

# Опыт и новые технологии инженерного анализа в интересах космоса

Внедрение математических методов проектирования в значительной степени способствует сохранению конкурентоспособности предприятий ракетно-космической промышленности России на мировом рынке. О том, как проходил переход к компьютерному этапу разработки отечественных ракет-носителей рассказал Сергей Петроковский, заместитель генерального конструктора ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

– Считается, что ИТ-технологии появились в России только после снятия запретов Координационного комитета по экспортному контролю в 1994 году. Как было на самом деле?

В КБ «Салют» я пришел почти 40 лет назад и застал время, когда большинство расчетов производилось вручную с использованием логарифмических линеек, арифмометров и даже канцелярских счетов. Отдельные, наиболее наукоемкие задачи решались на «больших» автономных ЭВМ М-220 и М-222, производившихся на Московском заводе счетно-аналитических машин и Казанском заводе ЭВМ. Это было время перфокарт, когда наиболее продвинутые инженеры-расчетчики писали собственные программы, если надо было решить какую-то прикладную задачу. Написанием программ занимались главным образом баллистики, прочнисты и тепловики. В конструкторском направлении программные системы не применялись вовсе. Рабочими

инструментами конструктора были кульман, ватман и карандаш.

– Что подтолкнуло к переходу на компьютерные технологии?

Изменения произошли 15–20 лет назад. В России появились конечно-элементные программные продукты, например, NASTRAN, способствовавшие значительному прогрессу в области проектирования и расчета конструкций. В первую очередь новые технологии стали применять инженеры-прочнисты, поскольку появилась возможность рассчитывать практически любой элемент ракеты-носителя или космического аппарата, в том числе в трехмерной постановке. Появление мощных персональных ЭВМ и рабочих станций давало им возможность непрерывно совершенствоваться в решении сложных задач оптимизации ракетно-космических конструкций. Если говорить о конструкторах, то лишь ограниченная их часть работала в этом направлении.



ИГОРЬ МИХАИЛОВ

«Благодаря относительной простоте технологии расчета в NX™ Advanced Simulation можно уделять большее внимание вопросам оптимизации конструкции. Внесение изменений в размеры отдельных деталей в среде NX™ Advanced Simulation уже не носит такого катастрофического характера, как это было раньше»

*Сергей Петроковский, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева*



ИТАР-ТАСС



ИГОРЬ МИХАИЛОВ

«ГНКПЦ им. М.В. Хруничева занимает лидирующее положение в мире по количеству запусков тяжелых геостационарных космических аппаратов с помощью ракеты-носителя «Протон М» и разгонного блока «Бриз М». Благодаря применению современных программных средств было реализовано значительное облегчение почти всех корпусных элементов ракеты-носителя и разгонного блока»

*Сергей Петроковский,  
ГНКПЦ им. М.В. Хруничева*

**– Часто говорят: раньше не было компьютеров, но были инженеры, которые умели делать все. Вы согласны с этим мнением?**

Нет. Тогда каждый занимался своим направлением работы. Существовало четкое разделение на проектировщиков, конструкторов и тех, кто занимался прикладными задачами. Последних было принято называть «расчетчиками». К их числу относились тепловики, динамики, аэродинамики, прочнисты, баллистики, то есть все, кто выполнял теоретические расчеты для разрабатываемой конструкции.

Модель участия каждой группы специалистов была простой и действенной. Генеральный конструктор ставил задачу – спроектировать, скажем, ракету-носитель, обладающую определенными характеристиками. В соответствии с заданными требованиями проектанты выбирали основные параметры ракеты: количество ступеней, двигатели и компоненты топлива, длины и диаметры ступеней и т.д. Выбор происходил с участием специализированных отделов, отвечающих за прочность, управляемость, баллистику, температурные режимы, разделение ступеней ракеты-носителя. Затем следовал выпуск рабочей компоновки ракеты-носителя, на основании которой конструкторские отделы создавали детальные и сборочные рабочие чертежи.

Это, конечно, упрощенная схема работы КБ. На самом деле описанный процесс мог повторяться несколько раз в зависимости от достигнутого результата.

