

УДК 629.7.01:004.94

Методические вопросы разработки комплексных моделей на начальных стадиях создания ракетно-космической техники

А.А. Кабанов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Methodological problems in design and development of a complex model at the initial stage of creating the rocket and space technology

A.A. Kabanov

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Исследование направлено на определение методических основ современных цифровых технологий в области моделирования ракетно-космической техники. Проработаны вопросы использования технологий для получения целостного описания разрабатываемого объекта на начальных стадиях создания ракетно-космической техники. Дан обзор цифровых решений из разных областей авиационной и ракетно-космической промышленности. Приведена схема систематизации многочисленных примеров решения задач с помощью цифровых двойников. Рассмотрено соответствующее программное обеспечение, в том числе современные отечественные платформы. Предложен и обоснован подход к построению комплексных моделей ракет-носителей и космических аппаратов для решения исследовательских задач и отработки технологий интеграции моделей. Приведены программные средства и стартовые модели реализации подхода на примере выведения ракеты-носителя на орбиту. Результаты исследования могут быть полезны специалистам предприятий, сотрудникам и студентам учебных заведений аэрокосмической отрасли.

EDN: ZNWYDE, <https://elibrary/znwyde>

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, цифровые двойники, комплексные модели, модельно-ориентированная разработка, цифровое моделирование, обучение специалистов

The paper presents results of a study aimed at determining methodological foundations of the modern digital technologies in simulating the rocket and space technology. The issues of applying technology capabilities in obtaining a holistic description of the developed object at the initial stages of the rocket and space technology creation are worked out. The paper provides an overview of the digital solutions from various aviation, rocket and space industries. It shows a systematization scheme for the numerous considered examples of solving the problems using the digital twins. The relevant software is considered, including the modern domestic platforms. The paper proposes and substantiates an approach to constructing complex models of the launch vehicles and spacecraft for solving the research problems and testing the model integration technologies. It provides software tools and launch models for implementing the approach using the example of taking a launch vehicle to the orbit. Results of the study could be useful for specialists of the enterprises, employees and students of the educational institutions in the aerospace industry.

EDN: ZNWYDE, <https://elibrary/znwyde>

Keywords: rocket and space technology, digital twins, complex models, model oriented design and development, digital simulation, specialists learning

По мере расширения функциональных возможностей и распространения цифровых технологий в инженерной деятельности все более актуальными становятся вопросы обеспечения связности моделей разных предметных областей и обретения целостности в описании создаваемых объектов сложной наукоемкой техники. При этом возникающие сложности во многом связаны не с программной реализацией, а с методологией.

По словам директора Департамента по цифровизации корпорации «Роскосмос» А.Н. Потапова, в отношении внедрения перспективных технологий в промышленность «мы делаем очень мало в методологической сфере, люди код напишут, в этом нет сомнений» [1].

Цель статьи — разработка подходов к созданию комплексных моделей, позволяющих получить целостное описание моделируемого объекта на начальных стадиях создания ракетно-космической техники (РКТ).

На конкретных примерах с методических позиций приведено описание существующих технологий цифрового моделирования в РКТ и авиационной технике (АТ). Выполнена систематизация работ с акцентом на способы интеграции моделей. Приведены результаты, полученные на кафедре «Космические системы и ракетостроение» в Аэрокосмическом институте МАИ, в том числе о том, как ставится задача, и какие подходы выработаны при ее решении в рамках модельно-ориентированной разработки ракетно-космических систем в профильных учебных заведениях [2].

Аналитический обзор технологий цифрового моделирования и цифровых двойников (ЦД) в РКТ и АТ. В настоящее время в российской ракетно-космической и авиационной промышленности ведутся работы в области ЦД, формируются платформы для создания и управления ими.

