

ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА КОМПАНИИ НТЦ «АПМ»

1. Мультифизическое моделирование

Отечественная система CAE анализа APM Multiphysics является объединяющим инструментом для моделирования процессов различной физической природы. Мультифизическое моделирование компании НТЦ «АПМ» включает программные продукты, полученные сложением разных по характеру и по назначению расчетных систем, предназначенных для самостоятельного использования и для решения совокупности смешанных задач.

Перечень программных продуктов, входящих APM Multiphysics:

- Решение проблем динамики, прочности и устойчивости широкого класса упругих механических систем - APM StructFEM, APM WinMachine.
- APM FEM - анализ прочности для графической среды Компас-3D.
- Определение механических характеристик с использованием отечественных нормативных документов APM Mechanic.
- Моделирование и анализ течений жидких и газообразных сред - APM FGA.
- Моделирование и анализ электромагнитных полей и волн - APM EMA.
- Формирование расчет и анализ электрических цепей - APM ECA.
- Расчет и проектирование объектов промышленного и гражданского строительства - APM Civil Engineering.

2. Полнофункциональные возможности прочностного анализа

Анализ прочности выполняют продукты инженерного анализа, сформированные на базе расчетного ядра APM Structure3D. Это системы:

APM WinMachine - для расчета машин, механизмов отдельных деталей и узлов, а также механических конструкций в целом;

APM StructFEM - для анализа динамики и прочности механического оборудования общего назначения;

APM Civil Engineering - для объектов промышленного и гражданского строительства;

APM FEM для Компас-3D - для экспресс анализа прочности (приложение прочностного анализа в среде графического редактора Компас-3D).

Все, перечисленные выше системы дополнены необходимыми инструментами для выполнения полного цикла работ с использованием единой платформы, которая помимо расчетного ядра включает графические средства, средства обмена графическими и числовыми данными, инструменты для генерации конечно-элементных сеток, пре- и пост процессорные средства.

2.1. Линейные решения прочностного анализа

- Расчет напряженно-деформированного состояния (статический расчет). Определение коэффициента запаса статической прочности и жесткости.
- Расчет устойчивости для одного либо нескольких нагружений, определение коэффициентов запаса устойчивости и форм потери устойчивости.
- Расчет усталостной прочности под действием циклической внешней нагрузки при постоянном и переменном режимах нагружения.
- Прогнозирование усталостной прочности при переменном и случайном характере внешнего нагружения.

2.2. Нелинейные решения

- Расчет напряженно-деформированного состояния с учетом геометрической, физической и общей нелинейности.
- Расчет напряженно-деформированного состояния для случая контактного взаимодействия твердотельных и оболочечного моделей без трения, при наличии трения и проскальзывания и в случае склеенного контакта.
- Расчет больших деформаций и напряжений высоко-нелинейных механических объектов с учетом геометрической и физической нелинейности при наличии кинематического либо изотропного упрочнения.
- Анализ напряженно-деформированного состояния гиперупругих элементов, имеющих линейные и нелинейные упругие характеристики (резина, пластмассы, и другие).
- Моделирование вязкоупругих материалов, анализ ползучести.
- Решение задач анализа трещиностойкости средствами механики разрушения, а также с использованием метода конечных элементов (FEM) и XFEM метода, в линейной и нелинейной постановках (моделирование трещин и оценка параметров их не разрушения).

- Прогнозирование трещиностойкости при переменном характере внешнего воздействия, включая гармоническое, блочное, стохастическое (случайное), а также моделирование процедур “рождения” и “смерти” конечного элемента. Решение задач синтеза при трещиностойкости.

2.3. Динамический анализ

- Определение частот, форм и модальных масс собственных колебаний механических систем, в том числе с предварительным нагружением (модальный анализ).
- Расчет вынужденных колебаний моделированием реакции системы при заданном законе изменения вынуждающей нагрузки. Моделирование переходных процессов. Расчет вибрации оснований.
- Гармонический анализ с учетом предварительного нагружения, демпфирующих свойств, внутреннего трения для силового, кинематического и динамического воздействий.
- Спектральный анализ динамики сложных механических систем при стохастическом внешнем нагружении (Спектральная плотность мощности). (Расчет широкополосной случайной вибрации (ШСВ)).
- Моделирование конструкций при сейсмических воздействиях.
- Моделирование быстroteкущих динамических процессов (ударные взаимодействия) и анализ контактных перемещений и напряжений при ударе.

2.4. Структурный анализ

Под структурным, в данном контексте, понимается статический анализ твердых деформированных тел и анализ переходных процессов в квазистационарной и нестационарных постановках. Расчеты выполняются с учетом множества возможных нелинейных «эффектов» в одном расчете и в идеологии учета “истории нагружения”. Под “историей нагружения”, при наличии нелинейно деформированных материалов, понимается учет порядка приложения нагрузки, в результате чего напряженно деформированного рассматриваемых объектов различно и зависит от такого характера внешнего нагружения.

Из числа нелинейных эффектов структурный анализ позволяет учесть:

- ✓ Контактное взаимодействие.
- ✓ Пластичность в твердотельных элементах.

