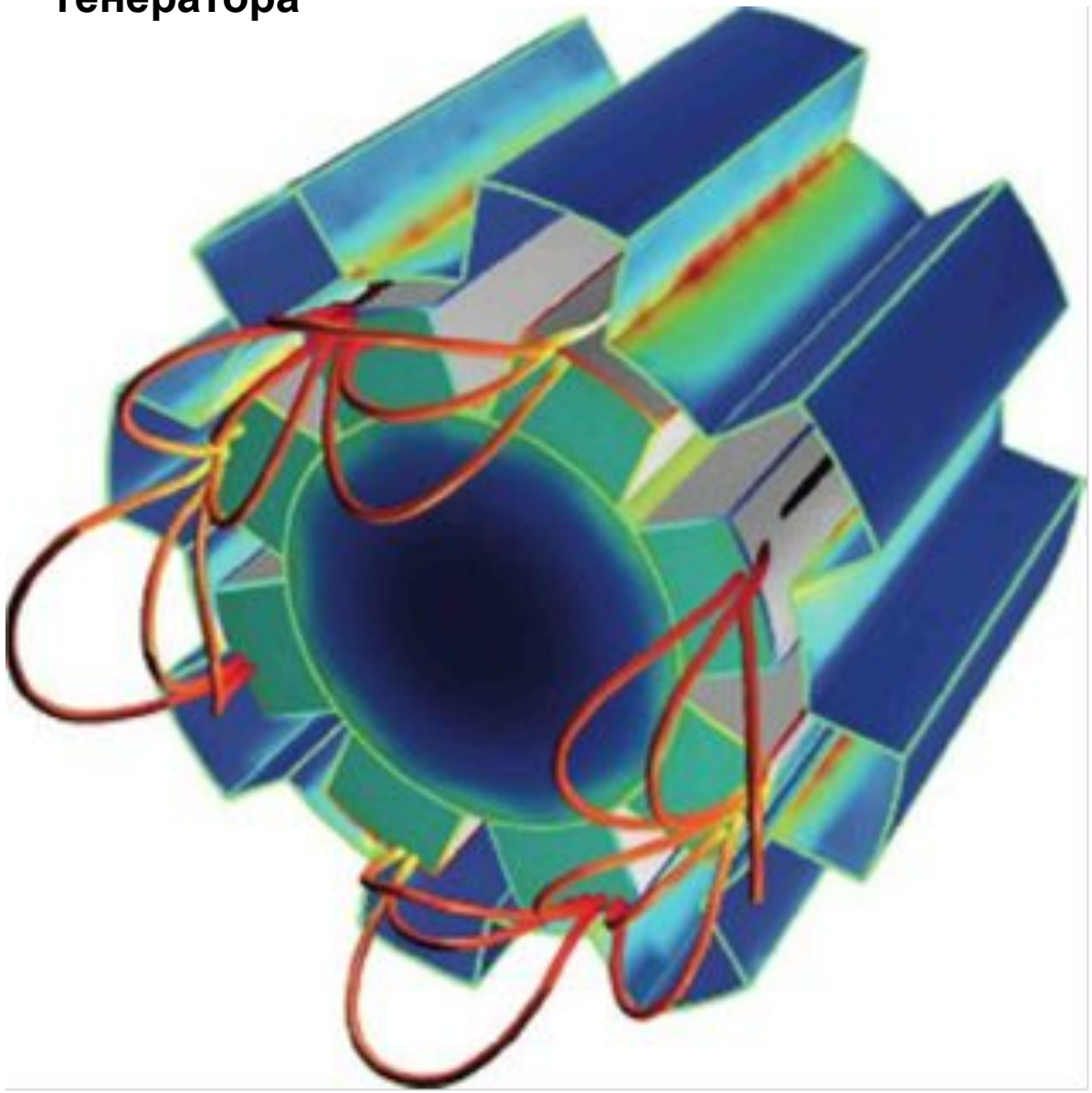
Другим примером использования CFD для создания бытовых продуктов можно назвать моделирование течений в водопроводных и канализационных системах. Одним из сложных для расчета объектов является обычный унитаз.

Вычислительная аэродинамика сегодня широко используется для проектирования систем вентиляции электроаппаратуры и помещений, оценки нагрузок на жилые и промышленные здания, мосты, гидротехнические сооружения и др.

**Моделирование течений со свободной поверхностью при сливе воды в унитазе**



# Электростатика и электродинамика

В связи с массовым внедрением электронных устройств в состав практически любых изделий машиностроения, от сложной авиационной техники до бытовых приборов, задача моделирования электромагнитных полей, создаваемых этими устройствами, их взаимодействия между собой и влияния на окружающую среду стала как никогда актуальной. Поэтому большинство поставщиков интегрированных CAE-систем предлагают специализированные модули для 3Б-моделирования работы электромагнитных и электромеханических изделий в низкочастотном приближении. Расчеты проводятся, как правило, методом конечных элементов, позволяющим решать уравнения прямым методом без каких-либо упрощений и предположений. Модули рассчитывают электрические и магнитные поля, моменты и силы, энергетические потери на вихревые токи, значения токов, напряжений, проводимостей, емкостей, индуктивностей в проектируемых электротехнических изделиях, расчет импульсных электро-магнитных полей, возникающих в электрических устройствах при

**Расчет электромагнитных полей для якоря генератора**