

## **КОНВЕРГЕНЦИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ИСПЫТАНИЙ И МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ**

В.В. Батраков, А.И. Крылов, Б.Н. Нефедов, В.М. Новичков,  
Д.В. Мухина

В.В. Батраков; канд. техн. наук А.И. Крылов  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)  
Б.Н. Нефедов (ООО «ЦТиПП»)  
Канд. техн. наук, доцент В.М. Новичков; Д.В. Мухина  
(ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»)

Рассмотрены аддитивные технологии и их практическое применение при решении задач эксплуатации, испытаний и модернизации космических тренажеров в реализации политики цифровой трансформации в космической отрасли РФ; программно-аппаратные средства и экспериментальные установки; практические рекомендации и предложения по использованию преимуществ 3D-моделирования и FDM технологий 3D-печати при прототипировании изделий в тренажеростроении и эксплуатации технических средств подготовки космонавтов.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, космический тренажер, 3D-моделирование, 3D-печать, прототипирование, цифровой инжиниринг.

### **Application of Additive Technologies in Improving Instrumental Equipment of Space Simulators. V.V. Batrakov, A.I. Krylov, B.N. Nefedov, V.M. Novichkov, D.V. Mukhina**

The paper considers: additive technologies and their practical application in solving problems of operation, testing and modernization of space simulators in the framework of digital transformation policy of the Russian space industry; software and hardware and the experimental setups; practical recommendations and suggestions for using the advantages of 3D modeling and FDM 3D printing technologies for prototyping products applied in simulator construction and operation of technical means for training cosmonauts.

**Keywords:** additive technologies, space simulator, 3D modeling, 3D printing, prototyping, digital engineering

Развитие аддитивных технологий и цифровая трансформация социума позволили приблизиться к решению многих проблем космонавтики – от решения конструкторских задач, цифрового конфигурирования, проектирования и моделирования до перспективных проектов по освоению космоса, в частности:

- изготовление прототипов, деталей двигателей и оснастки космических кораблей [1];
- производство модульных спутников и малых космических аппаратов для стартапов и исследовательских проектов [2, 3];
- создание в космосе прототипов производства для изготовления комплекующих будущего космического корабля для орбитальных и инопланетных стартов [4];
- возведение на внеземных объектах надежных защитных убежищ из доступных местных геологических пород [5];
- изготовление расходных изделий и распечатка необходимых запчастей на борту космических кораблей и станций для непрерывного обеспечения как живучести оборудования в случае аварий или поломок важных систем [6], так и жизнедеятельности экипажа, например, с использованием 3D-биопечати [7].

Все это существенно удешевляет продукцию и повышает ее эксплуатационные характеристики, уменьшает стоимость отправки деталей в космос, значительно сокращает сроки и издержки при изготовлении прототипов, подготовки и проведения космических миссий. Более того, такой подход к интеграции аддитивных технологий с использованием всех преимуществ 3D-моделирования и проектно-конструкторских и производственных процессов позволяют:

- разрабатывать, внедрять и валидировать системы испытаний двойников изделий;
- паспортизировать изделия на всем жизненном цикле в цифровом формате;
- интегрироваться в сетевых сервисах с государственными информационными системами и системами основных поставщиков и потребителей, в т.ч. в инфраструктуры сети интернета вещей;
- конфигурироваться в инфраструктуры специализированных программных и аппаратных средств, включая прикладные решения, основанные на технологиях искусственного интеллекта.

В этом ряду проблемы эксплуатации и модернизации космических тренажеров (КТ) как для уже технологически отработанных полетов на низкие околоземные орбиты, так и для планируемых перспективных пилотируемых миссий в дальний космос имеют свою особенность. Она заключается, прежде всего, в многообразии и зачастую в противоположности решаемых задач: от эргономической унификации (например, пультов и органов управления в системе «человек–машина») до диверсификации, требующей моделирования разнообразных процессов, включая постановки космических экспериментов. Кроме того, поскольку на космических тренажерах проводится подготовка экипажей, включающая разнообразные специализированные и комплексные задачи обучения, то время от времени требуется либо «косметическое» обновление органов управления и прочих индикационных

и коммуникационных устройств в системе «человек–машина», либо их функционально-эргономическая модернизация. Решение таких задач в настоящем уже невозможно без быстрого 3D-моделирования и последующего быстрого прототипирования отдельных элементов узлов и механизмов.

