

Как я моделировал космический аппарат многоразового использования с помощью T-FLEX CAD

Александр Макаров

В статье подробно описывается процесс создания МКА в системе 3D-моделирования и конструкторской подготовки производства T-FLEX CAD — от наброска на бумаге до готовой параметрической 3D-модели.

Общая идея заключалась в создании модели беспилотного многоразового космического аппарата для вывода полезной нагрузки на низкую околоземную орбиту, эффективно используя при этом максимально разнообразные инструменты T-FLEX CAD. Опустим инженерные расчеты, но, по задумке, аппарат должен быть примерно в два раза меньше «Шаттла» и «Бурана» (общая длина 13 660 мм), но массивнее как

старых проектов, вроде «МиГ-105» и X-20 Dyna-Soar, так и относительно новых, вроде «Клипера», Dream Chaser и Boeing X-37. Скорее, по габаритам он близок к орбитальному самолету нереализованного европейского проекта Hermes без так называемого ресурсного модуля. Вывод полезной нагрузки предполагался, «как в Шаттле»: с помощью манипулятора через раскрываемые створки, а «беспилотность» позволила бы увеличить объем грузового отсека и снизить массу за счет отсутствия систем жизнеобеспечения.

Запуск планировалось осуществлять как в качестве ступени традиционной ракеты вертикального взлета, так и с помощью сверхзвукового самолета-разгонщика, причем второй, экзотический способ был бы даже интереснее с точки зрения инженерного дизайна.

Изначально было сделано множество эскизов, определяющих облик и общую конструкцию как самого аппарата, так и его носителя (рис. 1).

Модель задумана как полностью зависимая от ссылочной геометрии. Был создан разметочный файл, содержащий геометрию, определяющую облик аппарата, — на нее ссылаются большинство элементов каркаса и обшивки. С помощью нового функционала работы со сплайнами были созданы профили (рис. 2), настроена гладкость, указаны граничные условия (рис. 3). Однако основным инструментом определения линейной геометрии и формирования размерных цепочек был базовый в T-FLEX CAD механизм линий построения.

Применялись почти все основные команды работы с поверхностями, но главным, формообразующим



Александр Макаров, ведущий специалист отдела внедрения ЗАО «Топ Системы»

