

Прототипирование в разработке изделий ракетно-космической техники и систем их производства

© А.А. Кабанов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Россия

Рассмотрен вопрос использования технологий прототипирования при разработке изделий ракетно-космической техники и систем их производства как одной из компонент направления «Прототипирование, изготовление, испытание изделий ракетно-космических систем» в рамках формирования сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды. Показана роль этой технологии в системе модельно-ориентированной разработки как непосредственно самих изделий, так и систем их производства. Приведены теоретическая основа и характеристика области применения методов прототипирования на начальных этапах проектирования. Продемонстрированы методические подходы к выбору предмета прототипирования и порядка работы с ним для ракет-носителей и космических аппаратов в рамках студенческих работ по разработке ракетно-космических систем для реализации космических миссий. Проанализирован и представлен опыт использования сквозной технологии в учебном процессе, на его основе обозначены последовательные этапы по развитию и внедрению инструментов прототипирования на пути к реализации этой технологии прототипирования, в том числе при решении практических задач в ракетно-космической промышленности.

Ключевые слова: прототипирование, прототип, 3D-печать, аддитивные технологии, ракетно-космическая техника, разработка техники, подготовка специалистов

Введение. В области разработки и испытаний изделий, особенно ракетно-космической техники (РКТ), в наступившую эпоху цифровизации фокус деятельности все сильнее смещается в виртуальное пространство [1–3]. Однако сейчас остается еще достаточно приложений, где физическое прототипирование является безальтернативным или гораздо более эффективным способом проверки проектных и конструкторско-технологических решений, дополняющим и усиливающим цифровые прототипы. Так, в проектно-конструкторских подразделениях многих отечественных промышленных предприятий, изготавливающих РКТ, благодаря развитию технологий 3D-печати уже устоялась практика оценки принятых инженерами решений на неметаллических прототипах изделий, разработанных в 3D. И хотя эта проблема еще недостаточно исследована, само появление такой практики свидетельствует о существенном сокращении количества ошибок, доработок и вариантов, представленных к рассмотрению, и, в итоге, времени разработки после ее внедрения. Кроме того, активно развивается применение 3D-печати непосредственно для изготовления самих

изделий аэрокосмической техники [4–8]. Зарубежный опыт показывает, что среди ключевых производственных технологий именно технологии быстрого прототипирования сегодня достигают 40%-ного порога степени внедрения [9].

В отечественном аэрокосмическом образовании сложилось иное положение. С начала 1990-х годов вследствие отсутствия финансирования лабораторная база вузов была или утеряна, или существенно устарела. Ее обновление в последние десятилетия осуществлялось главным образом путем компьютеризации (аппаратное и программное обеспечение) и оснащения современным оборудованием с ЧПУ. Однако из-за высоких требований к квалификации операторов, сложности и дороговизны оборудования доступ к нему студентов был фактически исключен. Многие студенческие КБ и мастерские при вузах также были утеряны, не в пример активно развиваемым и поддерживаемым на государственном уровне за рубежом. Кроме того, там ведущие технологические компании привлекали студенческие сообщества передовых зарубежных вузов к решению практических задач реальных космических миссий [10–12].

Следует также отметить, что в общеобразовательных школах практические занятия и уроки по трудовой деятельности были упразднены. Система обществ ДОСААФ с кружками ракетно- и авиамоделирования, радиотехники и другими также сегодня существует в несравнимо меньших, чем было ранее, масштабах и формах [13]. Средние специальные учебные заведения считаются непрестижными. Все это привело к тому, что современный студент, неплохо владея компьютерной техникой, не приобретает навыков практической работы с физическими образцами. Следовательно, все актуальнее становится проблема разрыва связей преемственности виртуальных и физических процессов материализации изделий у специалистов, которую приходится решать уже в вузе. Как будет показано далее, это существенно ограничивает их возможности по выработке вариантов и принятию оптимальных решений в дальнейшем.

Цель настоящей работы — предложение механизма, который бы позволил в условиях ограничений финансово-организационного характера, высокого входного «барьера» по доступности сложного специального оборудования и лабораторной базы осуществить стык теоретических и прикладных исследований на начальном этапе и заложить основы экспериментальной составляющей при формировании сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды в отечественных аэрокосмических вузах [14]. В качестве такого механизма предложено широкое внедрение методов прототипирования как в учебный процесс, так и на более высоком качественном уровне — в промышленность.

Характеристика предметной области прототипирования и его методов. Определим характеристику предметной области и методов прототипирования, основываясь на двух группах работ.

Первая группа работ устанавливает теоретические основы прототипирования, в качестве одной из которых здесь будет рассмотрена, например, теория подобия [15]. В данном случае выберем такой ее предмет, как установление связей между объектами двух типов: реальным и его прототипом, выражаемых для интересующих свойств объекта соотношениями вида

$$x_i = k_i y_i, \quad (1)$$

где x_i — интересующее свойство, для реализации которого разрабатывается прототип; y_i — свойство реального объекта; k_i — коэффициент подобия для свойства x_i .

Применительно к цифровизации этим аппаратом можно определить цифровой двойник как прототип, реализованный в цифровом виде, совокупность свойств которого соответствует свойствам реального объекта с точностью, позволяющей контролировать данный объект и управлять им.

Вторая группа работ посвящена прикладным аспектам использования инструментов прототипирования на ранних стадиях проектирования и при разработке научных основ методов их наиболее эффективного применения. Довольно исчерпывающим источником, предоставляющим возможность познакомиться с ними, может служить большая совместная работа университетов США, Финляндии и Сингапура [16], в ходе которой был применен эмпирический подход и сделаны выводы по результатам анализа более 300 тематических публикаций по прототипированию в области инженерной деятельности, производства, управления, теории проектирования, разработки программного обеспечения и архитектуры. В этой работе доказан положительный эффект, полученный от использования виртуального и физического прототипирования в самых разных областях науки и техники.

Согласно проведенным исследованиям [16], наиболее частой целью разработки прототипов является доработка конструкции, после чего, в порядке убывания частоты публикаций, следуют цели улучшения коммуникаций (обмена опытом) участников проектных команд и потребителей, исследовательские цели и цели активного обучения. Что касается активного обучения, то показано, что оно не просто относится непосредственно к самому процессу обучения, но и активно применяется в проектировании и конструировании

реальных конструкций, так как позволяет расширить область поиска рациональных проектных решений. В нашем случае акцент будет сделан в первую очередь на исследовательские цели, цели активного обучения и коммуникации.

Следует отметить среди прототипов выделяемых видов прототип формы и прототип процесса (функционирования), прототипы по степени точности, цифровые и физические прототипы [16] — все перечисленные подлежат использованию.

