

УДК 629.782.01

## **Использование виртуального пространства для проведения макетно-конструкторских испытаний по электронному макету космического аппарата**

**Поляков А.А.\*, Защирицкий С.А.\*\***

*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, Ленинградская ул., 24,  
Химки, Московская область, 141402, Россия*

*\*e-mail: alexey.polyakov@laspase.ru*

*\*\*e-mail: [zsa@laspase.ru](mailto:zsa@laspase.ru)*

**Статья поступила 18.07.2019**

### **Аннотация**

Представлены основные принципы работы во внедряемой в АО «НПО Лавочкина» методике проведения макетно-конструкторских испытаний с использованием электронного макета космического аппарата.

**Ключевые слова:** макетно-конструкторские испытания, виртуальное пространство, электронный манекен, PLM-система, Siemens Teamcenter, Siemens NX, электронный макет изделия.

### **Введение**

Создание космических аппаратов в современных условиях требует от разработчика как проведения глубокого инженерного анализа в различных областях, так и проведение большого объема испытаний в условиях близких к летным с имитацией различных воздействующих факторов.

Подготовка и проведение испытаний опытных макетов космического аппарата являются одним из важнейших и дорогостоящих этапов создания космической техники. Для оценки соответствия, разрабатываемого космического аппарата (КА) требованиям технического задания на предприятии создаются макеты, которые по своим характеристикам в зависимости от вида испытания должны соответствовать летному КА.

Экспериментальная отработка, являясь естественным продолжением проектирования аппарата, завершает процесс создания КА. Однако она является не только конечным звеном, но и самым тесным образом переплетается с этапами проектирования. С появлением развитых программных средств имитационного моделирования на авансцену вышла концепция системно – ориентированного проектирования, основанная на применении системы виртуальных объектно-ориентированных моделей для построения основной цифровой имитационной модели космического изделия.

Описанные подходы позволяют проводить испытания, в том числе модельные, с помощью которых можно с достаточной вероятностью определить эксплуатационные параметры КА и резервный ресурс по каждому из них для того, чтобы принять решение о готовности устройства к дальнейшему использованию без лётно-конструкторских испытаний (ЛКИ) или с существенным сокращением затрат на ЛКИ. Естественно, что при этом основную роль начинает играть моделирование, в том числе имитационное, и оценка его результатов с помощью современных способов обработки информации.

При проектировании каждого КА учитываются не только теоретические предпосылки, но также и опыт создания других КА, опыт их отработки, результаты проведенных при этом исследований. Однако этого опыта подчас оказывается недостаточно, особенно при проектировании новых аппаратов, существенно отличающихся от предшествующих и по объему и уровню решаемых задач, и по предъявляемым к ним требованиям, выполнение которых далеко не всегда возможно с помощью известных, хорошо отработанных схемных и конструктивных решений. (Колесников А.В., 2007)

Наземная экспериментальная отработка (НЭО) макетов, в целях проверки и отработки технических решений, разделена на следующие виды испытаний:

- макетно-конструкторские;
- антенные испытания;
- прочностные испытания, статические и динамические (вибрации) при нагружениях;
- тепловакуумные;
- электрорадиотехнические;
- аэродинамические;
- бросковые;
- гидравлические;
- огневые;
- транспортные испытания.

Очевидно, что задачи экспериментальной отработки аппарата могут быть в полной мере решены лишь в том случае, когда она завершается испытаниями аппарата, в наименьшей степени отличающегося от штатного образца, в натуральных условиях, т.е. летными испытаниями [1].

В данной статье последовательно рассмотрены цели и задачи, предъявляемые при проведении макетно-конструкторских испытаний в соответствии с ГОСТ, а также программные и технические средства, позволяющие перевести проведение испытаний в виртуальное пространство.

## **1. Макетно-конструкторские испытания**

Одними из первых на изделии проводятся макетно-конструкторские испытания, предназначенные для определения правильности конструкторских решений, заложенных в документации.

Целями макетно-конструкторских испытаний являются:

- объемное макетирование;
- проверка правильности конструктивных решений;
- отработка монтажа, эталонирование бортовой кабельной сети и пневмогидрокоммуникаций;
- проверка технологичности изготовления изделия и последовательности проведения сборочных работ, в том числе проверка технологического оборудования при проведении работ с КА в цехе окончательной сборки;
- проверка правильности размещения КА в транспортировочном контейнере.