Одним из возможных путей решения таких задач является цифровая конвергенция аддитивных технологий и интернета вещей (вычислительной сети физических предметов, оснащенной встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом и/или с внешней средой). Такой инструментальный позволит эффективно обеспечивать любую пространственно-временную телекоммуникацию информации об объекте (математическую модель, образ изделия) с последующей ее трансформацией в кратчайшие сроки в изделие (физический макет), не требующий механической пост обработки. Впервые становится возможным «телепортация» геометрических и вещественных свойств объекта в пространстве и во времени на критически удаленные расстояния, что позволяет решить одну из главных задач пилотируемой космонавтики – повышение живучести космических кораблей и станций, включая Международную космическую станцию (МКС), а также надежное жизнеобеспечение экипажей, особенно при планировании полетов в дальний космос. Следовательно, конвергенция аддитивных технологий и процессов эксплуатации, испытаний и модернизации технических средств подготовки космонавтов (ТСПК) может стать определяющей в кастомизации синтезированных изделий под конкретное оборудование и для решения конкретных задач.

Актуальность данного направления заключается в применении аддитивных технологий в цифровом инжиниринге ТСПК, а именно, в процессах создания, модернизации и эксплуатации КТ. Поэтому цифровизация производств и изделий в космической отрасли РФ рассматривается как одно из основных направлений при реализации стратегии цифровой трансформации [8].

### **Выбор технологий и программно-аппаратных средств**

На протяжении нескольких лет в Центре подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина (ЦПК) на инициативной основе и на самостоятельно созданных экспериментальных установках ставятся эксперименты с 3D-моделированием и 3D-печатью с использованием FDM технологии послойного наплавления. Основу такой 3D-печати составляют технологии 3D-моделирования, превращающие идеи и образы в цифровую графику на экране. При этом инструментальными методами и средствами являются математические модели трехмерных макетов. Такие модели описывают конструкцию и поверхность объекта путем процессов 3D-дизайна, 3D-рендеринга, визуализации и анимации, трансформированных в два основных типа 3D-моделей:

- САD-модели для системы автоматического проектирования;
- полигональные сетки, которые определяют форму и поверхность предмета.

Если САD-модель – это набор действий для создания объекта, то полигональная сетка (меш) – это изображение поверхности объекта в виде обернутой вокруг него сетки.

В настоящее время наиболее распространены STL-форматы файлов 3D-моделей, создаваемые программами САD. Такие файлы превращают дизайн в полигональную геометрическую модель в трех измерениях, трансформирующих треугольники, ребра и кривые в готовый 3D-объект. При этом важно учитывать настройки разрешения и технологию 3D-печати, которые влияют на качество модели, текстуру поверхностей и степень детальности. Более того, на всех этапах создания элементов и компонентов тренажных средств подготовки космонавтов и последующей их модернизации необходимо формировать базы 3D-моделей с параметрами 3D-печати. Такие базы с последующим наращиванием 3D-моделей для новых и/или модернизируемых объектов открывают ряд возможностей как при эксплуатации космических тренажеров, так и при последующем их совершенствовании, позволяя быстро и недорого производить прототипы 3D-изделий, напечатанных на 3D-принтере, и двухмерных изображений, созданных с помощью 3D-рендеринга.

Такое прототипирование позволяет осуществлять 3D-симуляции объектов в реальном масштабе времени.

Созданные в ЦПК экспериментальные установки, показанные на рисунке 1, выполнены в виде настольных 3D-принтеров и обеспечивают следующие основные параметры:

- габариты синтезируемого объекта: от 220 × 220 × 500 мм, с регулировкой по высоте до 1000 мм;
- толщина печатающего слоя от 50 до 400 мкм;
- погрешность 3D-печати (точность при FDM-технологии) не менее 0,1 мм.

При этом скорость печати, высота слоя, градиент температур (температуры сопла и рабочей поверхности), процент внутреннего заполнения, скорость обдува (вращение вентилятора) и ряд других параметров могут настраиваться как вручную, так и автоматически, в зависимости от типа/вида изготавливаемой конструкции, ее назначения и требуемых прочностных характеристик.