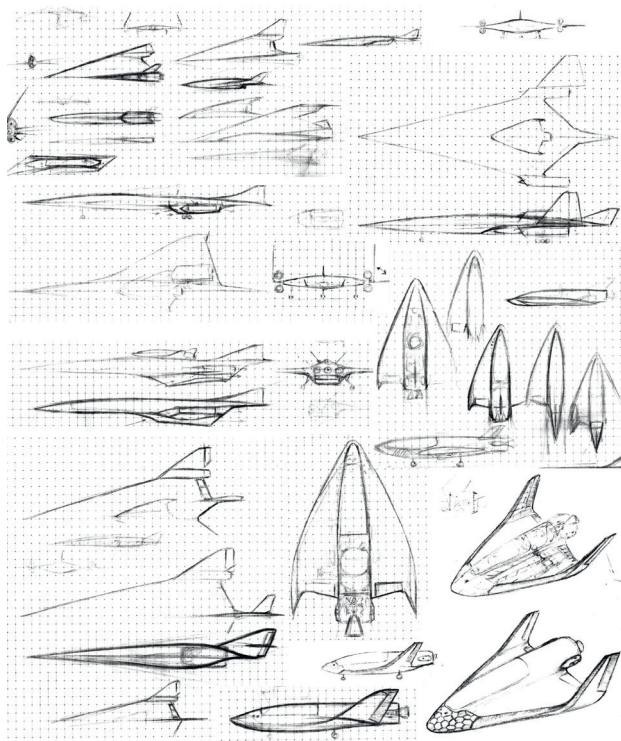


Рис. 1. Коллаж из очень малой части карандашных эскизов

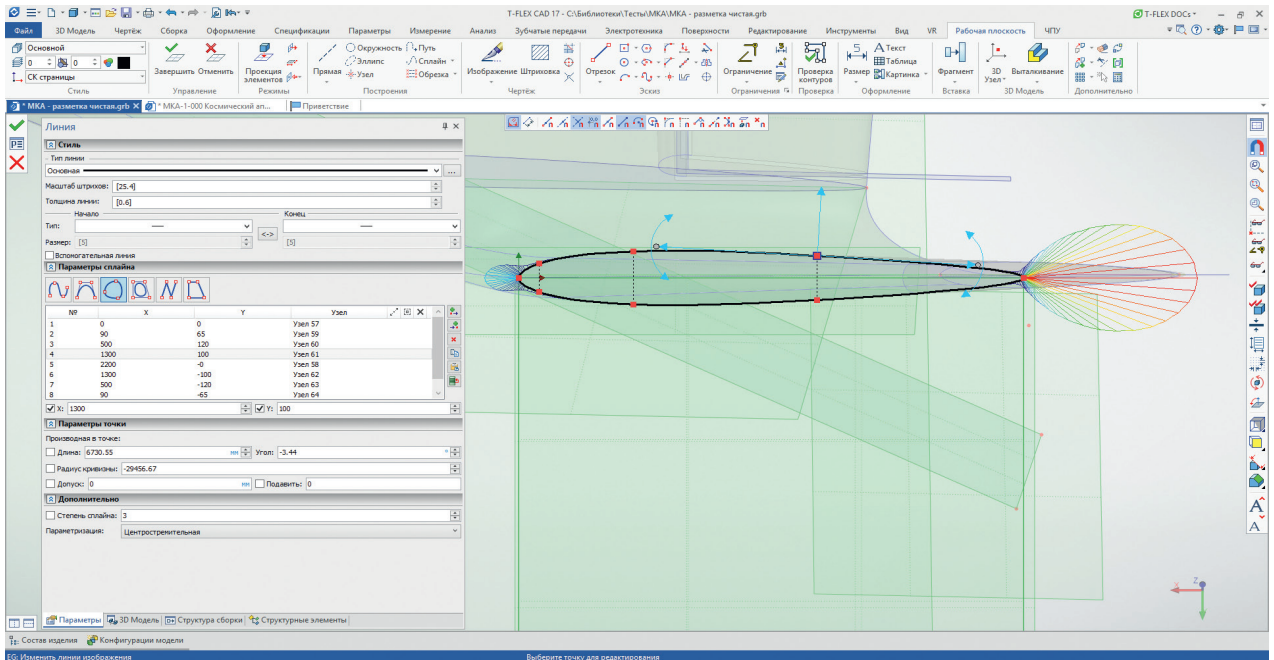


Рис. 2. Построение профиля с помощью сплайнов

инструментом оказалось *Тело по сечениям*. Законцовки килей созданы переходной поверхностью (рис. 4).

Каркас состоит из шпангоутов, лонжеронов и стрингеров. Все они ссылаются на базовые поверхности в разметочном файле (рис. 5). Для удобства в тоновой закраске все элементы конструкции окрашены в разные цвета в зависимости от материала: голубой — алюминий, синий — титан, темно-синий — сталь, зеленый — углекомпозит и т.д. Позже отдельные цвета назначены на отдельные узлы и механизмы, а также на трубопроводы, электропроводку и композитные элементы теплозащиты. С помощью инструментов эквидистантно-го создания 3D-путей по элементам каркаса размечены пути для отверстий под крепеж. Разумеется, взаимные зависимости элементов каркаса продуманы заранее, дабы избежать рекурсий. Сами отверстия просверлены по массиву

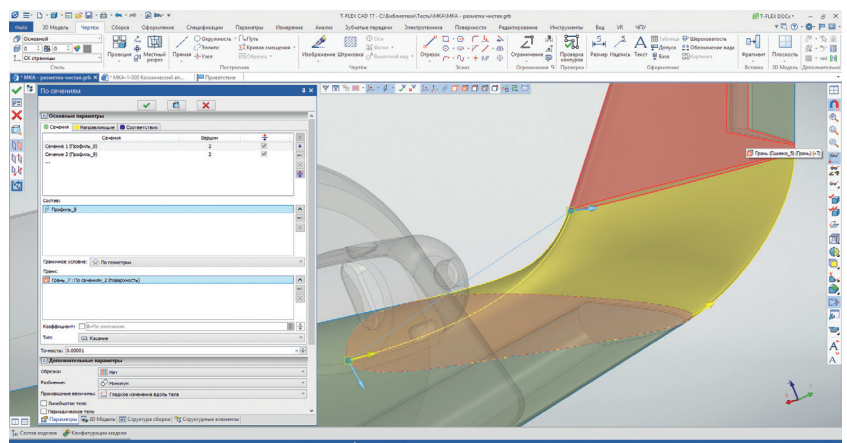


Рис. 3. Граничные условия по сечениям

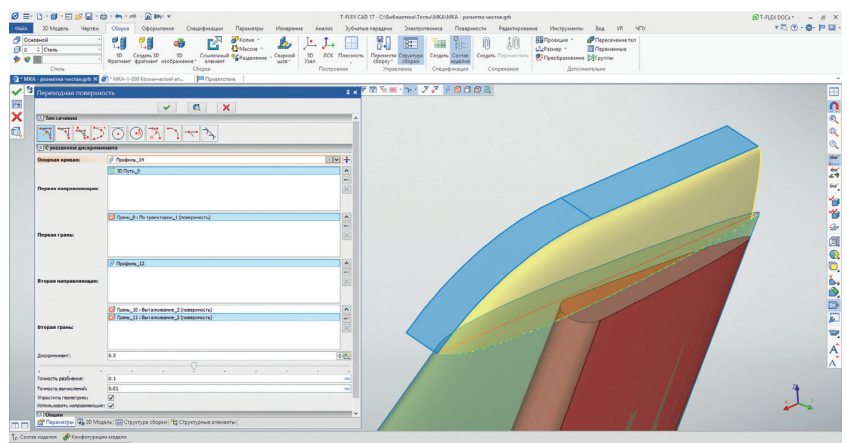


Рис. 4. Построение законцовки килей

3D-узлов, расположенных на путях с определенным шагом.