**– Кто же выступал в качестве организующего и центрального звена при таком процессе проектирования?**

Организирующим звеном при проектировании того или иного вида ракетно-космической техники является Главный конструктор. Что касается центрального звена, то, опираясь на собственный опыт, могу сказать, что им являются прочнисты. От них зависит выбор конструкционных материалов, они определяют основные расчетные случаи нагружения проектируемого изделия и отвечают за его весовое совершенство.

**– Когда математический расчет перестал быть просто элементом проектирования, получив более высокий статус?**

Необходимость использования специализированного математического обеспечения возникла после начала применения в конструкции ракет-носителей и космических аппаратов композиционных материалов, в частности, углепластиков. Композиционные материалы в отличие от металлов рождаются в процессе изготовления конструкции. Без применения специальных программных средств практически невозможно спроектировать, изготовить и сертифицировать конструкции из композиционных материалов. Именно для них математический расчет получил более высокий статус.

**– Что послужило толчком к переходу на компьютерные методы проектирования?**

Сам факт появления на рынке в России сертифицированных программных продуктов NASTRAN, MARC, I-DEAS и др. послужил толчком к этому переходу. Второе очень важное обстоятельство связано с выходом ГНКПЦ им. М.В. Хруничева на международный рынок пусковых услуг. В настоящее время ГНКПЦ занимает лидирующее положение в мире по количеству запусков тяжелых геостационарных космических аппаратов с помощью ракеты-носителя «Протон М» и разгонного блока «Бриз М». Это стало возможным благодаря их глубокой модернизации, проводимой начиная с 2002 года. Только благодаря применению современных программных средств было реализовано значительное облегчение почти всех корпусных элементов ракеты-носителя и разгонного блока.

**– Хотелось бы узнать некоторые подробности решения этой задачи.**

В 2002 году была разработана концепция поэтапного повышения грузоподъемности РН «Протон М» и РБ «Бриз М». Ставилась задача увеличить массу полезной нагрузки минимум на 1000 кг при выведении ее на геопереходную орбиту. Основным направлением повышения грузоподъемности средства выведения было снижение массы корпусных элементов ракеты-носителя, разгонного блока и головного обтекателя. Это было достигнуто за счет применения новых алюминиевых и магниевых сплавов, изготовления межбачковых отсеков и головного обтекателя из углепластика. Реализа-



ГКНПЦ им. М.В. ХРУНИЧЕВА

ция этих мероприятий была бы невозможна без использования детальных конечно-элементных моделей отсеков и баков, позволивших провести их облегчение и обеспечить углубленный анализ их прочности.

**– То есть главной причиной, способствовавшей переходу на компьютерные методы проектирования, стала постановка практической задачи?**

Правильнее было бы сказать, что жесткая конкуренция на международном рынке коммерческих запусков привела к качественному усложнению задач, решаемых с помощью компьютерных технологий. Так, например, применение высокопрочных алюминиевых сплавов для изготовления облегченных баков РН «Протон М», чувствительных к концентраторам напряжений, вызвало необходимость решения задач прочности с учетом реальных диаграмм деформирования металла. Для расчета напряженно-деформированного состояния оболочек в области сварных швов применялись подробные конечно-элементные модели, учитывающие реальные диаграммы нелинейного деформирования сплава для листов, плит, поковок и сварных соединений.

**– Позволит ли внедрение компьютерных методов проектирования отказаться от проведения натурных экспериментов?**

Проведение зачетных наземных стендовых испытаний при создании ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов является обязательным условием их допуска к

летной эксплуатации. Применение компьютерных технологий позволяет, во-первых, с высокой точностью прогнозировать величины разрушающих нагрузок конструкции и исключить проведение повторных испытаний, во-вторых, приблизить нагружение конструкции во время испытаний к реальным полетным условиям с помощью предиспытательного математического моделирования.