В качестве термопластика используются, как правило, филаменты в виде катушек нитей (рис. 1) или прутков с различными свойствами, например, алифатический полиэфир (полилактид) и т.п.

Освоенные технологии 3D-печати позволяют:

- создавать 3D-модели детали по эскизу/чертежу в программах типа SolidWorks;
- преобразовывать (3D-рендеринг) и адаптировать 3D-модели для отправки на 3D-принтеры;
- контролировать и корректировать параметры прототипированного изделия на 3D-принтере.



Рис. 1. Варианты настольных 3D-принтеров

В настоящее время с использованием аддитивных FDM технологии разработаны и созданы десятки разнообразных 3D-моделей и устройств, обеспечивающих текущие потребности ряда подразделений ЦПК, в частности: при создании, доработке, ремонте и эксплуатации оборудования на космических тренажерах; при проведении испытаний тренажных средств; при монтажных и прочих обеспечительных инженерных и конструкторско-технологических работах.

### **Опыт применения 3D-печати при эксплуатации и модернизации приборного оборудования космических тренажеров**

Из опыта эксплуатации тренажеров российского сегмента (РС) МКС известно, что любое оборудование или приборы, находящиеся в интенсивной эксплуатации и/или подвергающиеся внешним механическим (удары, падение, давление) воздействиям часто требуют замены корпусов и коммутационных элементов. Так на тренажере служебного модуля (СМ) в 2017 году при проведении плановых работ на приборе ПСС (пульт состояния систем) обнаружен повышенный люфт крепления клавиши сброса аварийной сигнализации «АСК». Ввиду отсутствия ремонтного фонда и прекращения выпуска предприятием-изготовителем подобных клавиш, был разработан ее аналог в виде 3D-модели и распечатан на 3D-принтере.



При изготовлении в 2017 году макета крана наддува «ВН5» системы обеспечения газового состава на учебно-тренировочном макете (УТМ) транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» одна из основных его деталей – маховик, был смоделирован и изготовлен на 3D-принтере.

В 2015 году были разработаны 3D-модели тренажерного варианта двух радиоуправляемых макетов переносных газоанализаторов на КТ служебного модуля (СМ) для имитации измерений концентрации окиси углерода, цианистого водорода и хлористого водорода. Все конструкционные элементы от корпуса до кнопок управления и индикации были изготовлены с применением аддитивных технологий.

Известны десятки других примеров использования в ЦПК 3D-печати при создании, доработке, ремонте и эксплуатации оборудования, которые показывают эффективность в обеспечении непрерывности производственного процесса вследствие быстрого прототипирования с использованием аддитивных 3D-технологий.

С момента начала эксплуатации МКС известны десятки случаев механических поломок только пластиковых компонентов вспомогательного оборудования, которые приводили к остановке более важных систем или к срыву плановых работ до момента прибытия транспортного корабля и замены детали.

Наиболее показательное применение аддитивных технологий, например, в моделировании интерфейсов ввода-вывода (индикационно-коммутационных систем) при модернизации ТСПК. В частности, в модулях космических тренажеров МИМ1 (малый исследовательский модуль «Рассвет»), МИМ2 (малый исследовательский модуль «Поиск») и МЛМ (многоцелевой лабораторный модуль «Наука») установлены многофункциональные пульты-индикаторы (МПИ) в тренажерном варианте исполнения [9]. При модернизации МПИ его лицевая панель и кнопки были смоделированы и изготовлены на 3D-принтере. На рисунке 2 изображены предыдущий (рис. 2, а) и обновленный (рис. 2, б) многофункциональный пульт-индикатор.