Нервюры аппарата составные, то есть состоят из верхнего и нижнего

поясков и стоек с композитными стержнями, работающих на усилия растяжения и сжатия. Каждый поясok моделировался как секция

крыла между двумя плоскостями и вырезом-выталкиванием, поэтому, чтобы получить следующий поясok, нужно просто сдвинуть базовую рабочую плоскость на длину секции, и только потом настроить позиции отверстия под длины стержней (рис. 6). Это значительно сократило время работы.

Рассверливание отверстий нервюры производилось, преимущественно ссылаясь на отверстия шпангоутов (с помощью механизма указания соосности в команде *Отверстие*), которые размечались по координатам на самих шпангоутах.

Лонжероны секции изгиба крыла моделировались довольно оригинальным способом — они отсекались плоскостью на основе путей, построенных по изопараметрическим кривым.

Особо стоит сказать про кромку крыла, моделирование которой заняло значительную часть времени (рис. 7).

Кромка крыла — набор нетривиальных сборок секций, размеченных по общим обводам, но крепящихся к первому лонжерону крыла через специальные стальные кронштейны, разметка которых подбиралась вручную, дабы обеспечить собираемость конструкции и возможность замены секций в случае их деформации или износа. Между секциями предусмотрены специальные вставки, а в несущем лонжероне крыла — монтажные окна. Также есть различия и в способах крепления термостойких секций к лонжерону, к титановым пластинам носовой обшивки и композитному колпаку обтекателя, но сделано так местами не столько из инженерных соображений, сколько