- ✓ Гиперупругость в твердотельных элементах.
- ✓ Наличие и учет больших перемещений и деформаций в твердотельных элементах.
- ✓ Наличие только больших перемещений в оболочках.
- ✓ Наличие только больших перемещений в стержнях.
- ✓ Наличие односторонних опор.
- ✓ Наличие одномерных элементов, работающих только на растяжение или сжатие. Инструмент универсальный и поддерживает работу как в режиме только «растяжение» только сжатие, так и в режиме «растяжение» / «сжатие» с разными характеристиками жесткости (в таком варианте возможно моделирование сильфонов)
- ✓ Возможность расчета вариантов нагружения с историей.

Расчеты выполняются для материалов изотропных, упругопластичных с возможностью изотропного, билинейного, мультилинейного и нелинейного упрочнения, а также без упрочнения. Материалы дополнены моделью гиперупругого материала: сжимаемая модель «нео-гуковского» типа.

2.5 Выбор структуры и геометрических параметров композиционных материалов,

Анализ параметров композиционных материалов и прогнозирование их свойств в зависимости от механических и конструктивных характеристик составляющих композита. Решаемые задачи:

- Расчет напряженно-деформированного состояния в статике.
- Расчет устойчивости.
- Определение частот собственных колебаний, собственных форм и модальных масс.
- Расчет стационарной и нестационарной теплопроводности и термопрочности.
- Расчет напряженно-деформированного состояния при смешанных и силовых и температурных нагрузках.
- Расчет температурных и упругих макросвойств монослоя по характеристикам армирующих волокон и связующих материалов.
- Прогнозирование послойного разрушения армирующих волокон ламината по критериям типа Цая-Хилла.

- Послойный анализ напряженно деформированного состояния ламинатных слоев.
- Прогнозирование топологии композиционного материала исходя из (Параметрическая оптимизация композита).

2.6 Параметрическая оптимизация свойств механических объектов с целью улучшения их выходных параметров, заданных целевыми функциями, и удовлетворяющих имеющимся ограничениям.

- Варьируемые параметры:
 - ✓ Толщина пластин.
 - ✓ Жесткость конструктивных элементов и упругих связей.
 - ✓ Сечение стержней.
 - ✓ Параметры материалов.
 - ✓ Параметры контактных зон: нормальная и тангенциальная жесткости.
- Целевые функции и ограничения формируются пользователем на базе варьируемых параметров и результатов расчетов:
 - ✓ Линейного статического (мин\макс напряжение, компоненты перемещений и т.д.
 - ✓ Устойчивости (коэффициенты потери устойчивости).
 - ✓ Гармонического анализа.

2.7 Прогнозирование оптимальной топологии деталей и узлов

Определение формы детали исходя из критериев топологической оптимизации.

- Топологическая оптимизация, реализована для целевых функций, таких как:
 - ✓ Объем/масса.
 - ✓ Общая энергия деформации.
 - ✓ Проекция перемещения узла на направление.
 - ✓ Напряжение в элементе(SVM.)
 - ✓ Напряжение в группе элементов(SVM).
 - ✓ Реакции в опоре.
 - ✓ Собственные частоты.
 - ✓ Устойчивость.

- ✓ Возможные комбинации.
- При наличии конструктивных ограничений, таких как:
 - ✓ Реакции опор.
 - ✓ Параметры устойчивости.
 - ✓ Величины собственных частот и д.р.
- При наличии технологических ограничений, таких как:
 - ✓ Минимальная толщина.
 - ✓ Максимальная толщины.
 - ✓ Условие симметрии оптимизируемой детали.
 - ✓ Возможность получение детали штамповкой.
 - ✓ Возможность получение детали экструзией.
 - ✓ Возможность реализации 3D-печати.

3. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА

Тепловой анализ предназначен для расчета температурных полей в твердых телах и потоках жидкостей и газов с известным распределением температур.

3.1. Анализ стационарной теплопроводности

В стационарной постановке производится расчет температурных полей в установившемся режиме, то есть без изменения во времени температур и тепловых потоков. Анализ выполняется в линейной или нелинейной постановке в зависимости от заданных материалов и приложенных нагрузок.

3.2. Анализ нестационарной теплопроводности

В нестационарной постановке производится расчет переходных процессов температурных полей. Анализ выполняется в линейной или нелинейной постановке в зависимости от заданных материалов и приложенных нагрузок. Возможно моделирование таких технологических процессов как сварка.

4. ПРЕ- И ПОСТПРОЦЕССОРНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕХАНИКИ ТВЕРДОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО ТЕЛА

4.1. Типы конечных и конструктивных элементов (для создания расчетных моделей)

- ✓ Стержневые произвольных поперечных сечений, включая тонкостенные.
- ✓ Гибкие элементы односторонней и двусторонней жесткости: канаты, тросы, ванты и т.д.
- ✓ Оболочечные и пластинчатые: первого порядка 3-х, 4-х, а также второго 6-ти и 8-ми узловые.
- ✓ Твердотельные объемные: первого порядка (4-х, 5-и, 6-и, 8-ми) и высших порядков (10-ти, 13-ти, 15-ти, 20-ти узловые).
- ✓ Трубчатые прямолинейные, криволинейные и т-образные.
- ✓ Конструктивные элементы, состоящие из произвольных комбинаций стержней, твердотельных элементов, оболочек и гибких элементов.
- ✓ Специальные элементы: упругие связи, упругие опоры односторонней и двусторонней жесткости, контактные элементы, жесткий элемент, деформируемый элемент, уравнение связи, коннекторы, сосредоточенные массы, моменты инерции и т.д.
- ✓ Суперэлементы метода подконструкций.