Задачами макетно-конструкторских испытаний являются:

- уточнение основных базовых и конструктивных размеров;
- определение взаимного положения комплектующих изделий и элементов конструкции;
- определение конфигурации и длины кабелей при прокладке, мест их крепления и свободных длин соединителей связи элементов конструкции;
- оценка возможности обеспечения заданной точности, установки и юстировки аппаратуры;
- определение конфигурации и размеров трубопроводов;
- оценка размеров и конфигурации матов экранно-вакуумной теплоизоляции и элементов их крепления;
- проверка зон обзора оптических датчиков;
- проверка удобства работы с электрическими соединителями, ремонтпригодности;
- проверка правильности выполнения посадочных мест;
- корректировка рабочей документации на КА;
- оценка зазоров между сопрягаемыми элементами конструкции и комплектующими изделиями.

Создаваемый для проведения макетно-конструкторских испытаний «конструкторский макет» (Рисунок 1), может изготавливаться по отдельной

документации, при этом допускается использовать в макетном исполнении блоки приборов, макеты кабелей БКС и макеты разъемов. Изготовление составных частей и сборка макета в целом есть процесс трудоемкий и связан с поставками макетов приборов от смежных организаций, а для составных частей изготовления АО «НПО им. С.А. Лавочкина» процесс изготовления макета завязан на поставки материалов и покупных изделий. В среднем процесс изготовления и сборки конструкторского макета составляет до полугода.



Рисунок 1. Конструкторский макет КА «Луна-Глоб»

в цехе АО «НПО им. Лавочкина»

Для проведения макетно-конструкторских испытаний формируется макетная комиссия, которая проводит работы в соответствии с программой-методикой

испытаний. При этом для обеспечения работы комиссии по макетированию предоставляется (как показано в программе-методике макетно-конструкторских испытаний на изделие Экзо-Марс):

- изделие (агрегат изделия) или его части, установленные на свои технологические стенды сборки;
- стенд обслуживания изделия (агрегата изделия) и средства, обеспечивающие доступ к зонам осмотра и обслуживания изделия;
- технологическое оборудование, обеспечивающее сборку изделия и оценку достаточности зазоров;
- технологическое и эксплуатационное оборудование, используемое по штатной технологии или плану подготовки изделия к штатной эксплуатации;
- необходимое такелажное и подъемно-транспортное оборудование.

## **2. Использование виртуальной среды для проведения макетно-конструкторских испытаний**

Развитие средств вычислительной техники и программных средств, позволяющих создавать электронные макеты полностью соответствующие разрабатываемым изделиям в части геометрии, массово-инерционных характеристик, соответствия применяемых материалов и др., позволяет говорить о применении виртуальной среды для ухода от некоторых видов натуральных испытаний. Электронные макеты изделий позволяют отказаться от натуральных моделей, при этом позволяя моделировать виртуальную среду, которую не всегда можно реализовать при натуральных испытаниях.

Электронный макет это результат работы конструкторов, содержащий полное описание конструкции детали, узла или агрегата: 3D-геометрия, технологическая информация (базы, размеры с допусками, шероховатости и др.), технические условия. Входящие в состав электронного макета электронные модели соответствует обозначению детали в конструкторской спецификации; модель содержит только окончательный на текущий момент времени вариант детали, полученной по ассоциативной ссылке на модель. В электронную модель могут входить и другие необходимые документы (описания, результаты расчётов, акты испытаний, эксплуатационная документация, директивная технология и т.д.).

Вполне логично, что одним из первых видов испытаний, проведение которых можно было бы обеспечить в виртуальной среде, являются макетно-конструкторские испытания. При этом в интересах изготовления Электронного конструкторского макета не требуется распространение конструкторской документации или выпуск отдельного комплекта чертежей на макет, электронный макет изделия должен соответствовать штатной КД.

Для создания электронного конструкторского макета такого изделия, как космический аппарат (с количеством элементов более 50 тысяч) необходимо применение технологии «Электронного макета» с использованием мощной CAD системы и PLM высшего уровня, таких как система Siemens NX под управлением PLM системы Teamcenter, применяемых в АО «НПО им. Лавочкина» [5]. Вышеуказанные программные средства позволяют не только создать электронную модель в соответствии с определением ГОСТ 2.052-2015, но и, используя штатный

функционал этих программ реализовать задачи программы-методики испытаний в соответствии с ГОСТ.