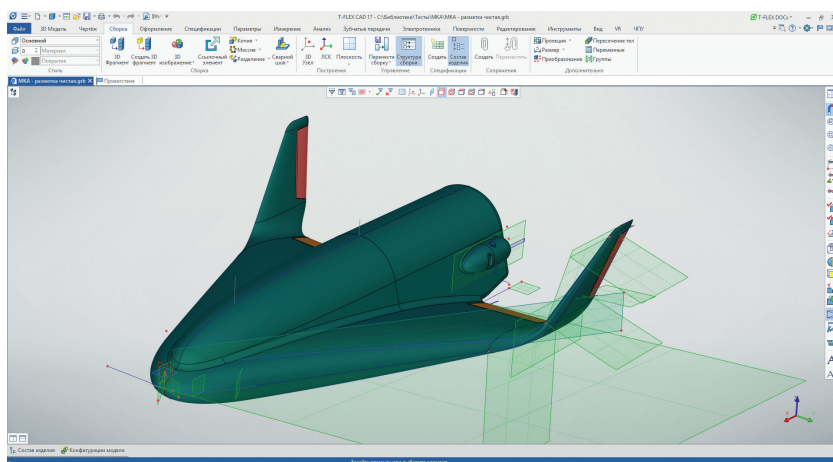


Рис. 5. Разметочная модель с набором рабочих плоскостей

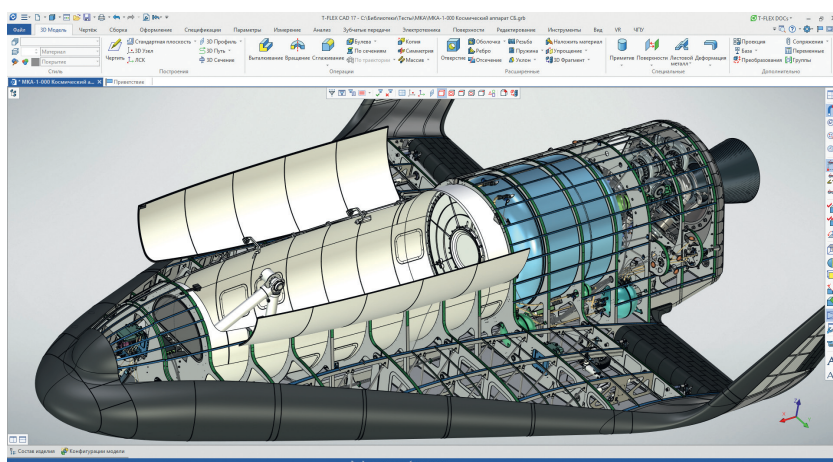


Рис. 6. Аппарат со снятой верхней обшивкой, изоляцией и теплозащитой

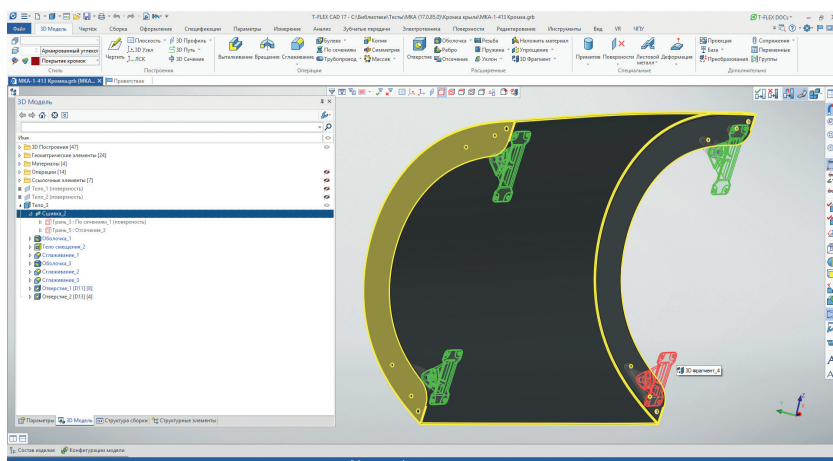


Рис. 7. Секция кромки

ко для отработки методик работы с большими сборками (рис. 8).

Элементы механизации крыла похожи на самолетные по методикам построения модели, однако имеют ряд конструктивных особенностей: разметочная геометрия обработана с отступом под изоляцию и теплозащиту, а внутри конструкции — сотовый наполнитель, состоящий из более чем 8 тыс. элементов (рис. 9)

В топливную систему входят баки топлива и окислителя, баки наддува, трубопроводы и система клапанов (рис. 10). Основные баки крепятся на специальных кронштейнах, состоящих из цапф и подкосов, — их взаимное расположение было заранее размечено, а детали баков были, как правило, несложными моделями, сделанными вращением профиля вокруг оси. А вот двигатель представляет собой значительно переработанную модель ранее смоделированной двухкамерной