Какие вопросы, с методической точки зрения, при трех аспектах своего применения разные прототипы вызывают?

1. С какой целью, для оценки каких свойств, с какими коэффициентами подобия и с какой точностью разрабатывается каждый из прототипов из набора применяемых цифровых и физических прототипов при создании конкретной ракетно-космической системы и системы ее производства на разных этапах жизненного цикла (ЖЦ)?

2. Какие связи виртуальных и физических прототипов из этого набора возникают в рамках сквозной разработки?

3. Какие выводы можно сделать по результатам отработки проектных решений на прототипах набора?

Целесообразно реализовывать данный подход в обучении начиная уже с младших курсов. Кроме того, желательно иметь конкретный прикладной пример приложений усилий прототипирования. Наконец, важен групповой характер работы над прототипом. В аэрокосмических вузах удовлетворить перечисленным особенностям можно путем адаптации начальных дисциплин по основам ракетно-космической техники.

Так, на кафедре «Космические системы и ракетостроение» МАИ в рамках дисциплины «Основы устройства ракет и космических аппаратов» разработаны методические руководства по выполнению комплекса лабораторных работ по разработке ракет-носителей (РН) [17] и космических аппаратов (КА) [18]. Эти руководства отличаются тем, что в них рассмотрены основополагающие принципы устройства РКТ в разрезе процессов создания ракетно-космических систем (РКС) на примере решения конкретных прикладных задач с широким применением прототипирования. Таким образом, достигаются все заявленные цели прототипирования: исследовательская цель по определению наиболее рациональных решений устройств РН или КА; активное обучение при решении задач выбранной космической миссии; обеспечение коммуникации, поскольку из-за объема работ требуются усилия нескольких участников для разработки РКС под выбранную миссию.

Контекст выполняемых работ по прототипированию и связи с другими Направлениями сквозной среды [14] представлен на рис. 1.



Рис. 1. Контекст Направления по прототипированию в рамках сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды

Предложенный подход относительно прототипирования был реализован в заключительной работе лабораторного практикума, состоящего из четырех связанных лабораторных работ (с рассмотрением основных этапов жизненного цикла). В финальной части необходимо сделать заключение по результатам прототипирования по следующим группам вопросов: «конструкция», «прочность» — с использованием прототипа «формы» виртуального и физического; «технология» — с использованием прототипа «процесса» виртуального и физического; «испытания» — с использованием прототипов «формы» и «процесса» виртуального и физического; эксплуатация» — с использованием виртуальных прототипов «формы» и «процесса». Систематизация результатов выполняется в таблицах, вид и содержание которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Содержание заключения по результатам оценки принятых решений на основе выполнения работ по прототипированию

№	Группа вопросов	Вопросы группы	Реализация в объекте	Реализация в прототипе	Подобие	Заключение
1	2	3	4	5	6	7

Каждая группа включает перечень вопросов (столбец 3, табл. 1), для решения которых создается частный прототип (цифровой и физический). К примеру, по группе вопросов «Конструкция» предметом отработки на прототипах являются вопросы оценки компоновочных решений, вопросы оценки членения конструкции, интерфейсов и стыков элементов конструкции, видов соединений и др. По группе «Изготовление» последовательно рассматриваются вопросы по основным

пределам изготовления: заготовительный, деталелательный, сборочный (узловая, агрегатная, главная сборка). По группе «Прочность» оценке подлежат не только прочностные характеристики (прочность, жесткость), но и поведение конструкции под нагрузкой. Группа «Испытания» содержит широкий спектр вопросов, содержание которых зависит от объекта разработки и которые решаются с построением статических и динамических прототипов. Группа «Эксплуатация» для РН включает модельную отработку задачи выведения с использованием симуляторов, а для КА — отработку основных этапов полета (выведение, орбитальный полет, межпланетный перелет и др.) в рамках фиксированной конфигурации КА, также с использованием космических симуляторов. Подробнее об этом для РН см. [17], а для КА см. [18].

Связность прототипов и сквозной характер прототипирования достигаются за счет последовательного применения набора прототипов по основным этапам материализации изделий РКТ и систем их производства в рамках фиксированной РКС для решения конкретной задачи. В самом простейшем случае — систематизируемых и фиксируемых в таблицах типа табл. 1 по обозначенным группам вопросов. Для перехода на следующий качественный уровень для этих целей требуются автоматизированные системы класса PDM/PLM, в среде которых частные случаи отработки на прототипах системно ведутся с привязкой к соответствующим требованиям заинтересованных сторон, отраженным в технических заданиях на разработку.

Среди классов программного обеспечения (ПО) для прототипирования используются CAD/CAE-системы; САМ-системы; ПО системно-инженерного моделирования; программные пакеты математических расчетов; программы собственной разработки для решения специфических задач на высокоуровневых языках моделирования; специальные средства имитационного моделирования космических миссий (симуляторы). Для студентов доступны учебные версии или свободно распространяемое ПО. Установлено качественное повышение эффективности применения ПО при совместном использовании с физическим прототипированием.

Опыт реализации начального этапа направления. Начальный этап Направления «Прототипирование, изготовление, испытание изделий ракетно-космических систем» в настоящее время реализуется при подготовке студентов специальности «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов». Прототипирование ведется в контексте этапов жизненного цикла изделий и систем РКТ при создании конкретных примеров РКС для решения задач выбранных студентами космических миссий. Выполняется сквозное прототипирование основных компонентов РКС, процессов их создания и эксплуатации. В отношении сквозного цифрового прототипирования с использованием аддитивных технологий сегодня известны практические результаты, реализованные на базе промышленных платформ автоматизации [19–20].

Пример применения сквозного прототипирования, выполненного проектной группой студента В. Борисова при определении устройства КА навигации и РН выведения в рамках разработки РКС спутниковой навигации, приведен на рис. 2. В том числе выполнено прототипирование эксплуатации компонентов РКС с использованием системы моделирования космических миссий начального уровня, в качестве которого адаптирован космический симулятор [14, 21, 22].