Очевидно, что наибольшим достоинством использования электронного макета КА является отсутствие необходимости создания материальной части в её привычном представлении в виде физических узлов и агрегатов, из которых впоследствии собирается изделие для макетно-конструкторских испытаний. Создаваемая трехмерная модель КА позволяет фактически сократить сроки за счет отказа от работ, проводимых опытным заводом по изготовлению физических макетов составных частей и сборке макета КА в целом. Электронный макет создается практически параллельно разработке и выпуску конструкторской документации (КД), а значит, к испытаниям можно приступить практически сразу после завершения выпуска полного комплекта. Этапность макетирования, связанная с необходимостью проведения последовательности сборочных операций от составных частей к окончательному изделию, соблюдая последовательность сборки в соответствии с технологическим процессом, при макетировании по электронной модели решается программными средствами без временных затрат на заводские операции. Кроме того при электронном макетировании отсутствует проблема с длительной поставкой комплектующих и материалов, так как и то и другое легко моделируются.

Задачи макетно-конструкторских испытаний в электронной среде решаются штатными средствами САД системы, обеспечивая при этом более точное и однозначное заключение по данным вопросам, чем при испытаниях на матчасти. К

примеру, Siemens NX, как и многие CAD системы позволяет в реальном времени оценивать и контролировать характеристики по массе показателей центровки и моментов инерции (Рисунок 2), что при макетировании на физическом макете является проблематичным из-за возможности применения материалов и макетов не соответствующих по массово-инерционным характеристикам штатному изделию.

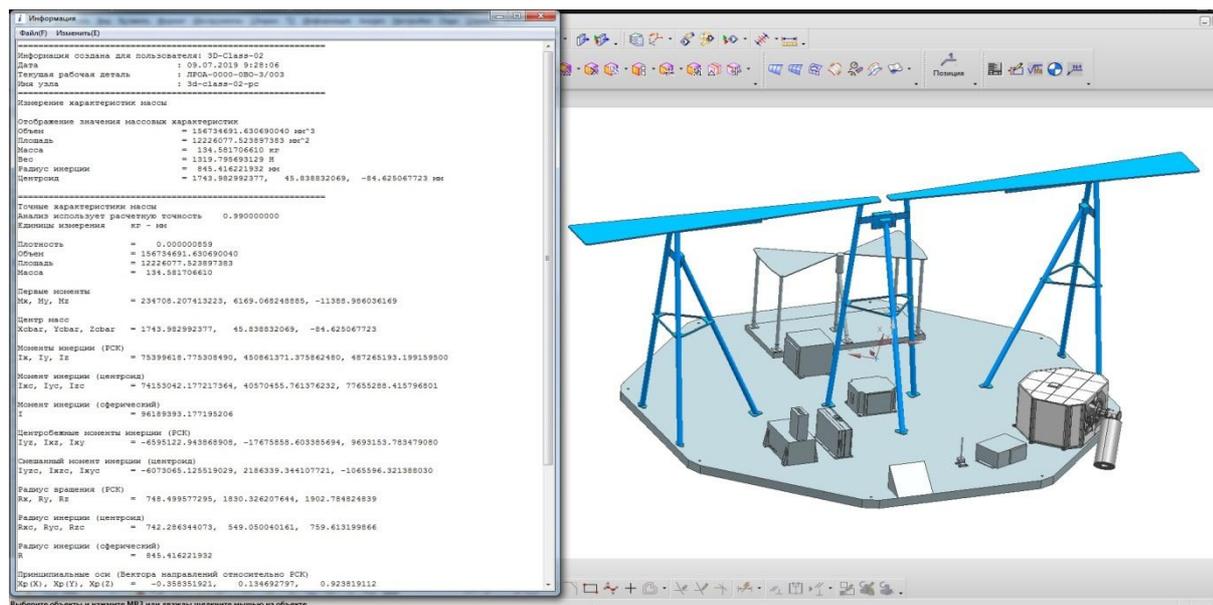


Рисунок 2. Определение массово-инерционных характеристик средствами Siemens NX

Задача по проверке зон обзора оптических датчиков решается моделированием зон видимости (Рисунок 3), позволяя однозначно определить, находятся ли в этой зоне элементы конструкции или приборы КА или нет. Так же в любой момент времени решается задача по определению длин кабелей и межблочным расстояниям (Рисунок 4, Рисунок 5).