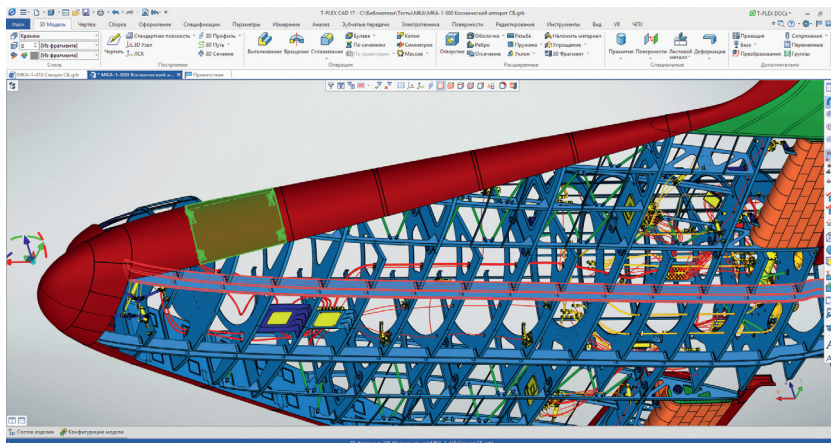


Рис. 8. Подсветенная секция теплозащиты крыла

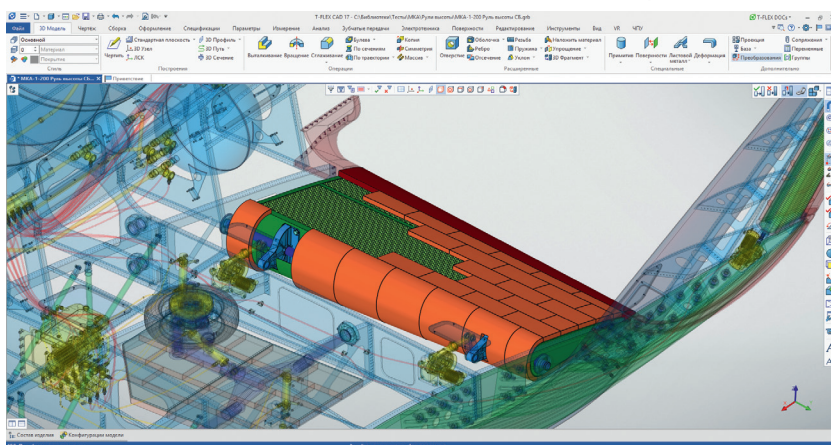


Рис. 9. Элевон в контексте сборки

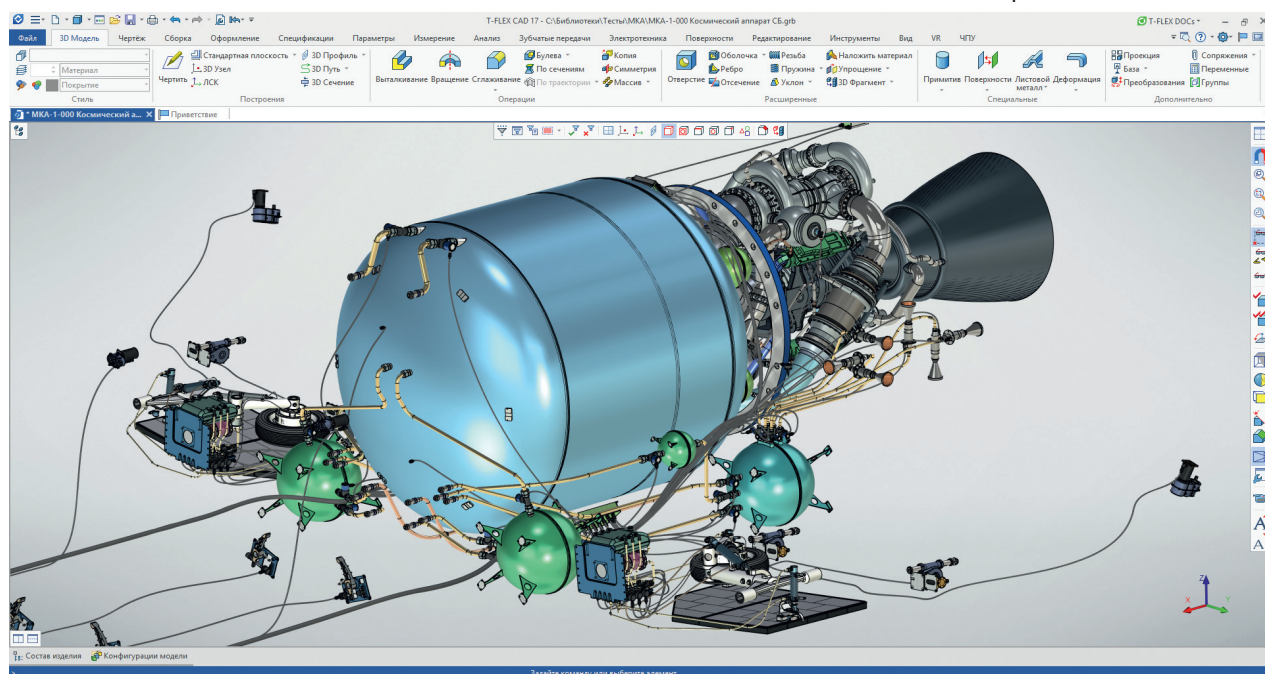


Рис. 10. Двигательная установка и баки. Каркасные элементы погашены

модели двигателя (условный аналог РД-180) в однокамерную модификацию с коррекцией почти всех узлов и деталей, а также с

заново проложенными траекториями трубопроводов.

Задняя панель, огораживающая сопло маршевого двигателя ДУ, —

довольно «тяжелая» модель, из 86 геометрических операций, полученная путем отсечения базовой геометрии и дальнейшей обработки с помощью операций *Оболочка*, *Тело смещения*, *Сглаживание* и расстановкой *Отверстий* (рис. 11). Модель крепится к заднему шпангоуту через шпильки, вкрученные в специальные впрессованные втулки. На ней же расположены отверстия со стальными втулками для установки двухсекционного кожуха, обеспечивающего замену отработавшего ресурс двигателя силами бригады умелых рабочих.

Гондолы рулевых двигателей, помимо двух шпангоутов, состоят из трех панелей обшивки: двух композитных и одной алюминиевой (рис. 12). В качестве маневровой ДУ используется набор из конструктивно простых двигателей, работающих на однокомпонентном топливе. Соответственно, под них тоже сделаны отдельные баки с системой наддува, разводкой трубопроводов и электропроводки, а также блоками управляющих клапанов. Кроме того, специально сконструирован механизм открытия предохранительной крышки для передних двигателей.

Коммуникации топливной и вспомогательных гидравлических систем разведены стандартным механизмом создания трубопроводов по трассам в контексте сборки, а вот электрическая разводка полностью сделана с помощью модуля *Электротехника* (рис. 13). В качестве соединителей использовались доработанные библиотечные соединители, подключаемые к электрическим блокам непосредственно в сцене с последующей правкой траек-