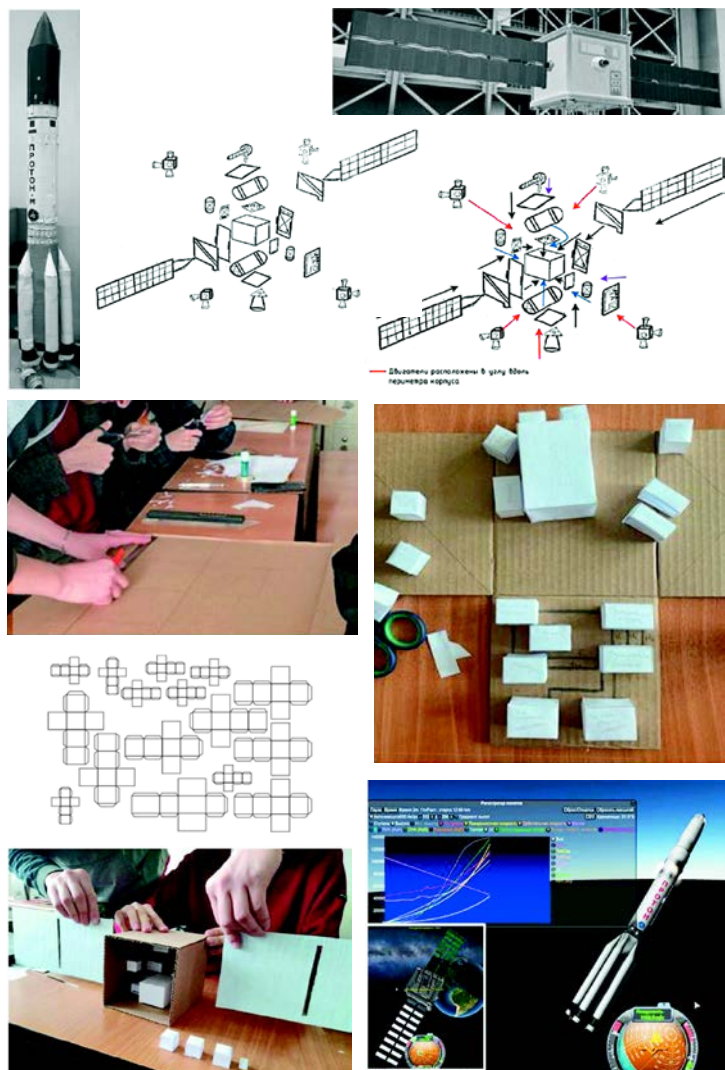


Рис. 2. Сквозное прототипирование РКС спутниковой навигации. В порядке сквозной разработки: физический прототип выбранного средства выведения — РН «Протон», выполняемый на базе разверток частей виртуального прототипа, на рисунке не показанного; виртуальный прототип КА навигации; схема членения и технологическая схема сборки КА; основные этапы изготовления физического прототипа КА; фрагмент реализации выведения КА на заданную орбиту в системе моделирования космических миссий

Пример использования прототипа «процесса» при исследовании группы вопросов «Испытания» в рамках разработки инфракрасного телескопа в составе ракетно-космической системы для наблюдения за тусклыми небесными телами, выполненного проектной группой студента З. Аникина, представлен на рис. 3.

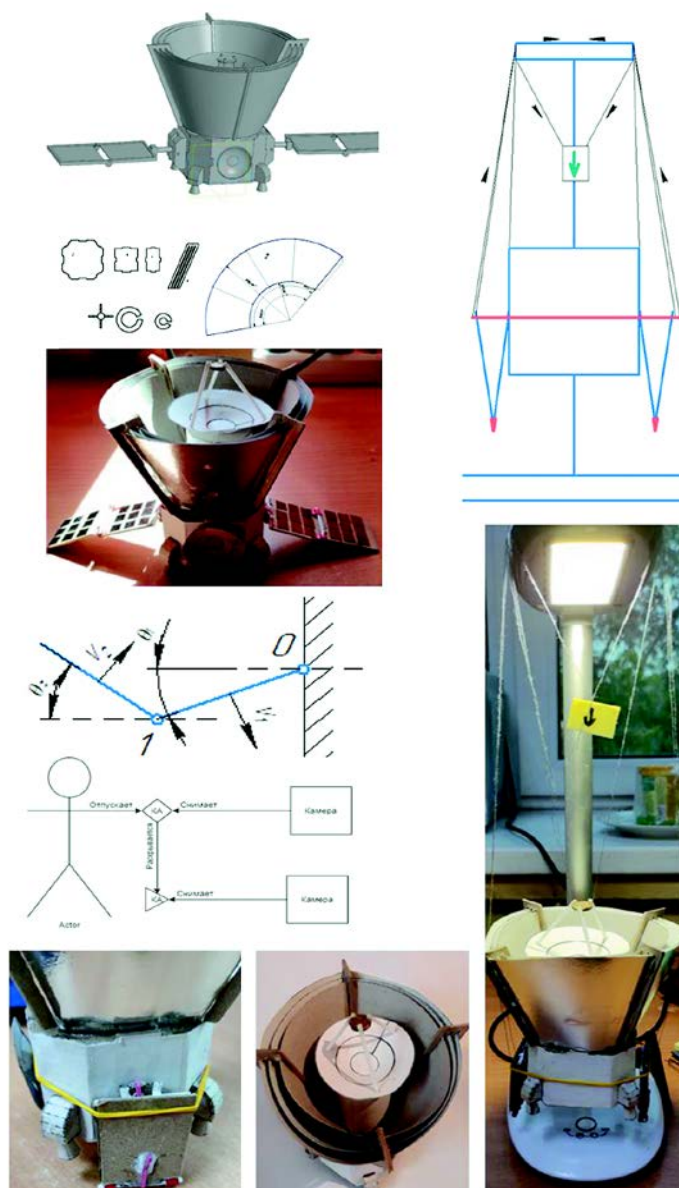


Рис. 3. Прототипирование испытаний КА: виртуальный и физический прототипы КА, схема стенда для испытания системы разворачивания солнечных панелей, кинематическая схема и схема проведения испытаний, физический прототип системы раскрытия солнечных панелей, стенд для испытания системы разворачивания панелей

Пример, приведенный на рис. 4, интересен тем, что при прототипировании спускаемого аппарата (СА) использованы гибридные методы: на основе выкроек из листа, с помощью аддитивных технологий, с применением стандартизованных элементов конструктора kit-набора (набора для сборки моделей). Выполнено проектной группой студента Д. Грачева при установлении устройства компонентов РКС в рамках решения задач по исследованию Титана — спутника Сатурна.