**– Как применяются сегодня новые компьютерные системы на этапе проектирования?**

ГКНПЦ им. М.В. Хруничева проходит сейчас этап внедрения системы сквозного компьютерного проектирования NX™, при применении которой разработанная конструктором трехмерная модель – от небольших деталей, кронштейнов и узлов до целых отсеков и топливных баков – может напрямую передаваться прочнистам для расчетов в NX Advanced Simulation. Им остается «набросить» на полученную модель сетку конечных элементов и провести необходимый анализ прочностных характеристик рассматриваемого объекта. Благодаря относительной простоте технологии расчета можно уделять большее внимание вопросам оптимизации конструкции. Внесение изменений в размеры отдельных деталей в среде NX Advanced Simulation уже не носит такого катастрофического характера, как это было раньше.

**– Какую роль при переходе на компьютерные методы проектирования сыграл фактор развития этого на-**

**правления в западных компаниях, выпускающих конкурирующую продукцию?**

Уже в середине семидесятых годов прошлого века западные машиностроительные компании имели опыт практического применения программных комплексов высокого уровня, например, комплекса NASTRAN, который был специально разработан NASA для аэрокосмической промышленности. Мы понимали, что применяемые на Западе методы математического моделирования позволяют значительно быстрее и эффективнее создавать современные самолеты и ракеты-носители. У российских аэрокосмических и авиационных предприятий имелись отдельные отечественные программы, использующие метод конечного элемента, однако они имели недостатки, касающиеся в основном автоматизации подготовки расчетных моделей и наглядности представления результатов расчетов. После получения возможности использования сертифицированных программных комплексов NASTRAN, MARC, I-DEAS их освоение и практическое применение в КБ «Салют» произошло достаточно быстро и весьма удачно совпало с периодом модернизации ракеты-носителя «Протон» и созданием перспективного семейства ракет-носителей «Ангара».

**– Когда в России появились первые расчетные программы, использующие метод конечных элементов?**

Первые отечественные программные продукты, использующие метод



ГКНПЦ им. М.В. Хруничева

«Жесткая конкуренция на международном рынке коммерческих запусков привела к качественному усложнению задач, решаемых с помощью компьютерных технологий»

Сергей Петроковский,  
ГКНПЦ им. М.В. Хруничева

конечных элементов, появились во второй половине семидесятых годов прошлого века. Лично у меня был опыт практического внедрения в расчетную практику КБ «Салют» программы «Отсек», разработанной третьим отделением ЦАГИ под руководством д.т.н. Замулы Г.Н. У первой версии этой программы не было графической части, поэтому все операции по подготовке исходных данных и обработке результатов расчетов приходилось делать вручную. Тем не менее ее освоение инженерами-прочниками имело революционное значение с точки зрения дальнейшего внедрения методов математического моделирования при проектировании ракетно-космической техники.

**– Возникло ли что-то качественно новое после перехода на компьютерные методы проектирования?**

Во-первых, появилась возможность оптимизации практически всех конструктивных элементов ракет-носителей и космических аппаратов. Во-вторых, повысился уровень анализа прочности и устойчивости проектируемых элементов конструкции, позволяющий с хорошей точностью прогнозировать величины разрушающих нагрузок. В-третьих, предиспытательное математическое моделирование нагружения конструкций при статических и динамических стендовых испытаниях снизило вероятность их преждевременного разрушения по вине испытательного оборудования.

**– Возникают ли в процессе проектирования задачи, решение которых не ограничивается применением компьютерных методов, требуя также определенного искусства?**

Конечно, не все этапы проектирования ракетно-космических конструкций связаны с применением компьютерных методов моделирования. Это, например, касается выбора рациональных конструктивно-силовых схем, обеспечивающих одновременное решение комплекса функциональных задач или создания принципиально новых конструкций. Здесь в первую очередь работает фантазия и интуиция, опирающиеся на опыт и квалификацию. Безусловно, в дальнейшем идеи проверяются с помощью математических моделей.