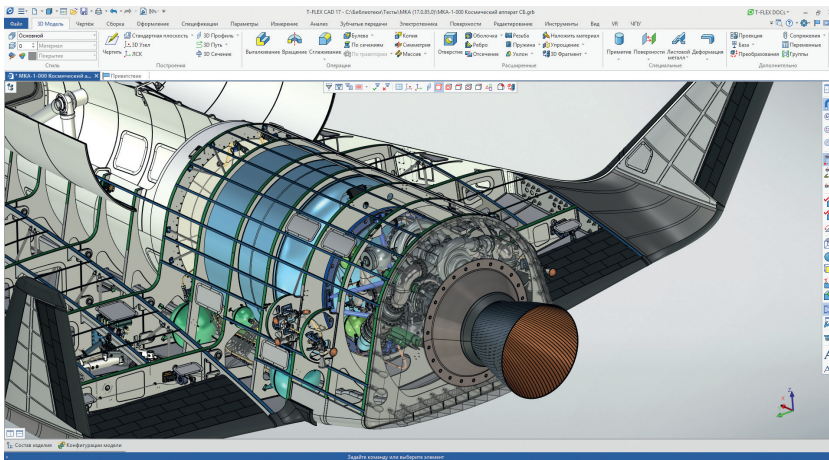


Рис. 11. Вид на ДУ сзади с погашенной обшивкой

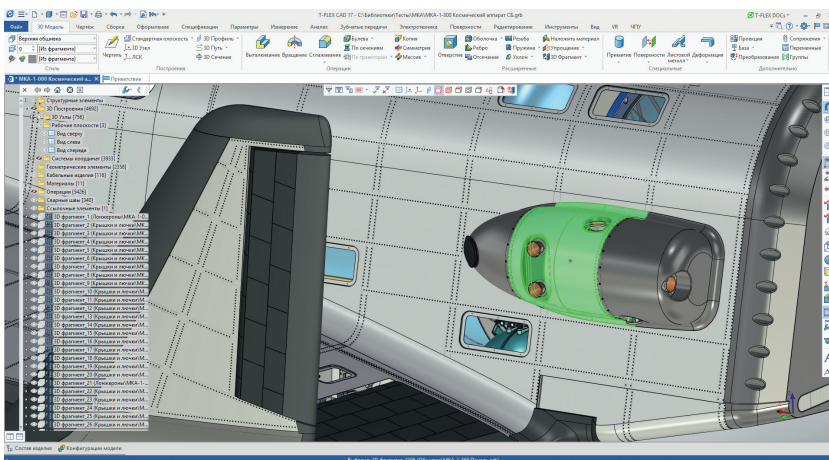


Рис. 12. Гондолы маневровых двигателей

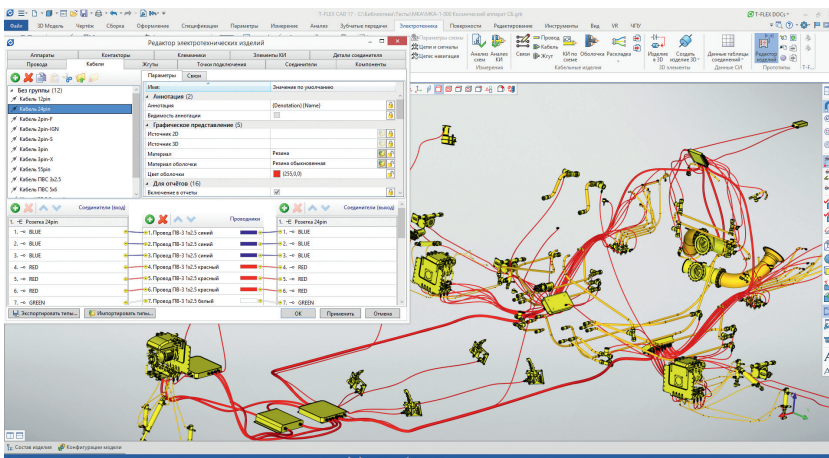


Рис. 13. Разводка электрики, трубопроводы и окно модуля *Электротехника*

тории проводки по отсекам. Для этого были заранее подготовлены специальные скобы с опорными внешними 3D-узлами, крепящиеся к каркасным элементам.

Шасси переработано из самолетного, однако механизм открытия створок доработан с учетом толщины обшивки: ведь в случае с космическим аппаратом на створке расположен еще и относительно толстый слой плиток теплозащиты. Кроме того, под шасси собраны компактные блоки приводов (рис. 14), состоящие из электромотора, гидрораспределителей, бачка и блока клапанов.

Манипулятор для вывода полезной нагрузки сделан заранее (рис. 15), даже отдельно от всего аппарата, и только позже доработан под установку внутри грузового отсека. Было создано несколько вариантов с разными длинами штанг и вывернутым захватом, расставлены манипуляторы для удобного доворота штанг на нужный угол. В основной модели рука манипулятора может складываться по переменной.

Обшивка из алюминиевого листа (рис. 16), разумеется, тоже нарезалась с разметочного файла: командой *Тело смещения* задавался отступ от базовой поверхности. Многочисленные заклепочные швы реализованы через ссылочную геометрию, базовая геометрия для шва — 3D-путь и первый 3D-узел на нем, взятые с соответствующего каркасного элемента. Далее, с помощью команд *Массив по пути* и *Отверстие по массиву* формировался сам шов. В панелях прорезались окна под створки шасси, технические лючки и т.д.