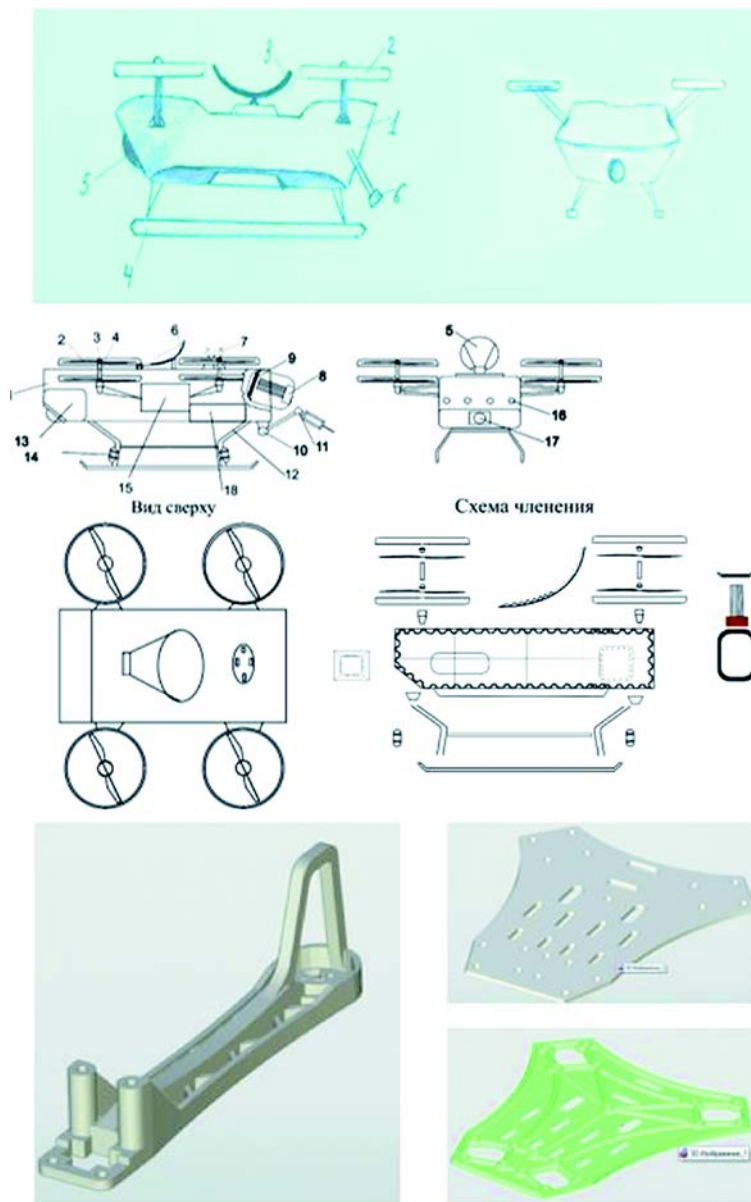


Рис. 4 (начало). Прототипирование КА в порядке сквозной разработки: эскиз схемного решения СА, компоновка и схема членения СА, виртуальные прототипы деталей, адаптированные под 3D-печать



Рис. 4 (окончание). Прототипирование в порядке сквозной разработки: сборка физического прототипа, физический прототип спускаемого аппарата для проведения исследований на поверхности в рамках разработки РКС для исследования Титана

Есть примеры работ с изготовлением прототипов РН, полностью выполненных методом 3D-печати. Использовать его для этого не рекомендуется, так как при этом исключаются возможность попутного прототипирования процессов сборки из нежестких элементов конструкции, а также решение вопросов увязки и точности, что является определяющим опытом для ракетно-космической отрасли. Как правило, листовые элементы выполняются из бумажных выкроек, стержневые элементы — из деревянных прутков. В самом простейшем случае можно обойтись полностью бумажными выкройками, находящимися в открытом доступе для подавляющего большинства образцов РКТ (например [23]), что сделано проектной группой студента Е. Прошковой при физическом прототипировании спускаемого аппарата для проведения исследований на поверхности Марса, прототипом которого выступал марсоход Curiosity (рис. 5). Здесь макетирование выступает как частный случай прототипирования, так как с прототипом не выполняется никаких манипуляций.

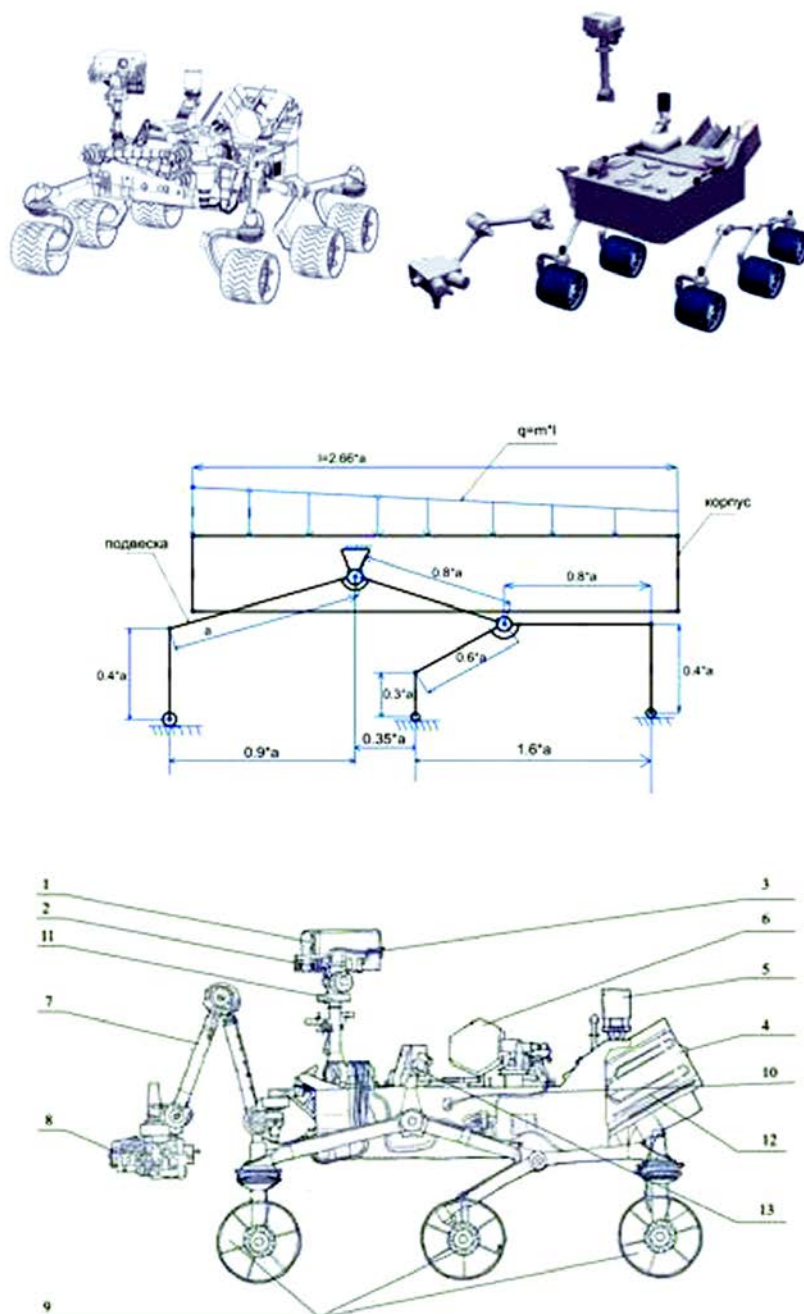


Рис. 5 (начало.) Макетирование напланетного модуля КА с использованием бумажных выкроек: виртуальный прототип напланетного модуля КА, конструктивно-силовая схема, компоновка