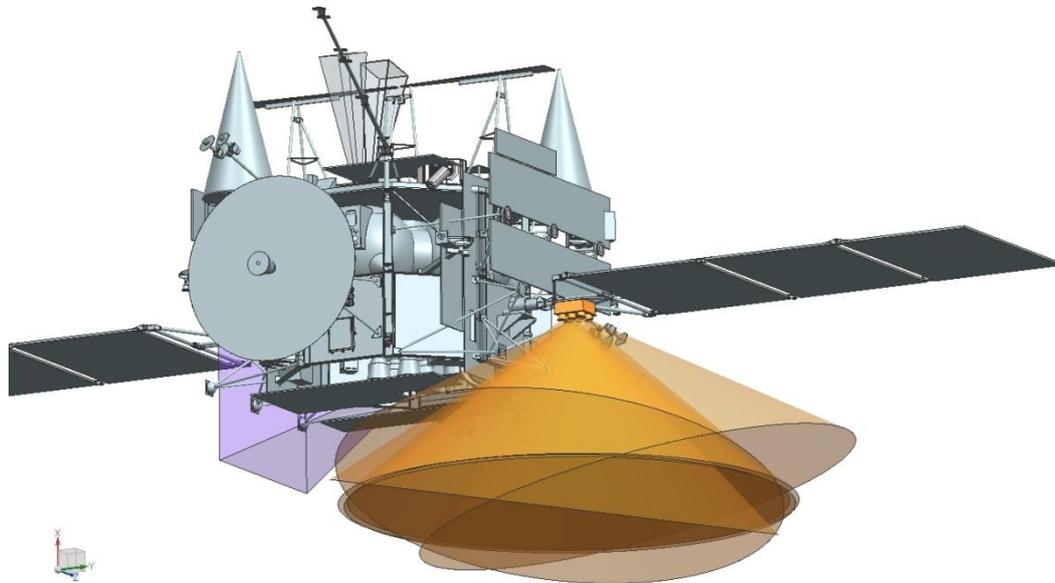


Рисунок 3. Моделирование в Siemens NX зон видимости оптических средств КА

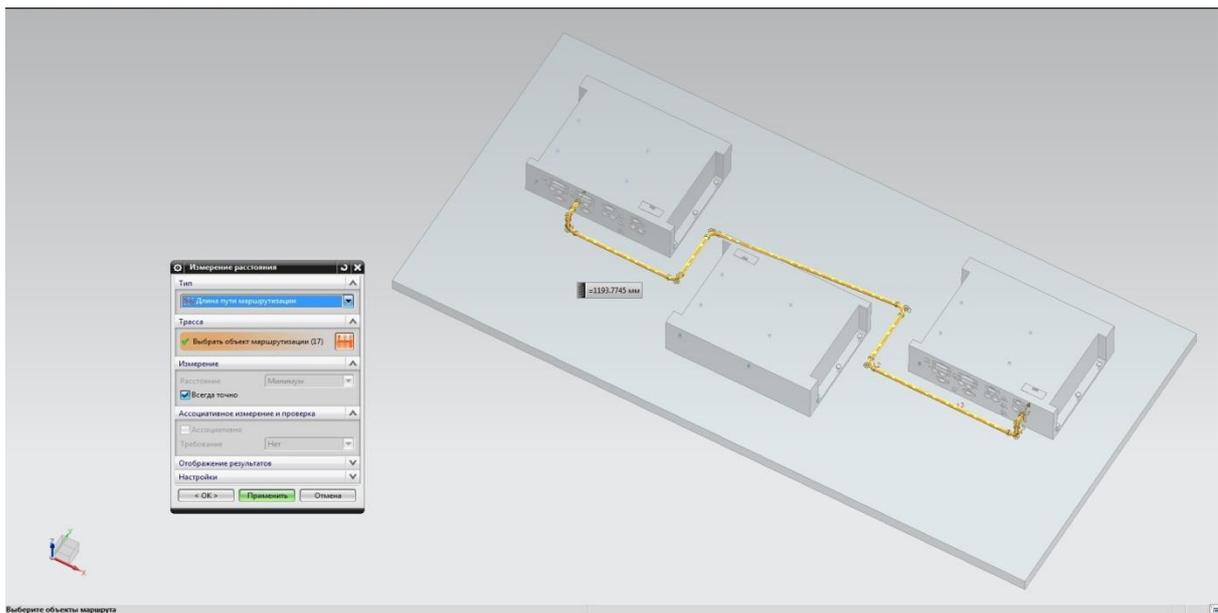


Рисунок 4. Определение длины кабеля в Siemens NX

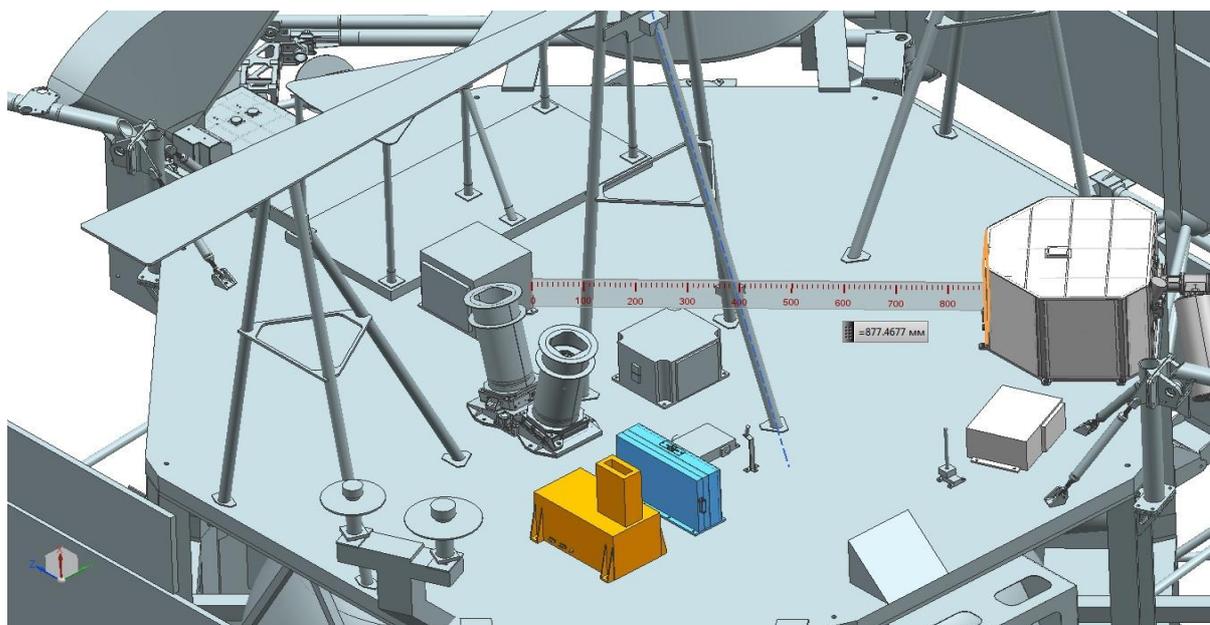


Рисунок 5 Определение межблочного расстояния в Siemens NX

### **3. Средства виртуализации для проведения макетно-конструкторских испытаний**

Процесс проведения испытаний с использованием электронной модели КА, созданной по технологии «Электронного макета», имеет, по сути, только одно неудобство – это отсутствие возможности оценить и сопоставить масштаб изделия на экране с самим собой, то есть, нет возможности произвести оценку доступа к кабельным сборкам и аппаратуре, произвести оценку зазоров между сопрягаемыми элементами конструкции и комплектующими изделиями не по электронной линейке, а используя тактильный контакт с объектом. На сегодняшний день есть средства дающие возможность приблизить инженеров к электронным макетам – это использование цифровых манекенов или систем виртуальной реальности.

В АО «НПО им. Лавочкина» приобретен и используется набор решений Siemens Jack, предназначенный для моделирования цифровых манекенов и оценки соответствия требованиям эргономики конструкции изделия, технологических процессов и операций технического обслуживания.

В его основе – биомеханически точные цифровые манекены, которые можно помещать в виртуальную среду и анализировать их поведение. Использование технологии цифрового манекена позволяет воссоздать ситуацию и проверить обзорность, зоны доступности предметов, удобство их расположения, а также получить другую важную информацию об эргономике процесса производства и самого изделия [6].

Цифровой манекен позволяет учитывать требования к размещению оборудования, узлов и агрегатов при разработке изделия и оценивать процессы сборки (Рисунок 6, Рисунок 7, Рисунок 8).

