MSC Apex — реализация перспективных технологий инженерного компьютерного моделирования и анализа

А.В. Гуменюк, старший технический эксперт (MSC Software RUS) Alexander.Gumenyuk@MSCSoftware.com

Компания *MSC Software* долгое время является одним из передовых разработчиков систем инженерного моделирования и анализа. Такие программные продукты, как *MSC Nastran, Marc, Dytran, Adams, Patran,* уже давно широко используются инженерами во всём мире для моделирования и анализа самых разнообразных конструкций изделий в различных отраслях промышленности.

MSC Software постоянно развивает свои технологии, воплощая в своих программных продуктах, по возможности, все передовые идеи и новейшие подходы.

Отслеживая и анализируя запросы и пожелания пользователей, специалисты компании пришли к выводу о необходимости создания принципиально новой *CAE*-сре-

ды, которая наилучшим образом сочетала бы весь накопленный опыт предыдущих разработок, и в то же время максимально использовала бы современные идеи, разработки и технологии. Целью разработки стало повышение эффективности труда инженера-расчетчика путем предоставления максимально комфортной рабочей среды, не перегруженной огромным числом программных инструментов, но обладающей минимально необходимым числом "умных", интуитивно-понятных многофункциональных средств, каждое из которых позволяло бы в определенной степени автоматизировать рутинные операции.

Такой подход дает возможность существенно повысить не только производительность, но и качество работы инженера-расчетчика на одном из самых трудоемких и затратных этапов — на этапе подготовки и отладки расчетной модели. При этом, система должна оставаться простой в освоении. Это снизит затраты компании на подготовку специалистов и времени на их включение в процесс проектирования. Обладая такой системой, предприятие может существенно сократить расходы на использование инженерного программного обеспечения и повысить эффективность процесса проектирования в целом.

Результатом нескольких лет разработки такой среды стала CAE-система нового поколения, получившая название MSC Apex (рис. 1). Это совершенно новая программная платформа, являющаяся основой для реализации новых возможностей в сфере CAE-моделирования и анализа, гибкая высокоэффективная компонентная среда для подготовки $K\Theta$ -моделей и их расчета методом конечных элементов ($K\Theta$).

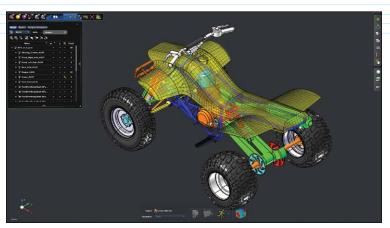


Рис. 1. Современный графический пользовательский интерфейс MSC Apex

Каждая новая версия *MSC Apex* получает свое собственное имя — название животного, начинающееся со следующей буквы латинского алфавита. Так, первые версии имеют имена *Arctic Wolf*, *Black Marlin*, *Cheetah*, *Diamond Python*.

Состав компонентов *MSC Apex* расширяется от версии к версии. Для актуальной на момент выхода статьи версии *MSC Apex – Diamond Python* – доступны два модуля: *Modeler* и *Structure*.

✓ MSC Apex Modeler

Основной многофункциональный модуль, предназначенный для эффективной работы с геометрическими моделями, полученными из CAD-систем, их доработки, упрощения для нужд CAE-анализа и, одновременно, для генерации конечно-элементной сетки.

✓ MSC Apex Structure

Дополнительный модуль, предоставляющий возможности подготовки модели к расчету — в частности, весь необходимый для этого набор инструментов задания граничных условий, нагрузок, свойств материалов, автоматизированной проверки готовности модели к расчету и непосредственного выполнения расчета.

Сочетание небольшого количества многофункциональных и интерактивных инструментов моделирования обеспечивает беспрецедентную эффективность освоения и использования программного комплекса.

Основные особенности *MSC Apex*

К числу основных особенностей системы можно отнести следующее:

- Реализация технологии прямого геометрического моделирования (хорошо зарекомендовавшей себя в CAD-системах) в сочетании с синхронным перестроением КЭ-сетки (на данный момент не имеет аналогов среди конкурирующих программных комплексов);
- Комплекс высокоавтоматизированных средств подготовки геометрической модели для нужд расчетчика, а также инструменты, позволяющие упростить и автоматизировать некоторые рутинные операции, характерные для этого этапа работы с моделью;
- Применение технологии расчетных компонентов и сборок (Computational Parts and Assemblies), что, по сути, является новым уровнем использования метода подконструкций (суперэлементов) для работы со сложными моделями сборок и подсборок;
- Интегрированные методы конечно-элементного решателя (в данном случае *MSC Nastran*) позволяют выполнять расчеты конструкции непосредственно в среде *MSC Apex*, то есть приложение является и пре-/постпроцессором, и решателем одновременно.