4.2. Типы материалов и их характеристики

4.2.1 Модели материалов

- Изотропные.
- Ортотропные.
- Анизотропные.
- Многослойные. Ламинаты.
- Композиционные.
- Тонкостенные с наполнителем и без.
- Грунтовые.
- Вязкоупругие.
- Гиперупругие.
- Железобетонные.
- Материалы, механические характеристики которых зависят от температуры, которая может быть задана аналитически, таблично, либо в виде графика.

4.2.2 Механические характеристики материалов:

- Линейные.
- Кусочно-линейные.

- Нелинейные.
- Пользовательские.
- Абсолютно-жесткие.

4.3. Доступные типы граничных условий

- Абсолютно жесткие опоры и опоры с частично освобожденными связями.
- Упругие опоры с двунаправленными связями.
- Упругие опоры с однонаправленными связями.
- Упругие опоры с затуханием.
- Жесткие соединения элементов, шарнирные соединения с частично освобожденными связями и соединения эксцентрично зафиксированных элементов (соединения со смещением).
- Опоры с заданными линейными и угловыми значениями возможных перемещений (кинематические нагруженные опоры).
- Контактные элементы.
- Сосредоточенные массы и моменты инерции.
- Элементы соединительных устройств (коннекторы): жесткий элемент, деформируемый элемент, уравнение связи.
- Удаленные опоры.
- Коннекторы компенсаторные (сильфоны).

4.4. Нагрузки и воздействия

Силовое воздействие

- Сосредоточенные силы и моменты (постоянные и переменные во времени).
- Силовые факторы переменные во времени, импульсные и ударные.
- Подвижные нагрузки (Линии влияния).
- Нагрузки, распределенные по длине, площади и объему нагрузки (постоянные, переменные зависящие от координат и переменные во времени).
- Нагрузки, заданные линейным и/или угловым перемещением (постоянные и переменные во времени).
- Снеговые, ветровые (с учетом пульсационной ветровой составляющей), а также сейсмические нагрузки (по СНиП), с учетом распределенных и сосредоточенных масс, линейных и вращательных степеней свободы. Имеется

возможность моделирования ветровой нагрузки моделированием обдува ветровым потоком объекта исследования.

- Давление гидростатического типа.
- Давление контактного типа.
- Расчетные сочетания усилий (РСУ).
- Центробежные (заданные линейным и/или угловыми скоростями, либо линейными или угловыми ускорениями).
- Гравитационные.
- Удаленные силовые факторы, кинематические и инерционные.

Тепловое воздействие

- Температуры локальных участков.
- Тепловые потоки.
- Параметры конвекционного теплообмена.
- Параметры теплоизлучения (радиации).

4.5. Критерии прочности (теории предельных состояний)

- Наибольших нормальных напряжений.
- Наибольших относительных деформаций.
- Наибольших касательных напряжений.
- Мизеса.
- Кулона – Мора.
- Друкера – Прагера.
- И другие.

4.6. Результаты расчетов

- Числовые параметры выводимых значений, которые представляются в форме отдельных записей, таблиц, и графиков.
- Карты и эпюры главных напряжений, компонентных напряжений по произвольным площадкам и эквивалентным напряжениям.
- Изолинии и изоповерхности выходных параметров.
- Карты и эпюры линейных, угловых и суммарных перемещений.
- Карты и эпюры распределения деформаций по элементам конструкции.
- Карты и эпюры распределения внутренних усилий.

- Карта распределения усилий в контактной зоне.
- Коэффициенты запаса и формы потери устойчивости.
- Карта распределения коэффициентов запаса и числа циклов по критерию усталостной прочности.
- Карта распределения коэффициентов запаса по текучести и прочности.
- Карта распределения накопленной в единице объема внутренней энергии деформации.
- Координаты центра тяжести, вес, объем, длина, площадь поверхности, моменты инерции модели конструкции.
- Моменты инерции, статические моменты и площади поперечных сечений.
- Реакции в опорах и суммарные реакции, приведенные к центру тяжести модели.
- Силовые факторы в узлах конечных элементов.
- Анимационное представление полученных результатов.

Карты распределения доступны как по поверхности, так и в сечении стержневых и объемных элементов.

5. Комплексное программное обеспечение для решения задач динамики и прочности при конструировании различных объектов

5.1 ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ В СРЕДЕ КОМПАС-3D

Для проведения прочностного экспресс-анализа твердотельных и оболочечных моделей деталей и сборок создан программный продукт **APM FEM** для **КОМПАС-3D**. В **APM FEM** для **Компас-3D** работа по подготовке моделей к расчету, сам расчет и визуализация его результатов выполняется в приложении по анализу динамики и прочности в среде **Компас-3D**. Сами расчеты прочности выполняются с использованием расчетного ядра (**APM Structure3D**) компании НТЦ «АПИМ», а результаты расчетов, скорости получаемых решений, точности вычислений едины и не зависят от инструмента, в котором они выполнены. Среда разработки, кроме описанных ранее процедур, имеет удобные средства обмена графической и числовой информацией, а также генератор конечно-элементной сетки с постоянным и адаптивными шагами, с инструментами ввода силовых, кинематических, тепловых и иных параметров.