Некоторые лючки должны быть утоплены в криволинейных панелях, окна для них проецировались на панель как 3D-профиль, а затем с помощью нескольких

команд *Выталкивание* и *Оболочка* (с указанием требуемых толщин граней) формировалась утопленная область под крышку. С помощью команды *Кривая смеще-*

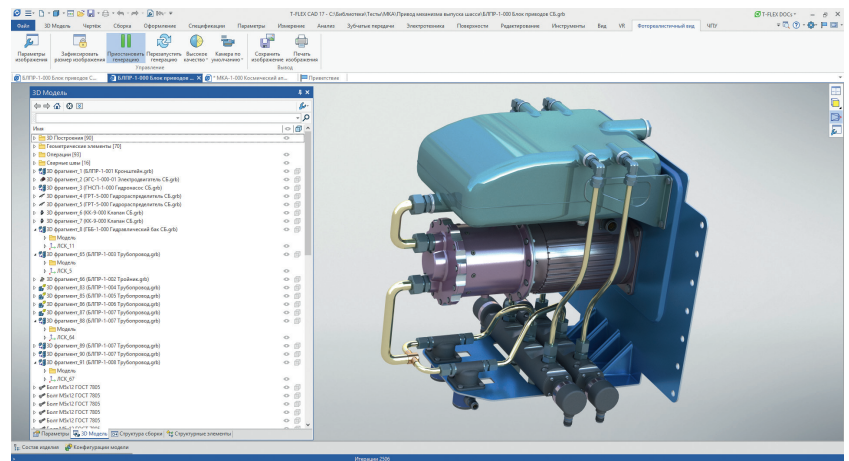


Рис. 14. Фотореализм блока приводов

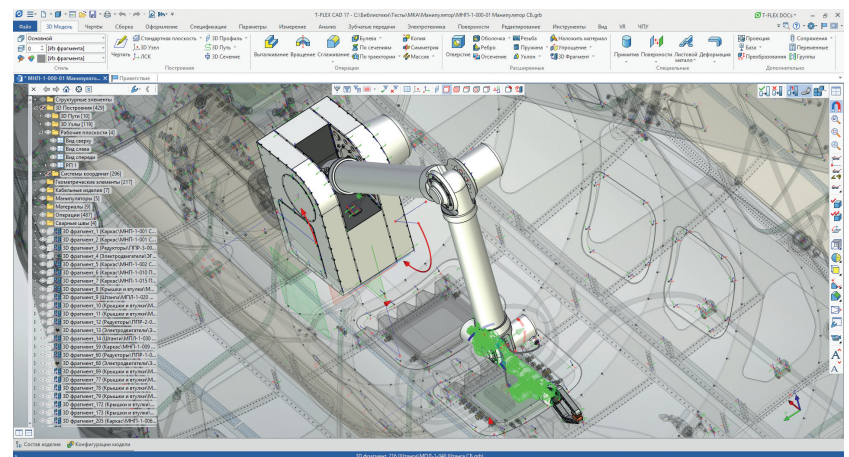


Рис. 15. Манипулятор в контексте сборки

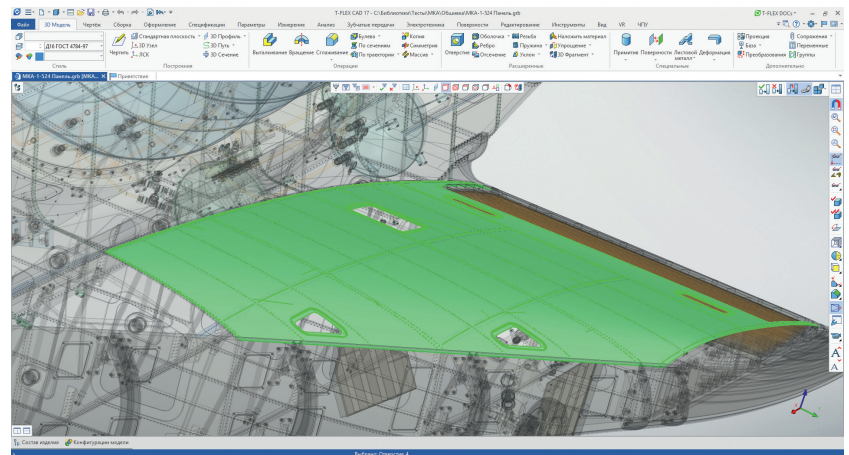


Рис. 16. Лист обшивки в контексте сборки

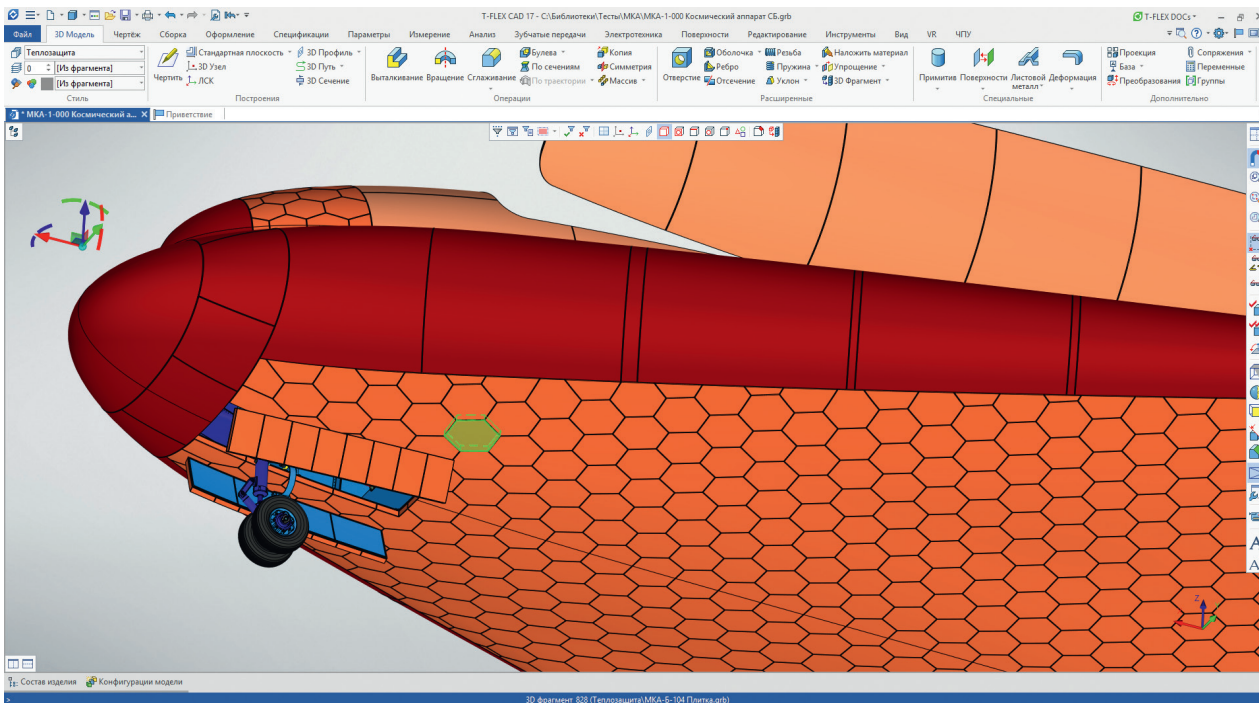


Рис. 17. Теплозащитная плитка нижней части аппарата

ния к 3D-кривой на поверхности формировался путь, по которому должны быть рассверлены крепежные отверстия. Подобный способ особенно хорошо зарекомендовал себя при работе с панелями из композитных материалов.

Поверх обшивки укладывался аналогично моделируемый слой изоляции — три вида теплозащиты: самый толстый слой на носу, а так-