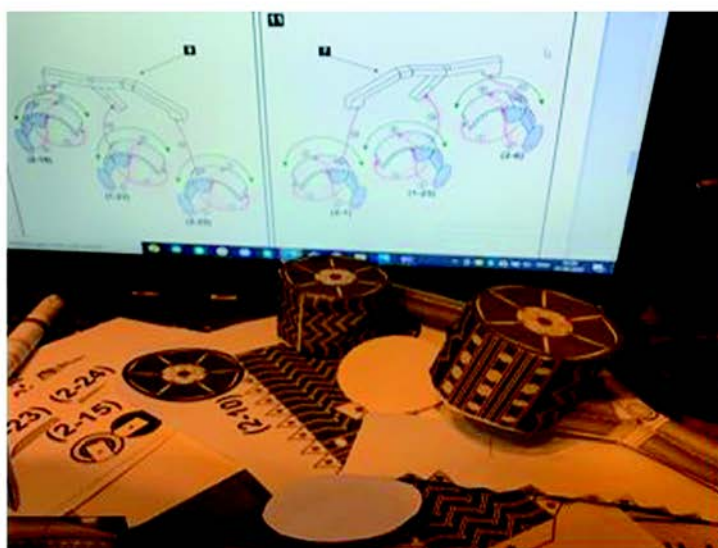
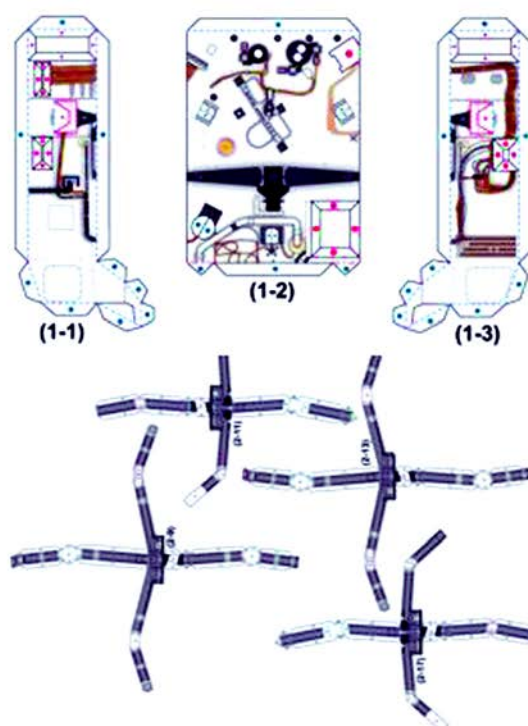


Рис. 5 (продолжение). Макетирование напланетного модуля КА с использованием бумажных выкроек: развертки элементов макета, изготовление узлов макета

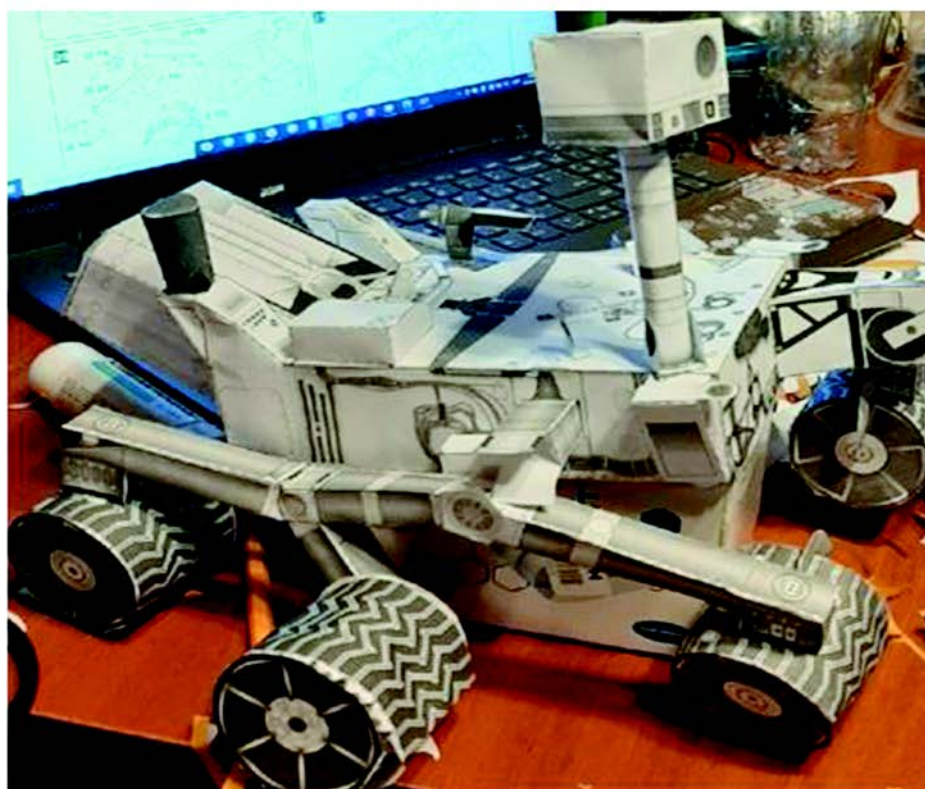
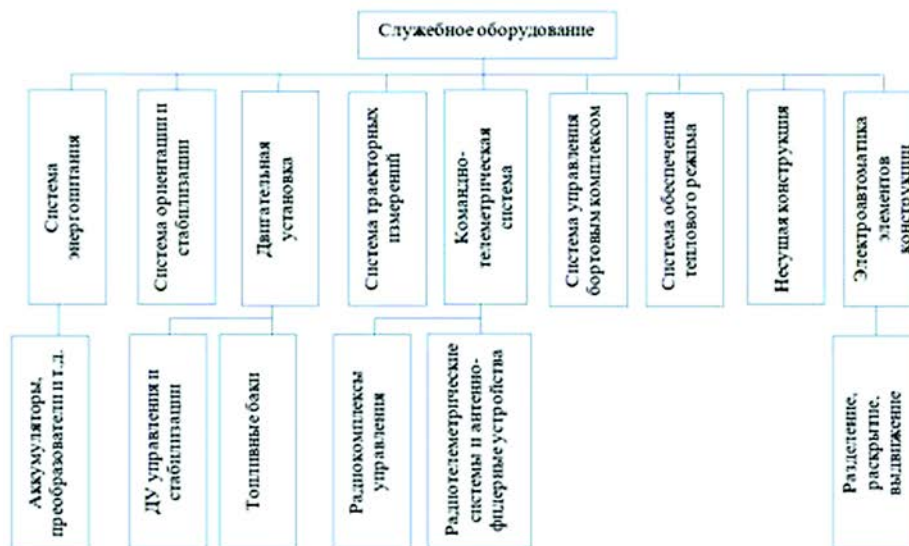