В этом приложении выполняются процедуры задания граничных условий таких как: типы опор, возможные варианты контактные взаимодействия деталей при сборке, наличие коннекторов различных типов и наличие других ограничений.

Этот функциональный набор позволяет комплексно проанализировать поведение расчётной модели при различных внешних воздействиях. В этой среде выполняется статический, динамический и другие типы анализов.

К **линейным** относятся расчеты:

- Напряженно-деформированного состояния (статический расчет).
- Устойчивости.
- Расчет усталостной прочности для постоянных и переменных режимах нагружения.
- Термоупругости, термочности и стационарной теплопроводности.

Динамический анализ:

- Определение частот и форм собственных колебаний, в том числе для моделей с предварительным нагружением.

Опционно, посредством этого приложения, можно определить оптимальную топологию детали по различным критериям оптимальности. Подробнее процедура топологической оптимизации представлена ранее. С использованием оптимальной топологии можно значительно улучшить конструкционные, энергетические, эксплуатационные и другие характеристики создаваемых машин, всевозможных конструкций другого механического оборудования. Оптимизация это мировой тренд современного проектирования,

Постпроцессорное представление результатов вычислений **APM FEM** для **КОМПАС-3D** оформлено по аналогии другими нашими программными продуктами.

5.2. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ

Динамический анализ механических систем выполняется с использованием программного комплекса **APM Dynamics**.

APM Dynamics предназначен для решения задач моделирования динамики пространственных механических систем методом конечных элементов (МКЭ).

Геометрия элементов механических систем создается с помощью современного графического 3D редактора, в котором имеются как инструменты геометрического

моделирования, так и средства задания граничных условий и датчиков для регистрации необходимых выходных параметров.

Формирование динамической модели выполняется в форме одно-, двух-, трех- и n-массовых систем с распределенными массами.

Для моделирования динамики неупругих механических систем разработаны новые алгоритмы, которые эффективно решаются методом разложения по собственным формам, и которые обладает следующими возможностями:

- Обеспечивают приемлемую точность выполнения расчетов.
- Позволяет решать задачи большой размерности.
- Сокращает время расчета для достижения соответствующей точности по сравнению с известным методом таким как метод прямого интегрирования.

Предложенные численные подходы позволили удовлетворительно описать кинематику и все многообразие переходных процессов для механизмов произвольной формы при произвольных силовых и кинематических воздействиях.

5.3. ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, МЕХАНИЗМОВ и ПРИБОРОВ (APM Mechanic)

APM Mechanic позволяет выполнять необходимую совокупность расчетов для комплексного анализа и синтеза деталей и узлов машин без применения процедур приближенного численного анализа. Поскольку процедуры расчета и проектирования оперируют большим количеством стандартных параметров, при создании комплекса программ инженерного анализа компании НТЦ «АПМ» использованы данные национальных стандартов.

Комплекс состоит из набора специализированных программ.

С помощью APM Mechanic можно выполнить:

- Проектировочный и проверочный расчет соединений (модуль APM Joint):
 - ✓ сварных различных типов;
 - ✓ групповых резьбовых соединений для всех возможных типов нагружений;
 - ✓ заклепочных;
 - ✓ соединений деталей вращения с натягом, шлицевых, шпоночных и т.п.
- Проектировочный и проверочный расчет механических передач вращения с получением полной геометрии передачи, определением допусков

и параметров контроля (модуль APM Trans). Расчет выполняются для передач вращения следующих типов:

- ✓ цилиндрических зубчатых наружного и внутреннего зацеплений;
 - ✓ конических передач с прямым и круговым зубом;
 - ✓ червячных различных модификаций;
 - ✓ ременных различных типов;
 - ✓ цепных.
- Проверочный расчет валов и осей (статический и усталостный расчеты, расчет динамических характеристик вала) с последующей визуализацией результатов в виде графиков и таблиц и автоматической генерацией чертежа спроектированного вала (APM Shaft).
 - Проектирование подшипниковых узлов качения (модуль APM Bear) и скольжения (модуль APM Plain) с определением основных параметров работы. Жесткость подшипников и их узлов рассчитывается исходя из погрешностей изготовления элементов подшипника, по методикам, разработанным специалистами НТЦ «АПИМ» и не имеющим мировых аналогов. Кроме жесткости и контактной прочности в ходе расчета определяются и другие параметры подшипника, связанные с его деформационным состоянием.
 - Проектирование привода вращательного движения произвольной структуры, включающего передачи с неподвижными осями (цилиндрические, конические, червячные, ременные и цепные) и планетарные передачи различных типов (модуль APM Drive).
 - Проектировочный и проверочный расчет упругих элементов машин с последующей автоматической генерацией чертежей упругих элементов (модуль APM Spring).
 - Проверочный расчет передач поступательного движения (винтовые передачи скольжения, шариковые винтовые и планетарно–винтовые (ролико–винтовые) передачи). Расчет шариковых винтовых передач и планетарно–винтовых передач выполняются по методикам, разработанным в компании НТЦ «АПИМ» и не имеющим мировых аналогов (модуль APM Screw).
 - Проектировочный расчет и проектирование кулачковых механизмов с поступательным или коромысловым толкателями при произвольном законе изменения перемещений, скоростей и ускорений толкателя, с автоматической генерацией чертежей кулачкового профиля (модуль APM Cam).