же «под брюхом» и снизу крыла (рис. 17). Плитки теплозащиты нарезались индивидуально: с учетом симметрии получилось 1260 плиток. Разумеется, все слои облицовки формировались с заранее рассчитанным значением отступа от разметочных поверхностей.

Заклепочный крепеж, а также болты крепления секций передней теплозащиты вставлялись с помощью интеллектуальной операции

Массив по образцу, когда пользователь указывает только один крепежный элемент и массив отверстий для вставки, а система самостоятельно расставляет крепеж по всей модели.

Все фрагменты сборки разнесены по 21 слою для удобства работы и презентации (рис. 18).

Всего в модели получилось около 28 600 тел, в модели с заклепками — 72 640 тел. Конфигурация компьютера, на котором производилась работа: Intel Core i7 7700, 3.6GHz, 32 Гб ОЗУ, NVIDIA GeForce GTX 1060 3 Гб. Процесс создания модели доставил массу удовольствия и позволил еще лучше оценить потенциал T-FLEX CAD при комплексной работе со сборками средней сложности. 🚀

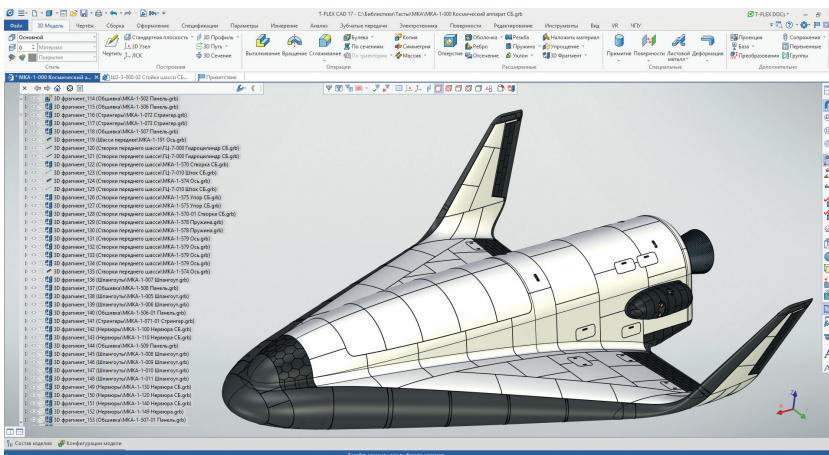


Рис. 18. Общий вид аппарата с закрытыми створками грузового отсека

Демонстрацию модели смотрите на нашем YouTube-канале T-FLEX PLM <https://www.youtube.com/user/TopSystemsLTD>