Рис. 5 (окончание). Макетирование напланетного модуля КА с использованием бумажных выкроек: декомпозиция служебного оборудования перелетного модуля КА; исполнение физического макета напланетного модуля — марсохода — в рамках разработки РКС для исследования Марса

Следующим шагом на пути реализации сквозной технологии прототипирования является прототипирование систем производства. В настоящее время на кафедре студенты уже разрабатывают виртуальные модели ракетно-космических производств. Планируется дополнить их физической составляющей, позволяющей более точно оценивать компоновочные решения производственных подразделений. В качестве примера на рис. 6 приведен макет производства, изготовленного компанией «Производственные решения» с использованием промышленного принтера 3D-печати [24], хотя на начальных этапах для построения таких макетов достаточно подручных средств и материалов. В зарубежной практике для этих целей созданы и успешно работают специальные площадки — мобилизаторы [9]. Так, в г. Ахене (Германия) в качестве учебного пространства построена и эксплуатируется площадка прототип в масштабе завода-прототипа [9].



Рис. 6. Макет механообрабатывающего производства, выполненный на базе промышленного конструктора, изготовленного из ABS-пластика (изображение — по материалам электронного ресурса — сайта компании «Производственные решения»)

В перспективе планируется использовать этот опыт при создании небольших ракет и аппаратов для решения практических задач, с чем успешно справляются в настоящее время небольшие частные, в том числе российские, компании [25, 26].

Следует отметить, что полученный опыт демонстрирует и подтверждает зарубежную практику [9] — его результаты можно с успехом применять не только в образовательных учреждениях, но и

непосредственно на предприятиях отрасли при разработке ракетно-космических систем и систем их производства.

Заключение. В работе представлено содержание начального этапа внедрения третьего элемента формирования сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды в аэрокосмических вузах — «Прототипирование, изготовление, испытание изделий ракетно-космических систем». Апробация и широкое использование технологии прототипирования начального этапа в настоящее время осуществляются на младших курсах при подготовке специалистов по проектированию и конструированию разгонных блоков транспортных систем, а также космических аппаратов и систем кафедры «Космические системы и ракетостроение» МАИ. Внедрение осуществлено путем адаптации начальных дисциплин по основам РКТ, в методическую поддержку которого разработаны и выпущены соответствующие учебные пособия. Особенности адаптации стали изучение основ устройства РКТ на примере решения прикладных задач космических миссий в разрезе этапов жизненного цикла создания системы, проектный и командный характер работы студентов, активное целевое обучение. Результаты апробации показывают качественное улучшение усвоения материала при самостоятельном прототипировании конструкций в составе проектной группы в приложении к решению задач выбранной космической миссии в сравнении с традиционным изучением устройств по основным разделам РКТ. Продемонстрировано, что реализация начального этапа не требует существенных временных и финансовых вложений.

Планируется распространить разработанные подходы на область модельно-ориентированной разработки производств ракетно-космических систем.

Идет подготовка к следующему этапу реализации, предусматривающему сборку малых ракет и космических аппаратов из комплектующих с последующим выходом на решение практических задач промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Проведение безопасных и эффективных квалификационных испытаний космических систем. *Thales Alenia Space & SIEMENS*. URL: <https://bit.ly/33APSSd> (дата обращения 15.12.2021).
- [2] ОДК внедряет технологии цифрового двойника в разработку газотурбинных двигателей. *РОСТЕХ*. 2021. URL: <https://rostec.ru/news/odk-vnedryaet-tehnologii-tsifrovogo-dvoynika-v-razrabotku-gazoturbinnnykh-dvigatelay/> (дата обращения 01.06.2022).
- [3] Страхов К.Е. Концепция снижения стоимости и сроков сертификации БПЛА. *Вертолеты России*. 2020. URL: https://helirussia.ru/wp-content/uploads/2020/09/6.202009_Helirussia_UAV_Strakhov_v2.pdf (дата обращения 01.06.2022).

-
- [4] Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники. *Труды МАИ*, 2015, № 78. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/e6e/e6ed6634d88fd08e030a8736e3f845e4.pdf> (дата обращения 14.05.2022).
- [5] Аддитивные технологии: настоящее и будущее. *Материалы IV Международной конференции (Москва, 30 марта 2018 г.)*. Москва, ВИАМ, 2018, 449 с. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1069.pdf> (дата обращения 14.05.2022).
- [6] Fessl J., Shen H., Patel N., Chen T., Ghirnikar S., Van M., Berghe D. Liquid Rocket Engine Design for Additive Manufacturing. *69th International Astronautical Congress (IAC)* (Bremen, Germany, 1–5 October, 2018). Bremen, pp. 1–17.
- [7] Gradl P., Greene, S., Protz C., Bullard, B., Buzzell J., Garcia C., Wood J., Osborne R., Hulka J., Coop K. Additive Manufacturing of Liquid Rocket Engine Combustion Devices: A Summary of Process Developments and Hot-Fire Testing Results. *54th AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 2018*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 1–35. DOI: 10.2514/6.2018-4625
- [8] Как это работает. Промышленный 3D-принтер. *РОСТЕХ*. URL: <https://rostec.ru/news/kak-eto-rabotaet-promyshlennyy-3d-printer/> (дата обращения 01.06.2022).
- [9] Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. *Рабочий доклад Департамента Корпоративного обучения Московской школы управления Сколково*, 2017. URL: <https://www.skolkovo.ru/centres/cdt/cdt-research> (дата обращения 01.06.2022).
- [10] NASA Selects Three US Universities to Develop Lunar Infrastructure Tech. *NASA*, 2022. URL: https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/strg/lustr/NASA_Selects_Three_US_Universities_to_Develop_Lunar_Infrastructure_Tech/ (дата обращения 11.03.2022).
- [11] Lee Канауама. Psyche to begin environmental testing ahead of August 2022 launch. *NASA*, 2022. URL: <https://www.nasaspaceflight.com/2022/01/psyche-environmental-testing/> (дата обращения 20.05.2022).
- [12] Park Si-soo, Sony putting camera in orbit for shutterbugs, not scientists. 2022. URL: <https://spacenews.com/Sony-putting-camera-in-orbit-for-shutterbugs-not-scientists/> (дата обращения 17.04.2022).
- [13] 21 команда запустила ракеты в финале соревнований «Ракетного движения». *Сколтех*. 2019. URL: <https://www.skoltech.ru/2019/05/21-komanda-zapustila-rakety-v-finale-sorevnovanij-raketnogo-dvizheniya/> (дата обращения 17.09.2020).
- [14] Кабанов А.А., Федоров И.А., Дацок И.В. Подходы к формированию сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды в образовательных учреждениях аэрокосмического профиля. *Конференция «Королевские чтения 2022»*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. URL: <https://korolev.bmstu.press/preprints/1697/> (дата обращения 10.05.2022).
- [15] Веников В.А. *Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики)*. Москва, Высшая школа, 1976, 479 с.
- [16] Bradley Camburn, Vimal Viswanathan, Julie Linsey, David Anderson, Daniel Jensen, Richard Crawford, Kevin Otto and Kristin Wood. Design prototyping methods: State of the art in strategies, techniques, and Guidelines. *Design Science*. 2017, vol. 3, no. 13, pp. 1–33. DOI: 10.1017/dsj.2017.10
- [17] Кабанов А.А. *Определение устройства ракет-носителей на этапах жизненного цикла при решении транспортных задач*. Москва, Изд-во МАИ, 2022, 84 с.
- [18] Кабанов А.А. *Определение устройства космических аппаратов на этапах жизненного цикла при решении целевых задач*. Москва, Изд-во МАИ, 2022, 88 с.