5.4 СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА (APM StructFEM)

Графическое представление в этом продукте может быть выполнено либо в среде графического 3D редактора APM Studio, либо в графической части расчетного ядра APM Structure3D. Эти инструменты эффективно используются для моделирования и последующего расчета физических процессов различного назначения.

Ниже дано краткое описание возможностей **APM StructFEM** применительно к задачам динамики и прочности твердых деформированных тел. В редакторе **APM Studio** подготовка моделей к расчету выполняется на геометрическом уровне, а в случае использования графической среды ядра редактора **APM Structure3D** на уровне конечных элементов. Такая идеология характерна и для других задач мультифизического анализа.

В этой идеологии эффективно решаются смешанные задачи различной физической природы.

При подготовке графической информации реализован также экспорт и импорт геометрических моделей.

Процедура генерации сетки выполняется в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Подготовка препроцессорной информации включает инструменты задания материалов с характерными свойствами и параметрами, а также граничных и начальных условий. Постпроцессорное обеспечение включает визуализацию результатов анализа в виде контурных и векторных статических карт, а также в виде анимации скалярных и векторных полей характеристик, с возможностью формирования текстовых документов в виде экспресс отчетов (более подробно 3.6).

С использованием расчетного ядра **APM Structure3D** можно выполнить расчеты динамики и прочности, перечисленные в разделе 2.1. -2.5.

Реализована поддержка твердотельной и поверхностной геометрии, стержневых моделей, а также сборок на их основе.

5.5. СИСТЕМА РАЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ (APM WinMachine)

Компьютерная среда, объединяющая программные продукты для расчета динамики, прочности машин, механизмов, узлов, а также всевозможных конструкций любого назначения – это APM WinMachine. Для решения всей совокупности проблем

машиностроения в состав APM WinMachine входит: APM StructFEM, APM Mechanic, APM Dynamics. В APM WinMachine в качестве расчетно-графического трехмерного редактора используется специализированная среда APM Structure3D. Реализована также возможность экспорта и импорта сеточных моделей из сторонних расчетно-графических систем, в том числе из **APM Studio**.

Следует отметить, что для выполнения работ плоской графики, в состав APM WinMachine включен плоский параметрический графический редактор (APM Graph). Механические характеристики материалов и другие параметры необходимые для расчетов включены в состав базы данных (APM Data), доступ к которой выполняется с использованием СУБД.

Расчетные системы, для подготовки исходной информации, имеют удобный пре- и постпроцессор.

Решаемые задачи:

- Проектирование, анализ параметров механического оборудования и его элементов с использованием инженерных методик (APM Mechanic).
- Комплексный анализ напряженно-деформированного состояния и других характеристик трехмерных объектов при произвольном закреплении, статическом или динамическом нагружении (APM StructFEM).
- решение смежных (связанных) задач.
- модуль кинематического и динамического анализа механизмов APM Dynamics;

6. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Система **APM Civil Engineering** предназначена для выполнения всего комплекса вычислений, необходимых при проектировании всех без исключения строительных объектов. Основой для расчета и проектирования зданий и сооружений промышленного и гражданского строительства является их геометрические и математические (конечно-элементные) модели.

Геометрическая модель является основой для архитектурного представления объекта и для формирования чертежной документации. Основой для выполнения всей совокупности необходимых вычислений является математическая модель объекта строительства, которая выполняется в виде конечно-элементной сетки. Технологически процесс преобразования геометрической модели в математическую выполняется автоматически с помощью специального конвертера.

Расчетная модель может быть создана автономно с использованием собственного редактора **APM Civil Engineering**, либо импортом из других графических систем.

APM Civil Engineering является единой средой для формирования моделей строительного объекта, включающего металлические, железобетонные, армокаменные, деревянные, вантовые конструктивные элементы, геометрические модели оснований и фундаментов. На завершающем этапе подготовки исходных данных необходимо задать условия закреплений, параметры материалов конструктивных элементов, значения нагрузок и воздействий, с целью формирования расчетных сочетаний усилий (PCY) и другие необходимые для расчета параметры.

Конечно-элементные решения дополнены проверками, рекомендованными для строительства нормативными документами РФ.

Окончательным результатом подготовки к расчету объекта проектирования является его математическая модель, которая формируется автоматически посредством использования сеточного генератора компании НТЦ «АПМ». Сетка может быть создана на твердотельных моделях, включая сборки, на пластинчатых и оболочечных моделях, на стержневых моделях и им подобным и на объектах, полученных комбинацией перечисленных.