а)

б)

Рис. 2. Лицевые панели многофункционального пульта-индикатора предыдущей (а) и новой (б) версии

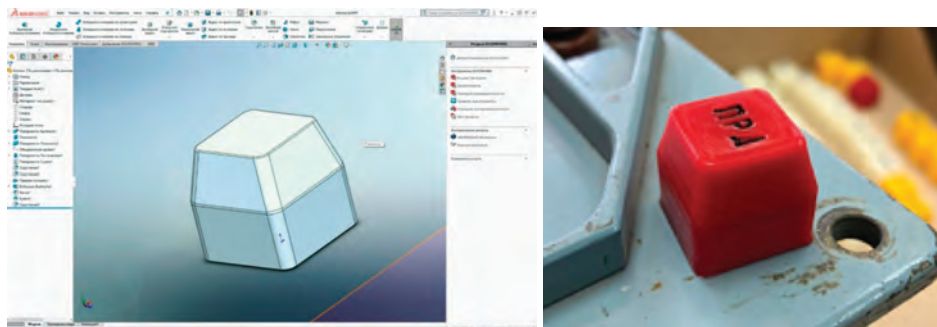
На рисунке 3 представлен скриншот интерфейса SolidWorks с изображением 3D-модели и самого изделия – коммутационной кнопки.

При изготовлении обновленных лицевых панелей и коммутационных кнопок для аддитивной технологии (процессов 3D-моделирования, 3D-рендеринга и 3D-печати) использовались аппаратные средства и основные программные средства:

- SolidWorks – программный комплекс автоматизированного проектирования (САПР), в частности, для 3D-моделирования (создания математической 3D-модели);

- Simplify3D – программа слайсер, разбивает трехмерную модель на слои, подготавливая ее к печати на 3D-принтере. Осуществляет предварительный просмотр математической модели на экране перед запуском принтера на печать, ее послойный контроль, выявление и устранение ошибок;

- Autodesk Netfabb – сопутствующий программный пакет для оптимизации моделей и адаптации технологий трехмерной печати [10, 11]. Использование Autodesk Netfabb позволяет сократить сроки и уменьшить себестоимость изделий за счет предварительной симуляции процесса печати с минимизацией ошибок и сокращением (оптимизацией) количества этапов.



а)

б)

Рис. 3. Скриншот интерфейса SolidWorks с изображением 3D-модели (а) и кнопки (б)

Для обновления приборного оборудования КТ – лицевых панелей, а также коммутационных кнопок, показанных на рисунках 2 и 3, использовалась аппаратная составляющая аддитивных технологий, показанная на рисунке 4, состоящая из пяти принтеров: четыре FDM-принтера (метод наплавления филамента) фирмы Hercules разных годов выпуска и размеров печатного стола и один принтер FormLabs Form 2, работающий по технологии SLA печати (лазерная стереолитография с помощью фотополимерной смолы). Четыре FDM-принтера, применительно к изготавливаемым изделиям, функционально одинаковы, но используют разные материалы.

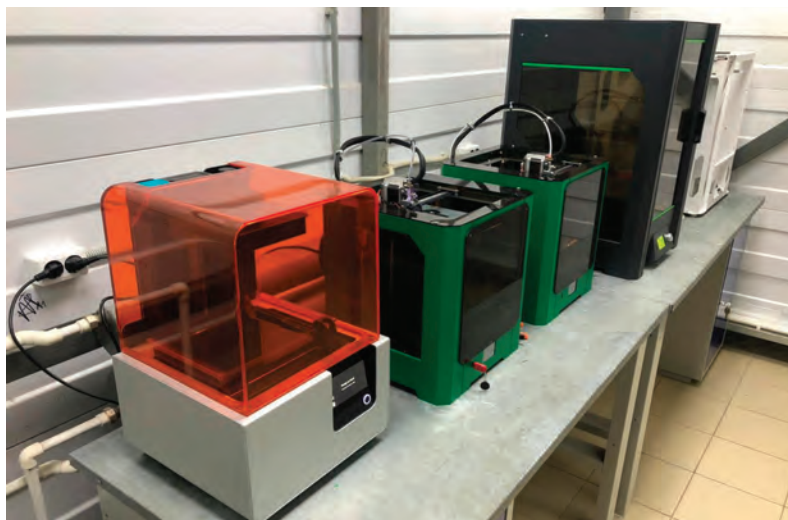


Рис. 4. Аппаратная составляющая сектора аддитивных технологий и 3D-печати: четыре FDM-принтера (метод наплавления филамента) и один 3D-принтер фирмы Hercules, работающий по технологии SLA печати (лазерная стереолитография с помощью фотополимерной смолы)

### Аддитивные технологии в цифровом инжиниринге для создания уникальных средств испытаний

Для обеспечения испытаний комплексного механизма подъема платформы (КМПП) гидролаборатории (ГЛ) в декабре 2019 года была разработана 3D-модель лазерного указателя шкалы, состоящая из трех отдельных деталей: корпуса, крышки и кронштейна для крепления лазерного излучателя с возможностью юстировки луча по горизонтали. Скриншот экрана деталей 3D-модели лазерного указателя показан на рисунках 5 и 6.