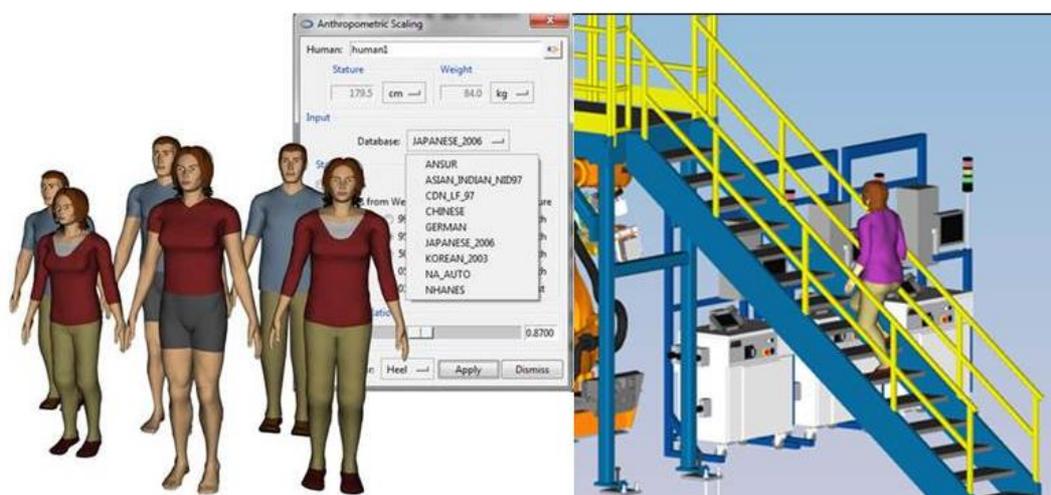


Рисунок 6. Цифровой манекен Siemens Jack

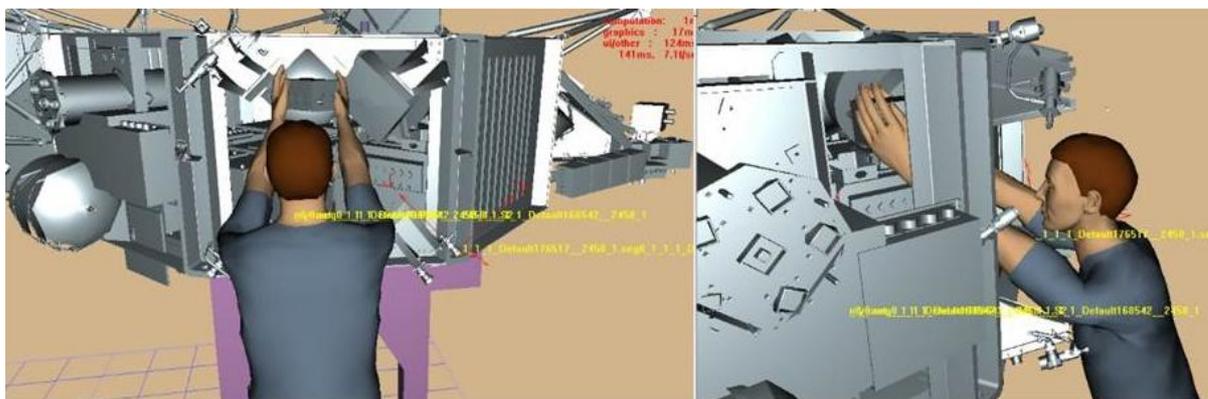


Рисунок 7 Использование цифрового манекена для оценки доступа к оборудованию

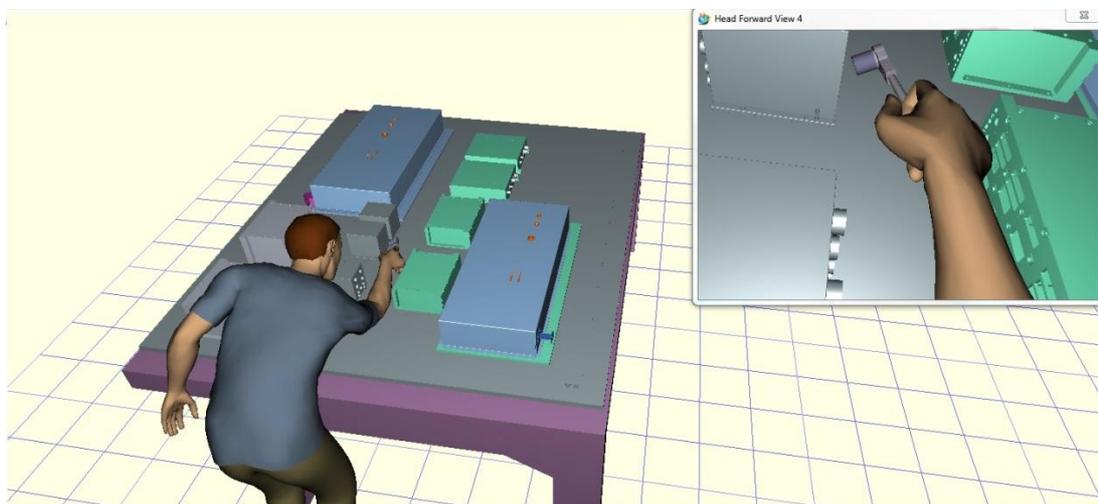


Рисунок 8 Использование цифрового манекена для оценки возможности сборки

Помимо электронных манекенов существует средства виртуальной реальности, обладающие существенно большей реалистичностью в части оценки электронного макета.

Система виртуальной реальности это современный инструмент для конструкторско-технологической подготовки производства, который позволяет перевести процесс создания изделия на качественно новый уровень благодаря

интерактивному окружению с высоким уровнем погружения и понимания изделия и возможностью коллективной работы.

Основная идея современных систем виртуальной реальности заключается в подмене реальной информации, поступающей в органы чувств человека, информацией, сгенерированной компьютером. Таким образом человек, находящийся в виртуальной реальности видит цифровые модели [6].