**– Чем отличается процесс разработки, если в конструкции ракеты-носителя или космического аппарата применяются композиционные материалы?**

Как я уже говорил, композиционные материалы со своими физико-механическими характеристиками появляются в процессе изготовления изделия. Их жесткостные и прочностные характеристики зависят не только от исходных свойств применяемых волокон и схем армирования, но также от технологии изготовления. Для конструкций из композиционных материалов необходимо разрабатывать специальные программы обеспечения качества их изготовления, включающие в себя

различные виды испытаний, начиная с простейших образцов и заканчивая сдаточными и партионными испытаниями полноразмерных отсеков. Весь процесс создания конструкций из композиционных материалов сопровождается математическим моделированием с использованием как специализированных программ, так и универсальных программных комплексов.

**– Современные станки позволяют эффективно использовать достоинства программных технологий. Учитывается ли это при проектировании?**

Компьютерные методы расчета металлических баков и межбаковых отсеков ракет-носителей и разгонных блоков позволяют с высокой точностью определять минимально допустимые толщины обечаек, геометрические размеры вафельного подкрепления, площади стрингеров, гарантирующие надежность средств выведения космических аппаратов при наземной эксплуатации и в полете. Современные станки и обрабатывающие центры в состоянии обеспечить заданные в конструкторской документации размеры с минимальными допусками на изготовление и тем самым способствовать снижению массы корпусных элементов ракет-носителей и разгонных блоков. Например, использование высокоточного обрабатывающего центра позволило уменьшить массу вафель-



ных обещаний баков второй ступени ракеты-носителя «Протон М» более чем на 100 кг.

**– Можно ли добиться резкого скачка в развитии процесса разработки ракетно-космической техники?**

Это слишком общий вопрос. Если говорить об основной характеристике ракет-носителей и разгонных блоков – грузоподъемности, то ее можно и нужно повышать, двигаясь одновременно по разным направлениям. Это применение современных высокопрочных алюминиевых и магниевых сплавов, использование углепластиковых композиционных материалов, модернизация и форсирование двигателей установок, уменьшение массы приборов и оборудования, применение высокоточных станков и обрабатывающих центров и т.д. Основой для реализации всех этих мероприятий является использование современных методов математического моделирования в области прочности, тепловых процессов, аэрогазодинамики, управления.

**– Развитие ИТ неминуемо ведет к тому, что появляются огромные массивы данных, которыми надо управлять. Как вы решаете этот вопрос?**

Этот вопрос напрямую касается использования PLM-системы Siemens PLM Software – Teamcenter®. Естественно, процессом сбора данных нужно управлять, иначе получится свалка. Данные

требуются не просто складировать, надо организовать правильный доступ к ним, контролировать приоритеты, затрагивающие допуск и внесение изменений. Решение этой задачи не является революционным прорывом. Это каждодневная необходимость. Надо просто выбрать правильное программное решение и применить его в наших конкретных условиях.

**– Внедрение новых технологий происходит через локальные точки или путем массированного перевооружения всего предприятия?**

Точечно и только точечно. Действовать широким фронтом, как правило, не получается. Во-первых, требуется обучение сотрудников, которое проводится всегда группами. Во-вторых, надо учитывать, что люди воспринимают новую информацию по-разному. В любой компании всегда есть как высоко-, так и низкоквалифицированные работники. Поэтому проникновение новых технологий происходит выборочно. В КБ «Салют» в настоящее время наиболее успешно идет внедрение именно расчетных решений Siemens PLM Software.

**– Избирательный подход касается также и выбора программных продуктов?**

Это непростой вопрос. Мы видим преимущества продуктов компании Siemens PLM Software. Но при этом продолжаем поддерживать контакты с

другими компаниями, продуктами которых мы активно пользовались ранее. Решения Siemens PLM Software позволяют эффективно интегрировать этот опыт. Однако мы понимаем, что в итоге необходимо выбрать один продукт глобального масштаба. Он должен в будущем связать все сегменты. Эту задачу может решить NX Advanced Simulation.

**– Каким образом можно ускорить процесс внедрения программных технологий?**

В ближайшее время показать пример использования PLM-технологии при разработке конкретного изделия с привлечением к этому процессу необходимого минимума обученных квалифицированных специалистов. А дальше четко применять армейский принцип: «Не можешь – научим, не хочешь – заставим». «

Интервью записал  
**Игорь Новиков**

Внештатный корреспондент