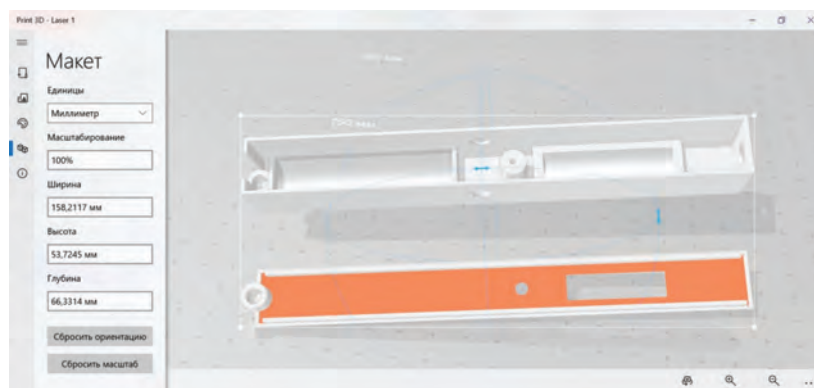


Рис. 5. 3D-модели корпуса и крышки лазерного указателя



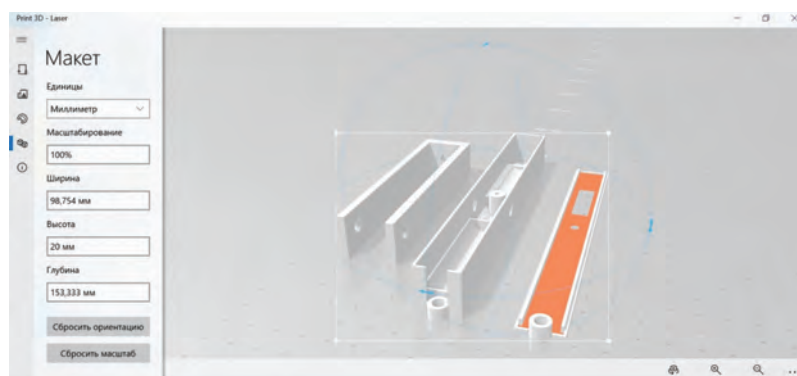


Рис. 6. Общий вид 3D-шаблона для печати

В 3D-изображениях модели прорисованы необходимые технологические отверстия и ложементы для установки электронных компонентов. При этом стыковочные пазы по периметру корпуса и крышки выполнены с учетом обеспечения посадки «в натяг» с целью исключения винтовых соединений (минимизации сборочных деталей).

Согласно программе и методикам испытаний требовалось шесть лазерных указателей, соответственно 18 деталей. Поскольку размеры объектного стола 3D-принтера составляют 22 x 22 мм, то за один подход одновременно распечатывалось по три детали, что существенно сокращало время на их изготовление – тиражирование. Более того, точность распечатанных деталей по форме и габаритным размерам позволили без дополнительных механических доводок собрать конструкцию указателя за один подход.

На рисунке 7 представлены фотографии лазерных указателей в рабочем режиме горизонтальной развертки лазерного луча на шкале метрической линейки при испытаниях КМПП ГЛ в августе 2020 года.

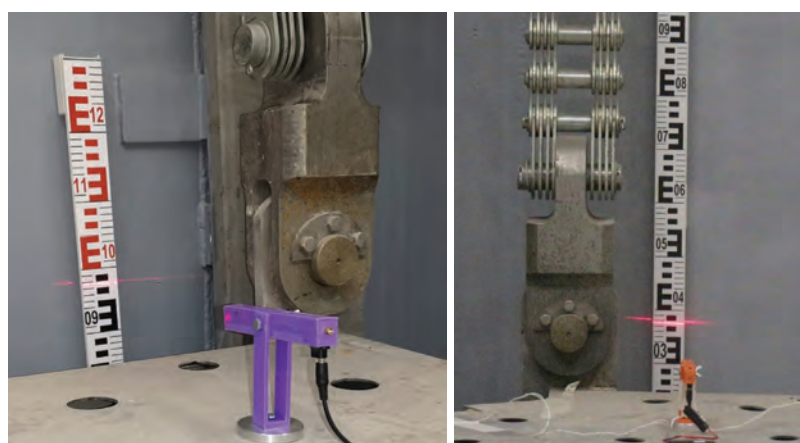


Рис. 7. Работа лазерных указателей при испытаниях КМПП ГЛ, август, 2020 г.