Заявленные выше инструменты позволяют выполнить:

- Проверочный расчет элементов металлических конструкций, либо металлоконструкции в целом, включая автоматический подбор поперечных сечений, расчет параметров их соединений, а также расчет вантовых, тросовых и других гибких конструктивных элементов.
- Расчет железобетонных конструктивных элементов с подбором арматуры.
- Проверочный и проектировочный расчеты армокаменных конструкций.
- Проверочный расчет клееных и цельнодеревянных конструкций, а также автоматический подбор их поперечных сечений и узловых креплений, включая МЗП.
- Расчет сплошных, столбчатых, ленточных и свайных фундаментов.
- Расчет напряженного и деформированного состояния анализом карт напластования методом конечных элементов и методом линейно деформируемого полупространства (согласно СП 50-101-2004).

Для решения всего комплекса проблем расчета строительных объектов в состав APM Civil Engineering включены подсистемы, которые позволяют выполнить:

- Линейный статический анализ напряженно-деформированного состояния.
- Линейный анализ устойчивости.
- Анализ температурных полей, полей термо-перемещений, термо-напряжений для случая стационарного и нестационарного тепловых режимов.

- Расчет деформаций и напряжений нелинейных механических систем для случая геометрической, физической и общей нелинейности.
- Определение частот и форм собственных колебаний, в том числе с предварительным нагружением и без (модальный анализ).
- Анализ сейсмического воздействия.
- Анализ трещиностойкости.
- Анализ усталостной прочности.
- Расчет вынужденных колебаний моделированием реакции системы в режиме реального времени при произвольном законе изменения вынуждающей нагрузки.
- Анализ ветровой нагрузки мультифизическими методами и методами рекомендованными строительными нормами.
- Расчеты соединений.

Типы конечных элементов, которые можно использовать для моделирования строительных конструкций

- ✓ Стержневые произвольных поперечных сечений, включая тонкостенные.
- ✓ Гибкие элементы односторонней и двусторонней жесткости: канаты, тросы, ванты и т.д.
- ✓ Оболочечные и пластинчатые: первого порядка 3-х узловые, 4-х узловые, а также второго 6-ти и 8-ми узловые.
- ✓ Твердотельные объемные: первого порядка (4-х, 5-и, 6-и, 8-ми) и высших порядков (10-ти, 13-ти, 15-ти, 20-ти узловые).
- ✓ Трубчатые прямолинейные, криволинейные и т-образные.
- ✓ Пластины с поперечной сдвиговой деформацией.
- ✓ Суперэлементы метода подконструкций.

Модели материалов, которые можно использовать в качестве базовых для создания строительных объектов.

- ✓ Изотропные.
- ✓ Ортотропные.
- ✓ Многослойные.
- ✓ Композиционные.
- ✓ Грунтовые.

- ✓ Железобетонные.
- ✓ Деревянные.

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Программный продукт **APM FGA** предназначен для анализа кинематических, динамических, энергетических и силовых характеристик течений жидких и газовых сред, а также количественной и качественной оценки их влияния при проектировании ряда инженерно-технических объектов, таких как: гидравлическое и пневматическое оборудование, в которых жидкость или газ выступают в качестве рабочих сред; системы нагрева, охлаждения и вентиляции, в которых жидкость или газ выступают в качестве теплоносителей; объекты, которые подвергаются воздействиям ветровых потоков и пр.

Доступны следующие **типы анализа**:

- анализ **потенциальных течений**; используется для расчета полей скоростей и давлений идеальных течений;

- анализ **фильтрации течений**; используется для расчета полей давлений и скоростей течений через ортотропную пористую среду в стационарной / нестационарной постановках;

- анализ **течений Стокса**; используется для расчета полей давлений и скоростей вязких течений в стационарной / нестационарной изотермической / термической однофазной / двухфазной постановках;

- анализ **течений Навье-Стокса**; используется для расчета полей давлений и скоростей течений в ламинарной / турбулентной изотермической / термической постановках.

Функциональные возможности **анализа течений Навье-Стокса**:

- Изотропные модели пористых сред течений.
- Модели турбулентности:
 - алгебраическая, основанная на гипотезе пути смешения Прандтля,
 - однопараметрическая модель кинетической энергии.
- Процессы теплообмена:
 - теплопроводность,
 - конвекция: адвекция, вынужденная, свободная,

- излучение.

- Сопряженный теплообмен.

- Сопряженные задачи типа одностороннего FSI (Fluid Structure Interaction) - расчет напряженно-деформированного состояния твердых тел с использованием ранее полученных результатов анализа течений (полей давлений и/или температур) в качестве нагрузок.

Поддерживаемые **типы конечных элементов** - solid элементы первого порядка:

- 4-х узловой тетраэдр,

- 5-и узловая пирамида,

- 6-и узловая призма,

- 8-и узловой гексаэдр.

Свойства:

- плотность,

- вязкость,

- удельная теплоемкость,

- теплопроводность.

Граничные и начальные условия:

- давление, начальное давление;

- скорость, начальная скорость;

- расход;

- ускорение;

- турбулентность;

- температура, начальная температура;

- тепловой поток;

- тепловая конвекция;

- тепловая радиация;

- объемная доля;

- потенциал скорости.

Все свойства и граничные условия течений могут быть заданы в виде постоянных значений или переменных с помощью графиков, таблиц, функций координат, времени, давлений, температур.

Результатами каждого из типов анализа являются:

- поля давлений (контурные карты),

- поля скоростей (контурные и векторные карты, линии тока).