Такие системы виртуальной реальности сегодня созданы и используются при разработке изделий в ПАО «РКК «Энергия» и Объединенной авиастроительной корпорации на базе КБ Туполева в Москве (Рисунок 9, Рисунок 10), фото взято с официального сайта ПАО РКК «Энергия» [9].



Рисунок 9. Стенд виртуальной реальности РКК «Энергия» на форуме «Наставник-2018» (фото взято с официального сайта РКК «Энергия»)

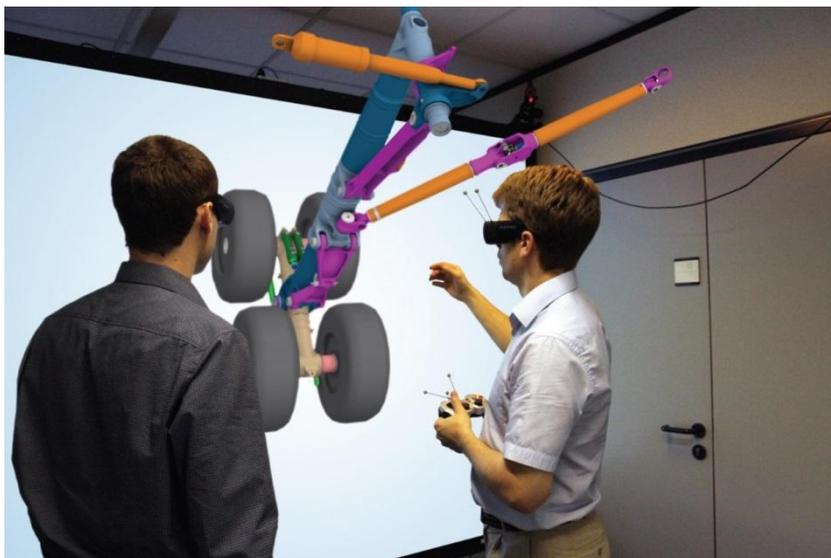


Рисунок 10. Комната виртуального проектирования КБ Туполева (фото взято с официального сайта Объединенной авиастроительной корпорации)

### **Заключение**

Являясь наиболее сложным и наиболее затратным этапом при создании космической техники, наземная экспериментальная отработка должна обеспечить подтверждение заданных в ТЗ требований.

Современные средства моделирования, инженерного анализа и виртуального проектирования уже сегодня позволяют на этапе НЭО отказаться от использования матчасти в макетно-конструкторских испытаниях или как минимум сильно сократить количество натуральных испытаний заменив их на большой объем виртуальных испытаний. В настоящее время в АО «НПО Лавочкина» разработана и согласована методика проведения макетно-конструкторских испытаний по электронному макету космического аппарата с использованием виртуальной среды.