Помимо этого, можно отметить такие свойства $MSC\ Apex$, как:

- Интуитивность и простота взаимодействие с компонентами геометрической модели осуществляется естественным и привычным для пользователя образом: перетаскиванием, достраиванием, заполнением отверстий и зазоров, масштабированием и т.д. За счет интуитивности действий над моделью освоение работы с системой происходит очень быстро: опытный пользователь CAE-систем способен изучить $MSC\ Apex$ за 1–2 дня, а начинающий за 3–4 дня;
- Автоматизация работы с сеткой геометрическое моделирование сопровождается синхронной генерацией КЭ-сетки. Если исходная модель уже содержала КЭ-сетку, эта сетка автоматически перестраивается, отслеживая изменения геометрии. Пользователь сразу может видеть, как его действия над геометрией влияют на качество КЭ-модели;
- Минимизация затрат времени и усилий на освоение системы за счет наличия обучающих материалов. Интерактивные инструкции, примеры для пошагового выполнения, видеоуроки, система поиска нужных функций программы, а также возможности поиска по справочной системе поставляются в комплекте с системой и легко доступны из её интерфейса;
- Наличие механизма подкурсорных контекстных подсказок. Инструменты графического интерфейса снабжены всплывающими подсказками и ссылками непосредственно на нужный урок или раздел справки. При выборе любого инструмента на любом шаге его использования под курсором появляется краткая подсказка о том, каких действий система требует от пользователя в данный момент.

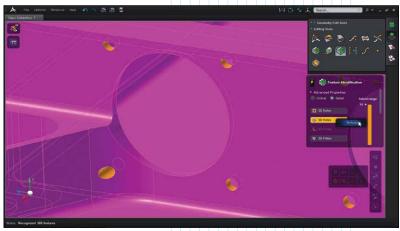
Этап *CAD-to-Mesh:* подготовка расчетной модели в среде *MSC Apex*

Геометрическую модель в MSC Apex можно импортировать из всех широко распространенных CAD-систем (NX, CATIA V4, CATIA V5, SOLIDWORKS, Inventor, Creo и др.) в их родном формате, либо в одном из стандартных обменных форматов - таких, как STEP, IGES, ACIS или Parasolid. Помимо этого, геометрические модели определенного уровня сложности можно создать и встроенными средствами геометрического моделирования, используя инструменты эскизирования из панели Geometry Create. Разумеется, возможности создания геометрии в MSC Apex уступают тем, которые предоставляются в САД-среде, однако их вполне достаточно для выполнения вспомогательных построений или редактирования уже существующей геометрии после импортирования модели.

Рассмотрим типовой сценарий подготовки геометрической модели и генерации конечно-элементной сетки. При этом обратим внимание на задействованные инструменты *MSC Apex* и на способ их применения.

Шаг 1. Автоматическое удаление конструктивных элементов заданного размера

Пользователь может вручную удалять такие геометрические конструктивные элементы, как скругления, фаски, цилиндрические поверхности и отверстия, используя инструмент Defeature. Однако, когда речь идет о поиске и удалении десятков, сотен и даже тысяч экземпляров таких элементов, индивидуальный подход уже не годится. Для этого в MSC Apex реализован инструмент Feature Identification (из группы Defeature), позволяющий пользователю задать критерии поиска геометрических конструктивных элементов на нужной части модели. Система автоматически распознаёт их и подсвечивает на модели в соответствии с поддиапазоном характерных размеров, которым они отвечают. Такие поддиапазоны можно интерактивно изменять и настраивать. После того как пользователь убедился в корректности выделения, он может удалить все эти конструктивные элементы одним нажатием клавиши мыши (рис. 2).



Puc. 2. Применение инструмента автоматизированного упрощения геометрии – Feature Identification

Шаг 2. Интерактивное построение срединных поверхностей

Для выполнения анализа конструкции, геометрическую модель, представленную в виде сплошных объемных тел (то есть твердотельную), зачастую преобразовывают в поверхностную - путем создания срединных поверхностей. Практически всегда это оказывается достаточно сложным делом из-за особенностей трехмерной геометрии, поверхностей и их стыков сложной формы. Как следствие, возникают трудности при создании срединных поверхностей на таких участках 3D-модели. Возможностей традиционных простых инструментов создания срединных поверхностей порой уже бывает недостаточно – необходим целый комплекс интеллектуальных интерактивных инструментов, и *MSC Apex* таким комплексом обладает (рис. 3).