- [19] Сиверский А. Ускорение аддитивного производства при помощи интегрированной платформы 3DEXPERIENCE. *Вертолеты России*. 2020. URL: <https://helirusia.ru/wp-content/uploads/2020/09/3.IGA-Technologies-Uskorenie-additivnogo-proizvodstva-pri-pomoshhi-integrirovannoi-platfomy-3DEXPERIENCE-2.0.pdf/> (дата обращения 28.05.2022).
- [20] Обзор инструментов платформы 3DEXPERIENCE для полного цикла аддитивного производства. 2019. URL: <https://blogs.3ds.com/russia/3dexperience-for-additive-manufacturing/> (дата обращения 28.05.2022).
- [21] Create and Manage Your Own Space Program. *Kerbal Space Program*. URL: <https://kerbalspaceprogram.com> (дата обращения 01.06.2022).
- [22] *Orbiter main site*. URL: <https://www.orbitersim.com> (дата обращения 01.06.2022).
- [23] *Космонавтика в моделях из бумаги*. URL: www.cardmodels-r.narod.ru (дата обращения 10.06.2022).
- [24] *Производственные решения, промышленный конструктор*. URL: <https://proreshenie.ru/?yhid=74566403107416400> (дата обращения 01.06.2022).
- [25] Ракета со сколковскими спутниками запущена с Байконура. 2021. *Сколково*. URL: <https://sk.ru/news/raketa-so-skolkovskimi-sputnikami-zapuschena-s-baykonura/> (дата обращения 17.01.2021).
- [26] Российская частная компания-производитель высокотехнологичных спутниковых компонент и технологий для малых космических аппаратов, а также сервисов на их основе. 2021. *Спутникс*. URL: <https://sputnix.ru/ru> (дата обращения 17.01.2021).

Статья поступила в редакцию 17.06.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кабанов А.А. Прототипирование в разработке изделий ракетно-космической техники и систем их производства. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-8-2202>

Кабанов Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические системы и ракетостроение». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: методы разработки и исследования изделий РКТ и систем их производства, цифровое моделирование. SPIN-код: 8260-9509, Web of Science Researcher ID: ABC-9372-2020. e-mail: drdt@mail.ru

Prototyping in developing rocket and space technology products and their production systems

© A.A. Kabanov

Moscow Aviation Institute, Moscow, 125993, Russia

The paper deals with the problem of using prototyping in developing rocket and space technology products and their production systems as one of the components of the “Prototyping, manufacturing, testing of rocket and space technology products” field within the formation of an end-to-end design and production and experimental environment. The study shows the role of the prototyping technology in the system of model-based development of both the products themselves and their production systems; gives the theoretical basis and characteristics of the area of application of prototyping methods at the initial stages of design; demonstrates methodical approaches to choosing the subject of prototyping and the procedure for working with it for launch vehicles and spacecraft within the framework of students' work on the development of rocket and space systems for space missions. We analyzed and introduced the experience of using the technology in the educational process and identified next stages for developing and implementing prototyping tools to further implement the end-to-end prototyping technology in solving practical problems of the rocket and space industry.

Keywords: *prototyping, prototype, 3D printing, additive technologies, rocket and space technology, technology development, specialist training*

REFERENCES

- [1] Provedeniye bezopasnykh i effektivnykh kvalifikatsionnykh ispytaniy kosmicheskikh system [Conducting safe and effective qualification tests of space systems]. *Thales Alenia Space & SIEMENS*. Available at: <https://bit.ly/33APSsd> (accessed December 15, 2021).
- [2] ODK vnedryayet tekhnologii tsifrovogo dvoynika v razrabotku gazoturbinnnykh dvigateley [UEC introduces digital twin technologies in the development of gas turbine engines]. *ROSTEKH* [Rostec]. 2021. Available at: <https://rostec.ru/news/odk-vnedryayet-tekhnologii-tsifrovogo-dvoynika-v-razrabotku-gazoturbinnnykh-dvigatelay/> (accessed June 1, 2022).
- [3] Strakhov K.E. Kontseptsiya snizheniya stoimosti i srokov sertifikatsii BPLA [The concept of reducing the cost and timing of UAV certification]. *Vertolety Rossii* [Russian helicopters]. 2020. Available at: https://helirusia.ru/wp-content/uploads/2020/09/6.202009_Helirusia_UAV_Strakhov_v2.pdf/ (accessed June 1, 2022).
- [4] Chumakov D.M. *Trudy MAI*, 2015, no. 78. Available at: <https://mai.ru/upload/iblock/e6e/e6ed6634d88fd08e030a8736e3f845e4.pdf> (accessed May 14, 2022).
- [5] *Additivnyye tekhnologii: nastoyascheye i buduscheye. Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii (Moskva, 30 marta. 2018 g.)* [Additive technologies: present and future. Proceedings of the IV International conference (Moscow, March 30, 2018)]. Moscow, VIAM Publ., 2018, 449 p. Available at: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1069.pdf> (accessed May 14, 2022).
- [6] Fessler J., Shen H., Patel N., Chen T., Ghirmikar S., Van M., Berghe D. Liquid rocket engine design for additive manufacturing. *The 69th International*