Использование виртуальных моделей для подготовки испытаний не только снижает затраты и риски, связанные с ними, но и сокращает время, необходимое на сам процесс отработки.

Конечно, для других видов испытаний полный уход в виртуальную среду не возможен, однако использование электронных моделей максимально соответствующих изделию, совместно со средствами, имитирующими испытания, позволят заранее спрогнозировать результат проводимой отработки и при необходимости внести изменение в изделие.

Виртуальные испытания ракетно-космической техники позволят сократить продолжительность и стоимость цикла испытаний при этом "виртуальные" испытания, не смогут полностью заменить натурные, так как их результаты испытаний всегда должны будут подтверждаться испытаниями физических моделей изделий [7].

### **Библиографический список**

1. Афанасьев В.А., Барсуков В.С., Гофин М.Я., Захаров Ю.В., Стрельченко А.Н., Шалунов Н.П. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 412 с.
2. Системы и комплексы космические. Термины и определения. ГОСТ Р 53802-2010. – М.: Стандартинформ, 2011. – 28 с.
3. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Концепция автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного

зондирования Земли в аномальных ситуациях // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 3. С. 165 – 176.

4. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронная модель изделия. Общие положения. ГОСТ 2.052-2015. - М.: Стандартинформ, 2019. – 10 с.

5. Поляков А.А. Опыт АО «НПО Лавочкина» в организации процесса разработки изделий для космической отрасли в PLM-системе // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2018. № 1. С. 79 - 83.

6. Обзор Tecnomatix. Виртуальная реальность. Siemens PLM Software РФ. 2007. URL: <http://www.igatec.com>

7. Виртуальные испытания позволят разрабатывать новую технику дешевле и быстрее. ТАСС. 2018. URL: <https://old.fpi.gov.ru/press/media/2017031302>

8. Цифровое проектирование. ОАК. 2018. URL: <https://www.uacrussia.ru/ru/innovations/tsifrovoe-proektirovanie/>

9. «Энергия» на форуме «Наставник-2018». РКК «Энергия». 2018. URL: [https://www.energia.ru/ru/news/news-2018/news\\_02-19.html](https://www.energia.ru/ru/news/news-2018/news_02-19.html)

10. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85921>

11. Усовик И.В., Дарнопых В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого

функционирования космических систем ДЗЗ // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35957>

12. Стеганов Г.Б. Введение в летную эксплуатацию бортовых систем электроснабжения: учебное пособие. – СПб.: ВИККА, 1995. – 75 с.

13. Центер Б.И., Чижов О.А., Хотяинцев А.Г. Изучение никель-водородного аккумулятора в режиме длительного циклирования. Исследования в области электрохимической энергетики: Сборник научных трудов ВНИАИ. – Л.: Энергоиздат, 1987. – С. 62 - 66.

14. Гришин, Ю.П., Казаринов Ю.М. Динамические системы, устойчивые к отказам – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.

15. Фатеев В.Ф. Инфраструктура малых космических аппаратов. – М.: Радиотехника, 2011. – 432 с.

16. Басыров А.Г., Гончаренко В.А., Забузов В.С., Кремез Г.В., Эсаулов К.А. Повышение устойчивости функционирования бортовых вычислительных систем по результатам космических экспериментов // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 4. С. 70 – 74.

17. Захаров И.В., Иваненко Ю.А., Кремез Г.В., Фролков Е.В., Шпак А.В. Повышение функциональной устойчивости бортовых вычислительных систем малых космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50. № 6. С. 65 – 67.

18. Аверьянов А.В. Оценивание надёжности автоматизированных систем управления подготовкой и проведением пуска космического аппарата // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 4. С. 62 – 65.
19. Аверьянов А.В., Барановский А.М., Эсаулов К.А. Определение пределов аппаратной избыточности информационных управляющих систем // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 3. С. 23 – 26.
20. Кудрявцев В.В. Основы контроля и диагностики. – СПб: ВИКА имени А.Ф. Можайского, 1993. – 158 с.
21. Салль Дж.П.Ла, Р. Дж. Раз. Новое понятие устойчивости // Труды II международного конгресса международной федерации по автоматическому управлению, Базель, Швейцария, (27 августа - 4 сентября 1963 г.) – М: Наука, 1965 – 307 с.