Дополнительными результатами анализов течений Стокса или Навье-Стокса, в зависимости от типа учитываемых физических процессов, могут являться:

- градиенты, роторы, дивергенция скоростей,
- градиенты давлений, вязкие напряжения,
- температура, градиенты температур, тепловые потоки,
- кинетическая энергия турбулентности, диссипация турбулентности, турбулентная вязкость, турбулентная теплопроводность,
- плотность, вязкость, удельная теплоемкость, теплопроводность.

В зависимости от типа, результат анализа может быть представлен в виде статических контурных, векторных карт, линий тока, или в виде анимаций скалярных и векторных полей характеристик течений.

8. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Инструментом моделирования электростатических, магнитостатических и электромагнитных высокочастотных и низкочастотных полей при проектировании, анализе и диагностике электронного и электротехнического оборудования и оборудования средств связи является программная среда **APM EMA (APM Electro Magnetic Analysis)**.

Функциональные возможности программного комплекса APM EMA по решению систем уравнений электродинамики включают:

8.1 Низкочастотная область

8.1.1. Электростатика.

Расчет постоянного электрического поля, в отсутствие магнитного, для материалов с ярко выраженными диэлектрическими свойствами (электрические токи отсутствуют). В результате можно получить характеристики электрического скалярного потенциала, векторов напряженности и индукции электрического поля.

8.1.2 Электрокинетика (расчет поля постоянных токов).

Расчет постоянного электрического поля, в отсутствие магнитного, для материалов, являющимися проводниками электрического тока. В результате моделирования и последующих вычислений можно определить поля электрического скалярного потенциала, вектора напряженности электрического поля и вектора плотности электрического тока.

8.1.3. Магнитостатика.

Расчет постоянного магнитного поля, при отсутствии электрического, для материалов, обладающих свойством магнитной проницаемости. В результате расчета определяются характеристики, описывающие поля векторного магнитного потенциала, векторов напряженности и индукции магнитного поля.

8.1.4. Анализ переходных процессов электромагнитного поля.

Решаются уравнения Максвелла во временной области для материалов, обладающих свойствами магнитной проницаемости и электрической проводимости. В результате можно получить: поля электрического скалярного потенциала, векторного магнитного потенциала, вектора напряженности электрического поля, вектора плотности электрического тока, векторов напряженности и индукции магнитного поля на каждом временном шаге.

8.1.5. Гармонический анализ электромагнитных полей.

Решаются уравнения Максвелла с учетом гармонического изменения электромагнитного поля для материалов, обладающих свойствами магнитной проницаемости и электрической проводимости. В результате можно описать: поля электрического скалярного потенциала, векторного магнитного потенциала, вектора напряженности электрического поля, вектора плотности электрического тока, векторов напряженности и индукции магнитного поля для каждого значения частоты возмущения.

8.1.6. Квазистатический электрический анализ. Решаются уравнения Максвелла с учетом гармонического изменения электрического поля и отсутствия магнитного поля для материалов, являющимися проводниками электрического тока, а также материалов с диэлектрическими свойствами. В результате необходимо получить: поля электрического скалярного потенциала, векторов напряженности и индукции электрического поля и вектора плотности электрического тока для каждого значения частоты возмущения.

8.2. Высокочастотная область

8.2.1. Модальный анализ 3D электромагнитных структур.

Решаются уравнения Максвелла в частотно-временной области. Применяется векторный тип конечных элементов, при использовании которого, можно определить собственные частоты и собственные формы полей электрической и магнитной напряженности.

8.2.2. Гармонический анализ высокочастотных электромагнитных процессов.

Решаются уравнения Максвелла с учетом гармонического изменения электромагнитного поля в частотно-временной области. Применяется векторный тип

конечных элементов, в результате использования которого можно рассчитать поля электрической и магнитной напряженности для каждого значения частоты возмущения.

9. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ АНАЛИЗ (МУЛЬТИФИЗИКА)

Для рассмотренных видов анализа существует возможность передавать результаты одного вида анализа в качестве исходных данных (нагрузок) для другого.

- 1) Передача температурных полей из стационарного и нестационарного анализа в качестве нагрузок прочностного анализа.
- 2) Передача полей давления из анализа течения жидкостей газов в качестве нагрузок прочностного анализа.

Кроме того, существует межпрограммный интерфейс позволяющий производить междисциплинарные расчеты (сопряженный теплообмен между твердыми и жидкими (газообразными) телами, механическое взаимодействие жидкость – твердое тело (Fluid-Structure Interaction – FSI), а также их комбинации) совместно с программным продуктом FlowVision (разработка компании ТЕСИС).

10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Технологическая механика – это раздел технологии изготовления деталей и узлов машин, при котором технологические параметры, определяются прямым моделированием выбранного технологического процесса. Детали обычно изготавливаются литьем, обработкой давлением, сваркой и механообработкой. Перечисленные технологические процедуры можно моделировать с использованием методов мультифизического анализа.

10.1. Моделирование процессов обработки металлов давлением:

- Листовая штамповка.
- Объемная штамповка.
- Прокатка.

10.2. Моделирование процессов формирования сварных соединений.

- Определение нестационарных температурных полей без учета фазовых переходов.
- Оценка остаточных напряжений после охлаждения.

