

Современные методы проектирования оборудования ракетно-космических комплексов

Среди проектных организаций, входящих в состав предприятий ракетно-космического комплекса, одним из ведущих является ФГУП «Конструкторское бюро транспортного машиностроения» (КБТМ). ФГУП КБТМ занимается разработкой наземного оборудования стартовых комплексов – транспортно-установочных агрегатов, агрегатов обслуживания, заправки, кабель-заправочных башен, кабель-мачт и пусковых устройств. За шестидесятилетнюю историю предприятия его специалисты спроектиро-

вали и создали более 1000 образцов технологического оборудования для наземной эксплуатации, подготовки и запуска ракет различного назначения, разработали 92 проекта комплексов, провели более 500 научно-исследовательских работ. Около пятидесяти комплексов, разработанных на предприятии, с сотнями агрегатов и систем поступили на вооружение армии и флота. Среди наиболее известных из созданных ФГУП КБТМ стартовых комплексов – «Космос», «Циклон», «Зенит», «Рокот», Sea Launch («Морской старт»).



Проектирование таких сложных объектов, как стартовые ракетно-космические комплексы (РКК), требует разработки уникального наземного оборудования, параметры которого определяются целым рядом различных факторов: конструктивно-компоновочными схемами ракет-носителей (РН), компоновкой зон обслуживания, допустимыми нагрузками на РН в период предстартовой подготовки и при старте, операциями, выполняемыми с полезными нагрузками, временем выполнения операций и многими другими.

Сложность и многообразие решаемых при этом конструкторским бюро задач обуславливает широкое использование специалистами предприятия вычислительной техники, конструкторского и расчетного программного обеспечения.

Внедрение электронно-вычислительной техники на ФГУП КБТМ ведет начало с 70-х годов прошлого века. Основные задачи, решаемые с помощью первых ПЭВМ, были расчетными, а первое программное обеспечение для решения специализированных задач по расчетам оборудования стартовых комплексов разрабатывалось в расчетно-теоретическом отделе предприятия на языках программирования FORTRAN и С. В дальнейшем, в ходе модернизации электронно-вычислительной техники, программы совершенствовались и усложнялись, в 80-х годах начали появляться программы, основанные на простых конечно-элементных моделях, состоящих из 10–30 элементов, и программы расчета динамики для конкретных кинематических схем.

В 1996 году ФГУП КБТМ принимает участие в международном проекте – создании комплекса морского базирования Sea Launch. Комплекс создается на базе РН “Зенит”, а КБТМ становится главным предприятием по созданию стартового оборудования.

Выход на международный уровень требует от предприятия перехода на работу в системе стандартов ISO. В КБТМ появляются современные ПЭВМ и ПО для проведения конструкторских и расчетных работ. Для задач проектирования широко используется AutoCAD компании Autodesk, для проведения прочностных расчетов и построения конечно-элементных моделей – программный комплекс MSC.NASTRAN фирмы MSC.Software.

В период 1998–2000 годов MSC.NASTRAN используется для проведения расчетов при проектировании модернизируемого комплекса “Рокот”, большая часть оборудования которого, прежде чем воплотиться в металле, была испытана на виртуальных моделях, построенных в MSC.NASTRAN.

Длительная эксплуатация оборудования комплексов Sea Launch и “Рокот”, отсутствие отказов, связанных с прочностными параметрами оборудования, подтвердили правильный выбор предприятием программного обеспечения для инженерного анализа.

При начале работ по РКК “Ангара” на этапе предварительного проектирования наземного оборудования использовались расчетные модели, полученные в процессе реализации проектов Sea Launch и “Рокот”, которые позволяли дать четкую оценку различным

конструктивным решениям и сделать правильный выбор варианта конструкции из предлагаемого набора.

Программные продукты, разработанные MSC.Software, позволяли провести на виртуальной модели расчеты всего жизненного цикла изделия – от процесса проектирования до эксплуатации, в том числе с фактором старения металлоконструкции в процессе эксплуатации.