ЦД в разрезе этапов жизненного цикла (ЖЦ) РКТ и АТ. Известны следующие технические решения:

- для этапа «Проектирование»:
 - цифровая платформа для разработки ЦД космических аппаратов (КА) в рамках проекта

по цифровой трансформации АО «НПО Лавочкина» (Госкорпорация «Роскосмос») [3];

- ЦД КА для моделирования системы электропитания, разработанный специалистами Самарского университета им. С.П. Королева при поддержке АО «РКЦ «Прогресс» (Госкорпорация «Роскосмос») [4];

- для этапа «Производство»:

- цифровая платформа для управления изготовлением приборов КА, предназначенная для планирования и оценки технико-экономических показателей на основе использования технологии искусственного интеллекта, созданная АО «Российские космические системы» (Госкорпорация «Роскосмос») [5];

- для этапа «Испытания»:

- ЦД для проведения виртуальных испытаний РКТ с использованием алгоритмов машинного обучения, разработанный АО «Российские космические системы» (Госкорпорация «Роскосмос») [6];

- ЦД термовакuumной камеры для испытаний КА при наземной экспериментальной отработке, созданный АО «НПО Лавочкина» (Госкорпорация «Роскосмос») [7];

- ЦД испытательного комплекса системы электроснабжения КА, разработанный специалистами Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники [8];

- для этапа «Эксплуатация»:

- ЦД КА для управления спутниками, созданный Центральным научно-исследовательским институтом машиностроения (Госкорпорация «Роскосмос») [9];

- ЦД КА для управления космической техникой, разработанный АО «Российские космические системы» (РКС) Госкорпорация «Роскосмос» [10];

- ЦД, применяемые в области беспилотных летательных аппаратов [11].

Анализ этих работ показывает высокую степень сложности не только сквозного охвата всего ЖЦ РКТ, но и отдельных этапов.

ЦД РКТ и АТ в рамках платформенных решений. Примерами разработки и реализации платформенных решений являются следующие работы:

– создание единой программно-методической среды для разработки и применения ЦД ракетных двигателей на базе интеграции трех систем математического моделирования — CAE-системы «Логос», системы функционального моделирования технических систем SimInTech и системы автоматизации и оптимизации инженерных расчетов pSeven [12] — специалистами АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Госкорпорация «Роскосмос») при участии АО «НПО Энергомаш», АО КБХА и АО «ТРВ-Инжиниринг»;

– создание в АО «НПО Лавочкина» виртуальной платформы для проектирования ЦД КА на базе PLM-системы [3];

– реализация и развитие проекта создания автоматизированной системы управления ЖЦ ракетного двигателя на базе PLM-системы в АО «НПО Энергомаш» [13];

– создание в АО «ОДК» ЦД газотурбинных двигателей (ГТД) на базе системы SPDM (Simulation Process and Data Management — средства управления процессами и данными компьютерного моделирования) [14, 15].

Основным выводом по результатам рассмотрения приведенных примеров платформенных решений является стремление к снижению с их помощью издержек при согласовании и управлении комплексом моделей. В качестве платформ использованы системы класса PLM (как, например, в качестве логического развития варианта применения этой системы в рамках единого информационного пространства в АО «НПО Энергомаш», так и специализированные платформы (SPDM-система в АО «ОДК»).

Наиболее весомые прикладные результаты по данной проблеме в отечественной промышленности получены в АО «ОДК» и Центральном институте авиационного моторостроения имени П.И. Баранова [16]. Специалистами этого института и Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева разработана комплексная модель ГТД. Она включает в себя термодинамические модели составных частей ГТД (компрессоров низкого и высокого давления, камеры сгорания и др.), параметризованные 3D-модели, конечно-элементные модели основных узлов ГТД, термомеханические модели газогенератора и ГТД в целом. Комплексная модель применяется для моделирования эксплуатации и виртуальных испытаний ГТД.

В ходе этой работы на примере малоразмерного турбореактивного двигателя создан демонстратор технологий ЦД, используемый в качестве платформы для обучения студентов и специалистов [16]. Демонстратор позволяет по заданным основным параметрам (техническое задание на разработку) диаметра и тяги малоразмерного турбореактивного двигателя, на выходе получить полностью образмеренное решение с удовлетворением требований прочности. В состав демонстратора входят набор 1D-2D-3D CAD/CAE-моделей, российская интеграционная цифровая SPDM-платформа на базе программного комплекса CML Bench [17–19], в том числе модуль управления требованиями и модуль управления расчетными данными, а также справочники и типовые документы из данной предметной области.