Инструменты создания срединных поверхностей включают:

- Auto Offset автоматизированное создание срединных поверхностей с индивидуальным выбором позиции поверхности;
- Constant Thickness массовое создание срединных поверхностей на объемных моделях с постоянной толщиной;
- Distance Offset индивидуальное указание величины отступа явным образом;
- Taper Midsurface Creation создание срединной поверхности на объемном ребре переменной толщины;
- *Upto Alignment* быстрое выравнивание одной поверхности в плоскость другой поверхности;
- Incremental Midsurface интерактивный комплекс инструментов, использующий технологию автоматического отыскания пар граней и создания

на них срединных поверхностей. При этом пользователь может вносить коррективы в конфигурацию пар, и в его распоряжении имеются средства визуализации будущей срединной поверхности уже на этапе подбора параметров (рис. 4).

Шаг 3. Исправление поверхностей с помощью прямого редактирования геометрии

После создания набора срединных поверхностей далеко не все из них удается связать в единое оболочечное пространственное тело — между поверхностями могут оставаться зазоры. Это следствие работы простых алгоритмов создания срединных поверхностей (инструменты Incremental Midsurface фактически лишены такого недостатка, так как создают

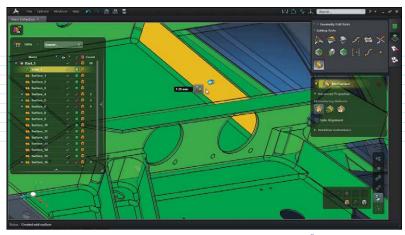
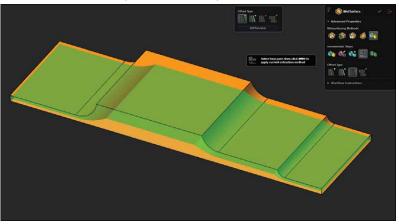
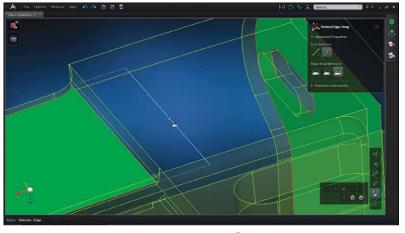


Рис. 3. Комплекс инструментов по созданию срединных поверхностей



Puc. 4. Выбор параметров создания срединной поверхности инструментом Incremental Midsurface

состыкованную по кромкам гладкую срединную поверхность). На этом этапе применяются средства прямого геометрического редактирования — $Vertex/Edge\ Drag\$ (свободное перетаскивание вершин и кромок геометрической модели с возможностью



Incremental Midsurface фактически ли- Puc. 5. Дотягивание кромок срединных поверхностей шены такого недостатка, так как создают с последующей автоматической стыковкой с поверхностями

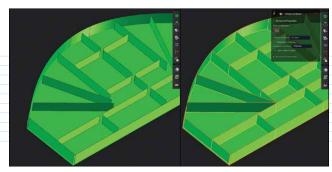


Рис. 6. Применение инструмента автоматического дотягивания срединных поверхностей

привязки к элементам геометрии) и Extend Surfaces (инструмент автоматического дотягивания срединных поверхностей до пересечения с прилегающими поверхностями с учетом требований пользователя).

Первый инструмент применяется в случае индивидуального локального редактирования геометрии – пользователь просто перетаскивает необходимую вершину или кромку на нужное место, геометрическая модель перестраивается автоматически (рис. 5). Второй инструмент больше подходит для массового дотягивания кромок срединных

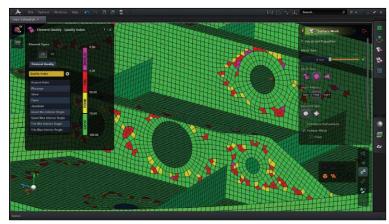


Рис. 7. Автоматическое создание качественной сетки вокруг распознанных геометрических конструктивных элементов и визуализация качества сетки

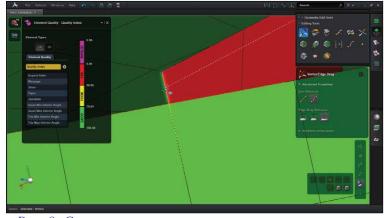


Рис. 8. Синхронное автоматическое перестроение сетки при внесении изменений в геометрию

поверхностей до пересечения. Пользователю достаточно ввести лишь один параметр – максимальный зазор, в пределах которого кромки будут стыковаться. Все остальные рутинные операции берет на себя система *MSC Apex*: отыскивает удовлетворяющие критерию кромки, дотягивает их до пересечения с соответствующей поверхностью и осуществляет корректную стыковку (рис. 6).