10.3. Моделирование литейных процессов:

- Нестационарное охлаждение формы для оценки остаточных напряжений и коробления.

11. ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ И ИММИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ.

(Расчеты электротехнических и электронных устройств)

Принцип описания моделей основан схемотехническом представлении. Основным элементом является графическое представление функционального блока, имеющее коннекторы – порты. Порты соединяются по средствам направленных или ненаправленных связей, определяемых графическим представлением в виде линий.

11.1. Статический (линейный) расчет

Расчет цепей постоянного тока. Исходными данными являются резистивные элементы, элементы заземления, источники постоянного тока и напряжения, а также датчики (вольтметры и амперметры), объединенные в электротехническую схему. Результатами расчета являются токи в элементах и напряжения между узлами.

11.2. Гармонический (линейный) расчет

Предполагается расчет цепей гармонического (синусоидального) тока. Исходными данными являются резистивные, емкостные и индуктивные элементы, элементы заземления, источники синусоидального тока и напряжения, а также датчики (вольтметры и амперметры), объединенные в электротехническую схему. Результатами расчета являются действующие, амплитудные значения токов в элементах и напряжений между узлами, а также их амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики.

11.3. Анализ линейных переходных процессов

Выполняется расчет переходных процессов электрических цепей. Исходными данными являются резистивные, емкостные и индуктивные элементы, элементы заземления, источники тока и напряжения с заданным пользователем законом изменения, а также датчики (вольтметры и амперметры), объединенные в электротехническую схему. Результатами расчета являются мгновенные значения токов в элементах и напряжений между узлами в рассчитанные моменты времени.

11.4. Анализ нелинейных переходных процессов

Выполняется расчет переходных процессов электрических и электронных цепей. Исходными данными являются резистивные, емкостные и индуктивные

элементы, диоды, транзисторы, элементы заземления, источники тока и напряжения с заданным пользователем законом изменения, а также датчики (вольтметры и амперметры), объединенные в единую электронную схему. Результатами расчета являются мгновенные значения токов в элементах и напряжений между узлами в рассчитанные моменты времени.

11.5. Имитационное моделирование

Имитационная модель предназначена для вычисления «абстрактной» математической модели, построенной с использованием нестационарных сигналов. Сигналы внутри модели описываются связями, которые коммутируют между собой посредством атомарных операций, определяемых функциональными блоками.

11.6. Функциональные возможности

Имитационные модели и электрические и электронные схемы основаны на обширной базе встроенных элементов. Кроме этого, у пользователя есть возможность, существенно расширить исходную элементную базу, как за счет создания пользовательских элементов, основанных на языке Julia, так и за счет создания «подсистем» – комбинации существующих (встроенных и пользовательских) элементов. Механизм использования подсистем позволяет организовать взаимосвязь между электрическими схемами и имитационными моделями. Кроме прочего модели могут быть параметризованными за счет использования встроенной поддержки вычисления математических выражений.

12. ГЕНЕРАЦИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ И ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ

12.1. Сеточный генератор и его возможности

Генератор **APM Mesh** обеспечивает автоматическое создание сеток, как с постоянным, так и с адаптивным шагами. Реализована поддержка твердотельной и поверхностной геометрии, а также сборок на их основе.

Опции автоматической генерации сетки конечных элементов:

- треугольные / четырехугольные плоские элементы первого порядка;
- тетраэдры первого / второго порядка;
- шаг постоянный / переменный / адаптивный;
- сгущение / разряжение в объеме / на поверхности;

- предварительное разбиение детали / грани / ребра;
- полуавтоматическая «корректировка» сетки;
- групповое разбиение;
- совместная сетка деталей в сборке с постоянным и автоматическим выбором шага (шаг сетки при этом зависит от геометрических размеров деталей в сборке).

Для формирования связей в сборках предусмотрены:

- контакты: жесткий, скользящий, клейка, балочный и др.;
- соединения: жесткое, сферический шарнир и др.

12.2. Вычислительные возможности и организация расчетных процедур

Для ускорения вычислительных процедур и для увеличения размерности решаемых задач можно использовать:

- Многопроцессорный компьютер, эффективная работа которого обеспечивается распараллеливанием выполняемых вычислений.
- Графические видеопроцессоры, реализующие технологию CUDA компании NVIDIA.
- Численные решения метода подконструкций.

Повышения эффективности вычислений можно за счет выполнения расчетов с применением пакетной технологии (**Batch processing**).

Поскольку базовым численным методом решения, перечисленных выше задач, является метод конечных элементов, основанный на вычислениях систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), то скорость и точность во многом определяется скоростью вычислений СЛАУ. В этой связи предлагается большой набор вычислительных возможностей с использованием математических библиотек для организации расчетных процедур, а именно:

- Математические библиотеки для численных решений СЛАУ на CPU
- Математические библиотеки для численных решений СЛАУ на GPU
- Оригинальный метод для решения СЛАУ, разработанный в компании НТЦ «АПМ». Это «Метод блочных разложений» (МБР), который можно использовать как на центральном, так и на графическом процессоре. Этот метод, имеет ряд существенных преимуществ как по быстродействию, так и по рациональному использованию памяти.