На рисунках 8 и 9 представлены фотографии специальных комплексов контроля, соответственно, для измерения прохождения видеосигнала подводного видеоконкомплекса ГЛ (СКК-5) и определения воздействия воздушного потока от движения скоростного подвижного состава на манекен, оснащенного датчиками (СКК-4), в которых все устройства-приспособления выполнены с использованием 3D-печати.

На рисунке 10 показаны фотографии примеров изделий, распечатанных на 3D-принтере, необходимых для оперативного монтажа и соединения специализированного оборудования, соответственно.

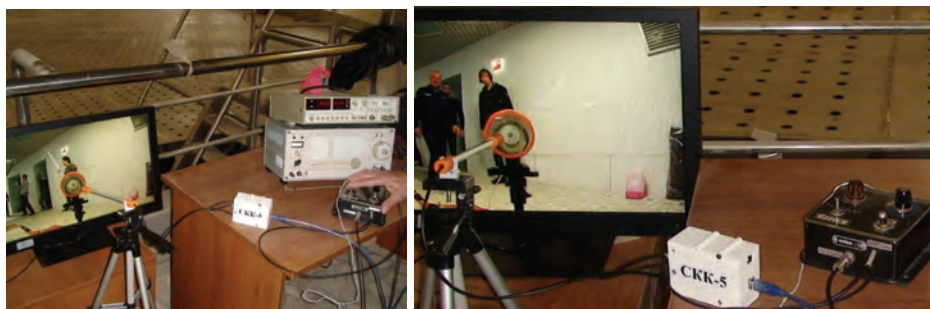
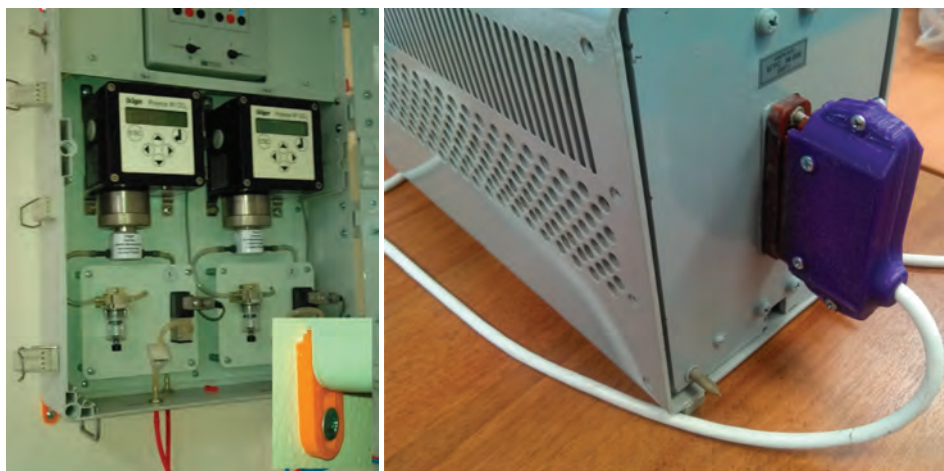


Рис. 8. Специальный комплекс контроля (СКК-5) для измерения прохождения видеосигнала подводного видеоконкомплекса ГЛ: все устройства-приспособления СКК-5 распечатаны на 3D-принтере



Рис. 9. Специальный комплекс контроля (СКК-4) для определения воздействия воздушного потока от движения скоростного подвижного состава на манекен, оснащенного датчиками: все устройства-приспособления СКК-4 распечатаны на 3D-принтере



а)

б)

Рис. 10. Примеры изделий, распечатанных на 3D-принтере, необходимых для оперативного монтажа или соединения специализированного оборудования:  
а – подвесы; б – корпус разъема

### **Перспективы использования аддитивных технологий в тренажеростроении и эксплуатации ТСПК**

Поскольку производство уже становится цифровым, «бумажным», интеллектуальным и кастомизированным, то значительно сокращается временной интервал от идеи до ее воплощения в конечный продукт.