Шаг 4. Построение КЭ-сетки и отображение параметров качества сетки

На этом этапе пользователь создает КЭ-сетку на основе выбранного типа, характерного размера элемента, предварительной разметки (Mesh Seed) и с учетом особенностей геометрии. Поддерживаются все основные типы конечных элементов: одномерные, двумерные (как линейные, так и квадратичные), трехмерные (как линейные, так и квадратичные). При этом можно задавать фиксированную плотность сетки на заданных участках, а также, используя инструмент Feature Mesh Settings, правила генерации КЭ-сетки с учетом распознанных геометрических конструктивных элементов в локальных зонах. Пользователь имеет возможность предварительно назначать под-

диапазоны характерных параметров таких геометрических конструктивных элементов, как скругления, фаски, цилиндры, полуцилиндры, отверстия — система будет учитывать заданные требования при создании сетки и сформирует вблизи распознанных конструктивных элементов сетку с указанными параметрами. Так, например, можно потребовать от генератора сетки, чтобы вокруг отверстий диаметром от 6 до 9 мм по периметру создавалось 14 конечных элементов правильной формы в два ряда, и при этом для отверстий диаметром от 9 до 12 мм предусмотреть другие правила (рис. 7).

В результате применения такого подхода пользователь может сразу получить КЭ-сетку более высокого качества (особенно в зонах вероятной концентрации напряжений), что позволит существенно сократить период отладки модели.

Шаг 5. Завершение построения геометрической модели и генерация КЭ-сетки

Используя удобные интерактивные инструменты прямого редактирования геометрической модели — Vertex/Edge Drag (Перетаскивание вершин/кромок), Filler (Заполнение зазоров и вырезов в поверхностях), Stitch Surfaces (Стыковка поверхностей), Add/Remove Vertex (Добавление/удаление вершин) для дальнейшего улучшения геометрии, пользователь отлаживает модель, контролируя изменение качества КЭ-сетки после любых внесенных в геометрическую

модель изменений. *MSC Арех* обладает уникальной возможностью синхронного перестроения сетки и одновременно отображения её качества при любых вносимых пользователем коррективах. Зазоры и вытянутые поверхности могут быть легко удалены из модели, при этом сетка перестраивается автоматически (рис. 8).

Шаг 6. Автоматическое назначение толщин и отступов

После отладки модели и контроля качества КЭ-сетки наступает этап атрибутирования модели, то есть назначения свойств материалов, конечных элементов (толщин, отступов от плоскости узлов для оболочечных элементов). Помимо возможности задавать свойства индивидуально на отдельных фрагментах модели, пользователь может автоматизировать этот процесс, применив инструмент Auto Thickness для автоматического задания толщин и отступов оболочечных элементов. При этом MSC Apex автоматически назначает необходимые значения с учетом исходной объемной геометрии (рис. 9). Если участки исходной объемной модели имеют переменную толщину, пользователь может

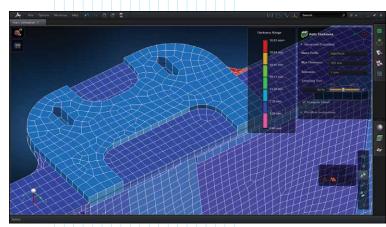


Рис. 9. Автоматическое назначение толщин и отступов от плоскости узлов оболочечных элементов с учетом толщин исходных объемных тел

 Табл. 1. Сравнение традиционных средств

 и MSC Apex

	Тради- ционный подход	Приме- нение <i>MSC Apex</i>
Требуемый уровень опыта пользователя	Высокий	Низкий
Подготовка геометрической модели к расчетам	35 ч.	3 ч.
Генерация КЭ-сетки	3 ч.	2 ч.
Назначение свойств	12 ч.	0.5 ч.
Весь сценарий	50 ч.	5.5 ч.

выбрать опцию назначения переменных толщин на соответствующих участках оболочечной модели. При этом толщины на оболочечной сетке назначаются индивидуально для каждого узла и являются переменными для каждого конечного элемента.