В ходе ознакомления с программными продуктами, предлагаемыми компанией MSC.Software, и проведения тестирования их возможностей по созданию моделей оборудования комплексов и проведения расчетов были определены продукты, позволяющие наилучшим образом реализовывать задачи, решаемые в расчетно-теоретическом отделе КБТМ. В качестве основного инструмента для проведения прочностных расчетов был выбран MSC.NASTRAN с препроцессором MSC.PATRAN, для анализа динамических задач – MSC.ADAMS.

Прежде чем говорить о непосредственном применении программных продуктов, следует отметить причины ориентации КБТМ на использование виртуальных моделей для отработки оборудования комплексов, что определяется особенностями оборудования для ракетно-космической техники.

Масштабность. Наземное оборудование, как правило, имеет значительные габаритные размеры и массу. В процессе работы различных механизмов оборудования комплекса происходят большие перемещения крупных объектов и возникают существенные нагрузки. К “масштабному” фактору также следует отнести весьма немалую стоимость конструкции изделия и оборудования, входящего в его состав.

Динамичность. Функционирование любого изделия, входящего в состав ракетно-космического комплекса, характеризуется сложной динамикой его работы и взаимодействия с другими объектами РКК, а также элементов изделия между собой. Данная особенность оборудования не позволяет использовать простые дискретные или статические модели.

Массовость эффектов и процессов. Все оборудование стартового комплекса в процессе подготовки к пуску и при пуске РКН работает по независимым циклограммам, то есть многие процессы на комплексе идут параллельно, в результате чего за один отрезок времени происходит множество событий.

Случайность и неопределенность. При функционировании таких сложных объектов, какие представляют собой РКК, невозможно исключить фактор случайности и неопределенности наступления тех или иных событий.

Многомерность (множественность связей внешнего и внутреннего характера). Любое изделие комплекса в целом имеет множество связей как внешнего характера (с окружающей средой, РН и другим наземным оборудованием), так и внутреннего (силовые связи, приводы взведения, торможения, подвода отвода и др.).

Уникальность. Каждый компонент оборудования комплекса, как правило, создается под конкретную

задачу в единственном экземпляре и не имеет аналогов. Это затрудняет проведение анализа качества изделия и его работоспособности на стадии проектирования, поскольку нет возможности сравнивать его с аналогами. В связи с этим, а также учитывая фактор масштабности изделия, невозможно создавать опытные и экспериментальные образцы. Само изделие является и опытным, и экспериментальным, и рабочим образцом одновременно.

Принимая во внимание перечисленные особенности ракетно-космического оборудования, а также специфику его работы, на этапе проектирования при расчетах конструкций для обеспечения должного результата необходимо использовать математическое моделирование.

В 2003 году при активном участии компании MSC Software на предприятии были созданы стенды математического моделирования на базе рабочих станций с программными продуктами MSC.NASTRAN и MSC.ADAMS. Приобретенное программное обеспечение сразу было включено в работу по расчетам проектируемого оборудования комплекса "Ангара". Транспортно-установочные агрегаты для легкой и тяжелой РН, пусковой стол, кабель-заправочная башня – все основное оборудование комплекса проходит испытания на виртуальных моделях, созданных в MSC.NASTRAN и MSC.ADAMS.

Применение программных продуктов MSC.NASTRAN и MSC.ADAMS позволило внедрить следующую схему проектирования изделия с учетом особенностей его моделирования.

1. Геометрия конструкторских моделей, созданных в CAD-системе, импортируется в MSC.NASTRAN, где модели разбиваются на конечно-элементные сетки, и для них автоматически определяются характеристики прочности, гибкости, жесткости, податливости, а также собственные частоты.
2. Производится импорт моделей элементов из MSC.NASTRAN в MSC.ADAMS. В пакете MSC.NASTRAN задается количество и положение внешних узлов для возможности встроить тело в модель MSC.ADAMS. Элементы собираются в единую модель согласно кинематической схеме. К гибким телам добавляются твердые элементы, входящие в конструкцию (их гибкостью при заданной точности можно пренебречь или они имитируют работу каких-либо устройств) и вспомогательные элементы в местах приложения нагрузок или контактов.
3. К собранной модели прикладываются нагрузки, обусловленные особенностями процесса модели-



Схема проектирования с использованием моделирования в программных продуктах MSC Software