- Astronautical Congress (IAC)* (Bremen, Germany, 1–5 October 2018). Bremen, pp. 1–17.
- [7] Gradl P., Greene, S., Protz C., Bullard, B., Buzzell J., Garcia C., Wood J., Osborne R., Hulka J., Coop K. Additive Manufacturing of Liquid Rocket Engine Combustion Devices: A Summary of Process Developments and Hot-Fire Testing Results. *The 54th AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 2018*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 1–35. DOI: 10.2514/6.2018-4625
- [8] Kak eto rabotayet. Promyshlenny 3D-printer [How it works. Industrial 3D printer]. *ROSTEKH* [Rostec]. Available at: <https://rostec.ru/news/kak-eto-rabotaet-promyshlenny-3d-printer/> (accessed June 1, 2022).
- [9] Tsifrovoye proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhnologii [Digital production. Methods, ecosystems, technologies]. *Rabochiy doklad Departamenta Korporativnogo obucheniya Moskovskoy shkoly upravleniya SKOLKOVO, noyabr 2017* [Working paper of the Corporate Training Department of the Moscow School of Management SKOLKOVO, November 2017]. Available at: <https://www.skolkovo.ru/centres/cdt/cdt-research> (accessed June 1, 2022).
- [10] NASA Selects Three US Universities to Develop Lunar Infrastructure Tech. *NASA*, 2022. Available at: https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/strg/lustr/NASA_Selects_Three_US_Universities_to_Develop_Lunar_Infrastructure_Tech/ (accessed March 11, 2022).
- [11] Lee Kanayama. Psyche to begin environmental testing ahead of August 2022 launch. *NASA*, 2022. Available at: <https://www.nasaspaceflight.com/2022/01/psyche-environmental-testing/> (accessed May 20, 2022).
- [12] *Park Si-soo, Sony putting camera in orbit for shutterbugs, not scientists*. 2022. Available at: <https://spacenews.com/Sony-putting-camera-in-orbit-for-shutterbugs-not-scientists/> (accessed April 17, 2022).
- [13] 21 komanda zapustila rakety v finale sorevnovaniy «Raketnogo dvizheniya» [21 teams launched rockets in the finals of the Rocket Movement competition]. *Skoltech*, 2019. Available at: <https://www.skoltech.ru/2019/05/21-komanda-zapustila-rakety-v-finale-sorevnovaniy-raketnogo-dvizheniya/> (accessed September 17, 2020).
- [14] Kabanov A.A., Fedorov I.A., Datsiuk I.V. Podkhody k formirovaniyu skvoznoy proektno-konstruktorskoy i proizvodstvenno-eksperimentalnoy sredy v obrazovatelnykh uchrezhdeniyakh aerokosmicheskogo profilya [Approaches to the formation of an end-to-end design and production and experimental environment in educational institutions of the aerospace profile]. *Korolovskiye chteniya. XLVI Akademicheskie chteniya po kosmonavtike* [Korolev Readings. XLVI Academic Space Readings]. Available at: <https://korolev.bmstu.press/preprints/1697/> (accessed May 10, 2022).
- [15] Venikov V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitelno k zadacham elektroenergetiki)* [Theory of similarity and modeling (as applied to the problems of the electric power industry)]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976, 479 p.
- [16] Camburn B., Viswanathan V., Linsey J., Anderson D., Jensen D., Crawford R., Otto K., Wood K. Design prototyping methods: State of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*. Cambridge University Press, 2017, vol. 3, no. 13, pp. 1–33. DOI: 10.1017/dsj.2017.10
- [17] Kabanov A.A. *Opredeleniye ustroystva raket-nositeley na etapakh zhiznennogo tsikla pri reshenii transportnykh zadach: uchebnoye posobiye* [Determination of the device of launch vehicles at the stages of the life cycle in solving transport problems]. Moscow, MAI Publ., 2022, 84 p.

- [18] Kabanov A.A. *Opredeleeniye ustroystva kosmicheskikh apparatov na etapakh zhiznennogo tsikla pri reshenii tselevykh zadach: uchebnoye posobiye* [Determination of the device of space vehicles at the stages of the life cycle in solving target problems]. Moscow, MAI Publ., 2022, 88 p.
- [19] Siverskiy A. Uskoreniye additivnogo proizvodstva pri pomoschi integrirovannoy platformy 3D-EXPERIENCE [Acceleration of additive manufacturing using the 3D EXPERIENCE integrated platform]. *Vertolety Rossii* [Russian helicopters]. 2020. Available at: <https://helirusia.ru/wp-content/uploads/2020/09/3.IGA-Technologies-Uskorenie-additivnogo-proizvodstva-pri-pomoshhi-integrirovannoi-platformy-3DEXPERIENCE-2.0.pdf/> (accessed May 28, 2022).
- [20] *Obzor instrumentov platformy 3D-EXPERIENCE dlya polnogo tsikla additivnogo proizvodstva* [Overview of 3D EXPERIENCE platform tools for the full cycle of additive manufacturing]. 2019. Available at: <https://blogs.3ds.com/russia/3dexperience-for-additive-manufacturing/> (accessed May 28, 2022).
- [21] *Kerbal Space Program — Create and Manage Your Own Space Program*. Available at: <https://kerbalspaceprogram.com> (accessed June 1, 2022).
- [22] *Orbiter main site*. Available at: <https://www.orbitersim.com> (accessed June 1, 2022).
- [23] *Kosmonavtika v modelyakh iz bumagi* [Cosmonautics in paper models]. Available at: www.cardmodels-r.narod.ru (accessed June 10, 2022).
- [24] *Proizvodstvennyye resheniya, promyshlennyy konstruktor* [Production solutions, industrial constructor]. Available at: <https://pro-reshenie.ru/?yhid=74566403107416400> (accessed June 1, 2022).
- [25] *Raketa so skolkovskimi sputnikami zapuschna s Baykonura* [Rocket with Skolkovo satellites launched from Baikonur]. *Skolkovo*. 2021. Available at: <https://sk.ru/news/raketa-so-skolkovskimi-sputnikami-zapuschna-s-baykonura/> (accessed January 17, 2021).
- [26] *Rossiyskaya chastnaya kompaniya-proizvoditel vysokotekhnologichnykh sputnikovyykh komponent i tekhnologiy dlya malykh kosmicheskikh apparatov, a takzhe servisov na ikh osnove* [Russian private company producing high-tech satellite components and technologies for small spacecraft, as well as services based on them]. *Sputnix*. 2021. Available at: <https://sputnix.ru/ru> (accessed January 17, 2021).

Kabanov A.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Space Systems and Rocket Science, Moscow Aviation Institute. Research interests: methods of development and research of rocket and space technology products and aerospace production, numerical simulation. SPIN-code: 8260-9509, Web of Science Researcher ID: ABC-9372-2020. e-mail: drdt@mail.ru