Далее построенная конечно-элементная модель (как для отдельных деталей, так и сборки в це-

лом) может быть экспортирована в формате входного файла MSC Nastran (*.bdf). Экспортированная в формате Parasolid отлаженная геометрическая модель и входной файл решателя позволяют продолжить работу в традиционной CAE-среде для завершения постановки задачи.

На сегодня существует уже немало примеров эффективного использования новой CAE-среды. Производительность труда инженера в некоторых случаях возрастает в пять и более раз, по сравнению с применением традиционных CAE-систем. Один из таких примеров приведен ниже.

На разработку *CAE*-модели, представленной на рис. 10 конструкции авиационного силового шпангоута (подготовка геометрической модели и генерация КЭ-сетки) с помощью традиционного

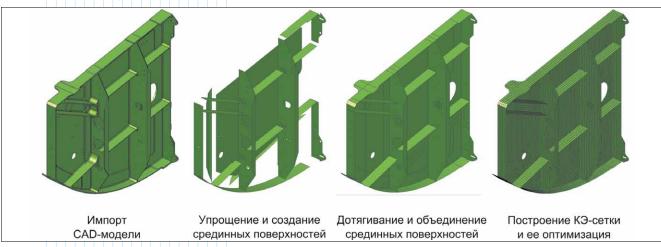


Рис. 10. Четыре стадии процесса подготовки расчетной модели

подхода было затрачено 50 часов. При использовании *MSC Apex Modeler* данный процесс занял всего 5.5 часов и потребовал гораздо меньше усилий. Этап подготовки геометрической модели и построения КЭ-сетки включал в себя четыре шага (табл. 1):

• импорт геометрической модели из *CAD*-системы, чистка и "лечение" геометрии, то есть выявление проблемных участков модели (длинные вытянутые поверхности, короткие кромки, нестыковки кромок и т.п.) и их устранение;

2 упрощение геометрической модели, удаление мелких геометрических подробностей, ненужных для построения сетки;

3 создание срединных поверхностей и их стыковка;

✓ генерация КЭ-сетки, оптимизация её (с точки зрения качества), назначение толщин и отступов от плоскости узлов.

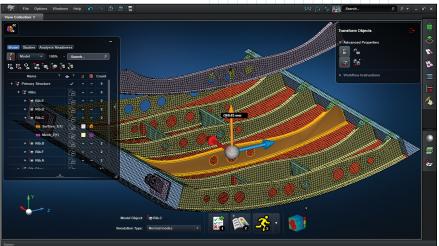
Модуль MSC Apex Structures

Этот дополнительный модуль расширяет функционал базового модуля *MSC Apex Modeler* возможностями проведения линейного структурного анализа конструкции и/или анализа её на собственные частоты и формы.

Модуль MSC Apex Structures предлагает как современный графический пользовательский интерфейс для задания различных сценариев расчета и обработки результатов, так и интегрированный решатель. Такой подход является уникальным, поскольку сочетает в себе технологию расчетных компонентов и сборок с высокопроизводительной средой моделирования, которая позволяет производить интерактивный и инкрементальный (поэтапный, пошаговый) анализ конструкции (рис. 11).

Интеграция современного пользовательского интерфейса с высокоэффективным решателем предоставляет пользователю уникальную возможность проводить интерактивную и инкрементальную валидацию модели, то есть отлаживать любые конфигурации частей изделия на ранних стадиях моделирования и подтверждать, что КЭ-модели готовы к проведению расчета модели всего изделия. По запросу пользователя может быть выполнена серия автоматических проверок (как на отдельных деталях, так и на всей сборке) с автоматической генерацией отчета на панели оценки готовности модели к расчету – Analysis Readiness. Реализованный подход с возможностью пошаговой валидации радикально отличается от затратного по времени и ресурсам традиционного подхода, где пре-/постпроцессор и решатель разделены.

Необходимо отметить, что модуль MSC Apex Structures, обладающий технологией расчетных компонентов и сборок, является решением, основанным на реальной структуре изделия, где представление поведения (жесткость, масса и демпфирование) каждой отдельной детали (компонента структуры изделия) может быть рассчитано заранее, сохранено и применено в расчете независимо (рис. 12). По сути, речь идет о новом уровне использования технологии суперэлементов (или



Puc. 11. Технология расчетных компонентов и сборок в действии – инкрементальный анализ сборки