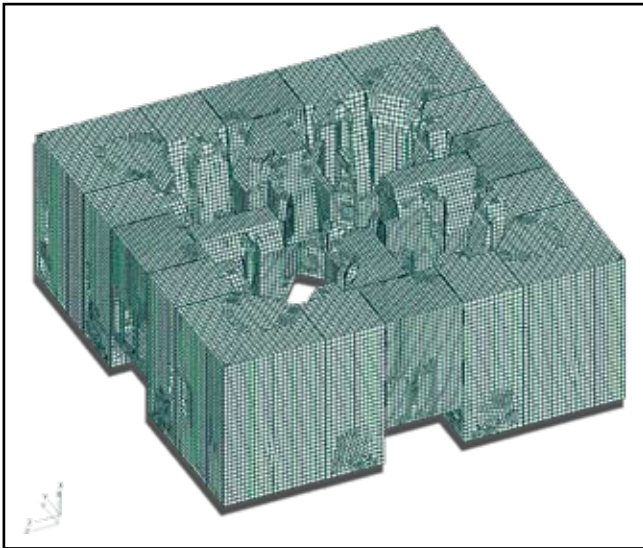
рования: сила тяжести; силы ветрового воздействия; силы демпферов; силы торможения или ускорения элементов, присутствующие конструктивно; движения в шарнирах; контактное взаимодействие.

4. Производятся расчеты модели при разных условиях действия нагрузок и последующая отладка.
5. Результаты моделирования оцениваются специалистами по расчетам в КБТМ, которые выдают заключение о работоспособности и качестве данной конструкции. На основе этого заключения по результатам математического моделирования принимается решение о дальнейшей судьбе данного варианта конструкции.
6. В случае положительного результата расчета оформляется соответствующая конструкторская и расчетная документация, если необходима доработка, то конструктор уже совместно со специалистом, проводившим расчет, корректирует проблемные места, и процесс повторяется с пункта 1 уже для уточненного изделия.

При создании изделия, работающего только в статических нагрузках, или для получения результатов в одном статическом расчетном случае, моделирование проводится только в MSC.NASTRAN, а пункты 2 и 3 исключаются.

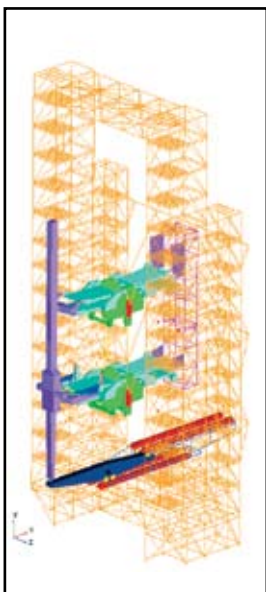
Создание с помощью программы MSC.NASTRAN конечно-элементной модели пускового стола позволило провести анализ напряженно-деформированного состояния в процессе эксплуатации и при проведении заводских испытаний. При этом результаты заводских испытаний изготовленного в металле стола повторили результаты расчетов на модели, показав расхождение не более 5%. Сейчас пусковой стол уже монтируется на космодроме.

Программные продукты MSC.NASTRAN и MSC.ADAMS применяются в КБТМ и при создании динами-



Конечно-элементная модель пускового стола

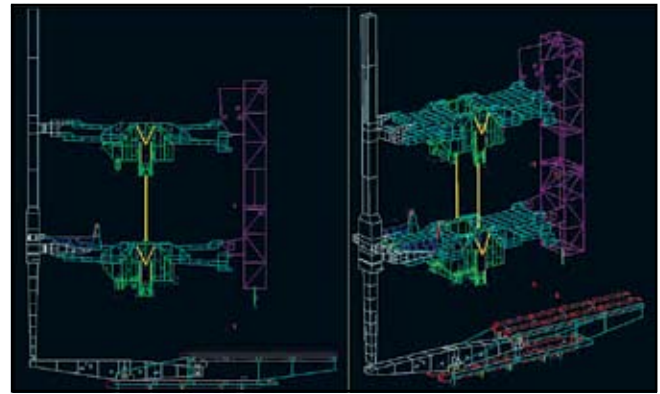
ческой модели для отработки процесса установки РН на опоры пускового стола при помощи транспортно-установочного агрегата, а также для динамических расчетов наиболее важного агрегата стартового комплекса – кабель-заправочной башни (КЗБ) с устройством удержания и устройством подвода коммуникаций. В настоящее время на предприятии осуществляется процесс проектирования и уточнения конструкции этих агрегатов по результатам расчетов.