Одним из важных критериев применения технологии 3D-печати является значительное сокращение процесса перехода от возникновения отказа/поломки/выхода из строя детали до ее реального устранения, т.е. изготовления и замены отказавшей детали или поиска 3D-модели детали или ее аналога в цифровой базе данных. Здесь инженер-наладчик или эксплуатант обеспечивает процесс уже не с «чистого» листа (как конструктор, проектировщик), а с конкретной цифровой модели. То есть. решается задача внедрения киберфизических систем (интеграции вычислительных ресурсов в физические сущности) в производство.

Кроме того, минимизируются затраты как при создании новых изделий, так и при прототипировании аналогов из баз данных для приборов, оборудования и узлов тренажеров, удовлетворяя критерию «стоимость–эффективность».

В настоящем 3D-принтеры, имея небольшие габаритно-массовые параметры, возможны к эксплуатации на долговременных орбитальных станциях для проведения экипажами мелкого ремонта. Для этого в основу программно-аппаратного обеспечения аддитивных технологий необходимо агрегиро-

вать создаваемые базы данных 3D-моделей, с возможностью их получения или обновления через каналы связи с Землей.

Таким образом, создание баз данных 3D-моделей модернизируемых или заново создаваемых изделий для космических тренажеров уже позволяют:

- исследовать особенности прототипирования с целью улучшения эксплуатационных характеристик изготавливаемых деталей, узлов, конструкций;

- создавать изделия различной формы и сложности, при этом не требуя создания дополнительной инструментальной оснастки;

- на стадии проектирования вносить необходимые поправки и корректировки в конструкцию детали, улучшающие ее эксплуатационные характеристики и исключающие технологические ошибки;

- определять объемы выпускаемых партий деталей в зависимости от стоящих задач, с возможностью их кастомизации под конкретное оборудование или продукцию.

Предложенный подход к интеграции аддитивных технологий и процессов эксплуатации, испытаний и модернизации технических средств подготовки космонавтов может быть положен в основу реализации политики цифровой трансформации в космической отрасли РФ, поскольку позволяет:

- диверсифицировать задачи по освоению космоса за счет формирования единой технологической политики и инфраструктурной среды взаимодействия программных и аппаратных средств в рамках отраслевых стандартов и регламентов;

- формировать базы данных (3D-моделей) на основе инфраструктуры специализированных программных и аппаратных средств;

- валидировать системы испытаний виртуальных двойников изделий (проводить испытания на соответствие требованиям и условиям эксплуатации, и т.п.);

- существенно удешевить продукцию, повысив ее эксплуатационные характеристики;

- значительно сократить сроки и издержки как при изготовлении прототипов, так и при подготовке и проведении космических миссий.

## **Выводы**

В связи с изменениями состава МКС, логики работы бортовых систем, появлением новых задач, корректировки требований на подготовку экипажей к космическому полету, развития новых технологий возникает необходимость регулярной модернизации, доработки и обновления космических тренажеров.

Для выполнения задачи нами были применены современные программно-аппаратные средства от систем автоматизированного проектирования с использованием программ SolidWorks, Simplify3D, Autodesk Netfabb и им