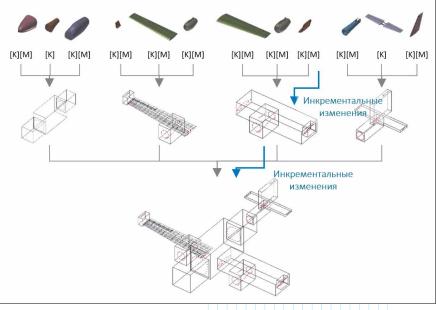


Рис. 12. Концепция независимых компонентов и сборок

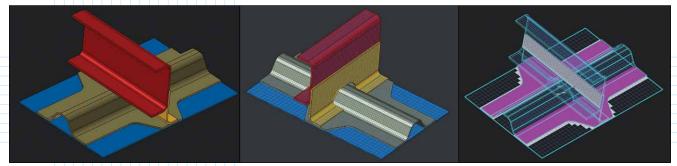


Рис. 13. Автоматическое определение и назначение зон контактов деталей в сборке

подконструкций) с высоким уровнем автоматизации всех рутинных операций формирования и управления суперэлементами. Такой подход особенно эффективен, когда комбинируется с высокопроизводительной средой MSC Apex, где каждый последующий запуск решателя будет пересчитывать только ту часть модели, которая затронута изменениями. Мы называем такой подход инкрементальным решением. Особенно эффективна эта новая архитектура решения при выполнении множественных вариантных исследований модели.

На следующем этапе пользователь выбирает тип решения задачи и конфигурацию деталей и подсборок, которые будут рассчитываться. Все эти данные в совокупности формируют "контекст решения" (Set Analysis Context). На сегодняшний момент доступны два типа решений — линейный статический анализ (Static) и анализ на собственные частоты и формы колебаний (Normal Modes). В дальнейшем число поддерживаемых типов решений будет расширено.

Поскольку расчетные компоненты и сборки являются полностью независимыми объектами, пользователь получает возможность проводить экспресс-анализ практически любых конфигураций деталей в сборке, а также предварительный анализ отдельных деталей (инкрементальная подетальная валидация модели). Это позволяет отладить решаемую сложную задачу за гораздо меньшие сроки, чем при традиционном подходе, когда существует необходимость запуска на расчет полной модели — со всеми затратами времени и ресурсов на формирование сборки и её трансляцию в формат решателя.

Для реализации технологии расчетных компонентов и сборок в *MSC Арех* разработаны инструменты создания постоянного клеевого соединения между деталями. Пользователю достаточно выбрать детали, которые следует соединить и задать область поиска (*Tolerance*) зоны постоянного клеевого контакта. При этом система автоматически определяет те зоны сеток на деталях, которые будут связаны. В результате, благодаря использованию технологии независимого от сетки постоянного клеевого соединения, отпадает необходимость в выстраивании совпадающих узлов на КЭ-сетках стыкуемых

деталей. Контактные зоны сетки автоматически определяются с учетом реальных толщин деталей (рис. 13).

Технология расчетных компонентов и сборок видится перспективной для высокопроизводительной работы с большими сборками, а также в ситуации, когда в модель часто вносятся изменения. В этом случае достигается наибольший эффект, выражающийся в существенном сокращении затрат времени и усилий пользователя на расчет сложных сборок изделий. Новый подход позволяет проводить данный этап работ в несколько раз быстрее.

Заключение

Рассмотренный в статье новый, активно развивающийся программный продукт компании MSC Software - MSC Apex - обладает целым рядом качеств, которые на данный момент являются уникальными среди подобных *CAE*-систем. Благодаря целому комплексу высокоэффективных универсальных и интуитивно понятных инструментов, автоматизирующих многие характерные рутинные операции (связанные, в первую очередь, с подготовкой геометрической модели к построению качественной КЭ-сетки и подготовкой расчетной модели), а также новейшим перспективным разработкам и ноу-хау, реализованным в продукте, достигается существенное (в несколько раз!) повышение эффективности труда инженера по сравнению с традиционными САЕ-системами. Пользователю комфортно работается в среде MSC Apex, при этом затраты на освоение и повседневную эксплуатацию программного продукта уменьшаются. За счет этого растет эффективность процессов моделирования и анализа на предприятии в целом, что, безусловно, положительно сказывается на сроках проектирования изделий и ведет к снижению финансовых затрат на проектирование. 🧼

Более подробную информацию о системе *MSC Apex* можно получить на сайтах <u>www.mscapex.com</u>, <u>www.mscsoftware.com</u> или <u>www.mscsoftware.ru</u>, а также в офисе российского представительства *MSC Software* по адресу: Москва, ул. Зоологическая, д. 26, стр. 2.