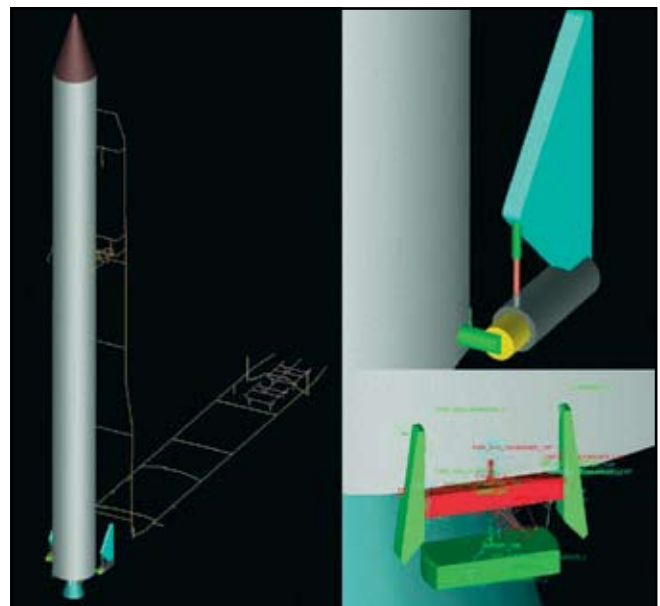
Модель КЗБ с устройством удержания

В 2004 году КБТМ начина-ет работу по корейской систе-ме запусков KSLV, основанной на легкой ракете семейства "Ангара". Отличительной особенностью данного ком-плекса является наличие ка-бель-мачты, расположенной непосредственно рядом с РН и отводящейся от нее непосредственно в процессе пуска. Анализ процесса отвода та-же производился на дина-мической модели MSC.NASTRAN и MSC.ADAMS. В данный мо-мент идет непосредственный процесс изготовления обо-рудования для комплекса KSLV.

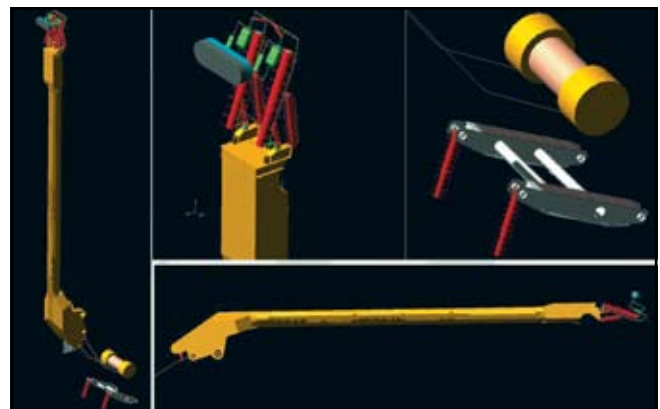
Возможности програм-мных комплексов MSC.NASTRAN и MSC.ADAMS при расчетах и оценке работоспособности изделий, раз-рабатываемых КБТМ, позволяют ускорить процесс проектирования, дают возможность создавать мате-матические модели, позволяющие с заданной точно-стью отображать реальные конструкции и их свойства. Благодаря моделированию с помощью данных продук-тов значительно уменьшается вероятность появления ошибки первого и второго рода, имеется возможность сократить количество экспериментов, а в некоторых случаях и отказаться от них, а также свести к миниму-му циклы заводских и автономных испытаний.



Модель устройства удержания



Моделирование процесса установки РН на опоры пускового стола



Модель кабель-мачты для KSLV

Сотрудничество КБТМ и компании MSC.Software дало очень хорошие результаты, и в дальнейшем при возрастании количества и сложности задач и проек-тов, выполняемых конструкторским бюро, применение программ MSC.NASTRAN и MSC.ADAMS получит еще более широкое распространение в качестве неотъем-лемого инструмента выполнения этих проектов, в том числе таких перспективных, как космодром "Восточный".

А. В. Патай, председатель Совета молодых ученых и специалистов, ФГУП КБТМ