подобных до аддитивных FDM и SLA технологий, которые позволяют выполнить полный цикл: от идеи до ее реализации; от получения технического задания до выдачи готового изделия.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Американская компания Aerojet rocketdyne испытывает напечатанные на 3D-принтере детали ракетных двигателей. Электронный ресурс: Доступ <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/aerojet-rocketdyne-ispytyvaet-napechatannye-na-3d-printere-detali-raketnyh-dvigateli/> свободный.
- [2] BOEING начнет использовать 3D-печать для производства модульных спутников. Электронный ресурс: доступ <https://www.3dpulse.ru/news/promyshlennost/boeing-nachnet-ispolzovat-3d-pechat-dlya-proizvodstva-modulnyh-sputnikov/> свободный.
- [3] Ученые Томского политехнического университета создают спутник, напечатанный на 3D-принтере. Электронный ресурс: доступ <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/uchenye-tomskogo-politehnicheskogo-universiteta-sozdaut-sputnik-napechatanniy-na-3d-printere/> свободный.
- [4] В NASA успешно испытали ракетный двигатель, полностью напечатанный на 3D-принтере. Электронный ресурс: Доступ <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/v-nasa-ushpeshno-ispytali-raketnyi-dvigatel-polnostyu-napechatanniy-na-3d-printere/>
- [5] Ученые работают над 3D-печатью из материалов, имитирующих марсианскую и лунную почву. Электронный ресурс: доступ <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/uchenye-rabotayut-nad-3d-pechatyu-iz-materialov-imitiruyuschih-marsianskuyu-i-lunnuyu-pochvu/> свободный.
- [6] Космонавты МКС распечатали первый объект на 3D-принтере в космосе. Электронный ресурс: доступ <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/kosmonavty-mks-raspechatali-pervyi-obekt-na-3d-printere-v-kosmose/> свободный.
- [7] ОРКК намерена отправить 3D-биопринтер на МКС к 2018 году. Электронный ресурс: доступ <https://www.3dpulse.ru/news/novosti-kompanii/orkk-namerena-otpravit-3d-bioprinter-na-mks-k-2018-godu/> свободный.
- [8] Стратегия цифровой трансформации Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 года и перспективу до 2030 года. Утверждена приказом ГК «Роскосмос» от 26.12.2019 г. № 450.
- [9] Шевченко Л.Е., Полунина Е.В., Саев В.Н. Комплекс технических средств подготовки космонавтов по программе российского сегмента Международной космической станции // Монография. Звездный городок, 2017.
- [10] Михаил Фленов «DirectX b C++. Искусство программирования». Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2006 г.
- [11] Виктор Кораблев «Самоучитель Visual C++. NET». БХВ-Петербург, 2004 г.

#### REFERENCES

- [1] US based company Aerojet Rocketdyne tests 3D printed rocket engine parts. Electronic resource: free access <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/aerojet-rocketdyne-ispytyvaet-napechatannye-na-3d-printere-detali-raketnyh-dvigateli/>
- [2] BOEING will use 3D printing to produce modularized satellites. Electronic resource: access <https://www.3dpulse.ru/news/promyshlennost/boeing-nachnet-ispolzovat-3d-pechat-dlya-proizvodstva-modulnyh-sputnikov/>



- [3] Scientists of Tomsk Polytechnic University develop a 3D printed satellite. Electronic resource: free access <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/uchenye-tomskogo-politehnicheskogo-universiteta-sozdaut-sputnik-napechatannyi-na-3d-printere/>
- [4] NASA successfully tested a fully 3D printed rocket engine. Electronic resource: free access <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/v-nasa-uspeshno-ispytali-raketnyi-dvigatel-polnostyu-napechatannyi-na-3d-printere/>
- [5] Scientists are working on 3D printing using materials that simulate Martian and lunar soil. Electronic resource: free access <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/uchenye-rabotayut-nad-3d-pechatyu-iz-materialov-imitiruyuschih-marsianskuyu-i-lunnyuyu-pochvu/>
- [6] The ISS's 3D printer has manufactured the first 3D printed object in space. Electronic resource: free access <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/kosmonavty-mks-raspechatali-pervyi-obekt-na-3d-printere-v-kosmose/>
- [7] URCS intends to send 3D bioprinter to the ISS by 2018. Electronic resource: free access <https://www.3dpulse.ru/news/novosti-kompanii/orkk-namerena-otpravit-3d-bioprinter-na-mks-k-2018-godu/>
- [8] The digital transformation strategy of the State Corporation "Roscosmos" for the period up to 2025 and the prospect until 2030. Approved by order of the State Corporation "Roscosmos" dated December 26, 2019. No 450.
- [9] Shevchenko L.E., Polunina E.V., Saev V.N. Complex of technical means for training cosmonauts under the program of the ISS RS // Monograph. Star City, 2017.
- [10] Mikhail Flionov "DirectX b C++. The Art of Programming". St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2006.
- [11] Viktor Korablyov. "A self-instruction manual for Visual C++. NET". BHV-Petersburg, 2004.