В зарубежной практике к передовому опыту относятся результаты, положенные в основу специализированных тяжелых программных комплексов для аэрокосмической области и не только. Характерным признаком движения в направлении комплексирования является объединение разработок компаний STK (моделирование эксплуатации аэрокосмических систем) и ANSYS (физическое моделирование и испытания аэрокосмической техники) [20].

К этому же относится качественное повышение возможностей давно уже разрабатываемого комплекса для мультидисциплинарного моделирования и анализа Amesim компании Siemens PLM Software [21]. Такому же тренду следует и другой мировой лидер в области программного обеспечения для аэрокосмической промышленности Dassault Systemes, ведущий разработки на базе модельно-ориентированной методологии (MBSE — Model Based System Engineering) [22].

Вариантное проектирование. Имитационное моделирование. Схемы декомпозиции задачи проектирования. Современные методологии проектирования. К идее имитационных систем в тех задачах, сложность которых не позволяет выполнить полную формализацию, пришли в 1970-е годы [23]. В области создания летательных аппаратов и автоматизации проектирования они нашли отражение в известной задаче, поставленной генеральным конструктором П.О. Сухим и коллективом ученых и программистов Вычислительного центра Академии наук СССР под руководством Н.Н. Моисеева [24].

Результатом решения этой задачи стали первые системы автоматизированного проектирования. Тогда же стало понятно, что полный перебор всех параметров практически неосуществим и были предложены методические приемы, сводившие задачу к вариантному проектированию в виде схем декомпозиции, построенных на общих принципах последовательного анализа. Самая известная из них для задач автоматизации проектирования технических систем — схема П.С. Краснощекова [25].

Появилось понятие логической схемы проектирования, активно разрабатывались логико-динамические модели для разных областей применения [26, 27]. Целью этих исследований была организация человеко-машинного диалога, поэтому все они неразрывно связаны с программной реализацией.

Сегодня в теоретико-методическом плане мало что изменилось. Известные подходы к созданию сложных систем поддержки объектно-ориентированного проектирования (OOD — Object Oriented Design) [28], разработки на основе требований (RFLP — Requirements, Functions, Logical, Physical) [29], развертывания функций качества (QFD — Quality Function Deployment) [30] являются вариациями логической схемы проектирования, в основу которых положен определенный принцип, сужающий область поиска. Например, для RFLP — положение о том, что создаваемая система — результат последовательного отображения архитектуры требований к ней, архитектуры выполняемых функций, логических элементов, материализуемых в виде архитектуры физических элементов.

Модельно-ориентированная разработка. ЦД. Перечисленные подходы составляют системообразующий каркас направлений исследований по созданию ЦД. Вторичными по отношению к нему являются частные направления, связанные со спецификой моделируемых предметных областей. Здесь состояние исследований характеризуется многовекторностью и лавинообразным числом инициированных в последнее время за рубежом разработок. Можно сказать, что исследуемая предметная область находится на этапе становления и переживает период, аналогичный тому, который был пройден инструментами моделирования космических систем на этапе разработки.

Так, частные программы для расчета орбитальных околоземных КА уже к концу 1980-

годов были оформлены группой программистов, основавших компанию Analytical Graphics, в уже упомянутый широко известный программный продукт STK (Satellite Tool Kit). По мере включения в него дополнительных модулей, расширяющих функциональность и область применения, STK был развит до Systems Tool Kit (приобретен компанией ANSYS). На сегодняшний день этот продукт является де-факто стандартом в разработке космических систем. Конкурирующим зарубежным решением является FreeFlyer компании AI Solution [31]. Его большим преимуществом перед другими продуктами является доступность для научного и академического сообщества.

Аналогичные им отечественные средства находятся в стадии проектирования [32, 33]. Разработаны новые методические подходы, которые можно использовать при их проектировании [34]. Созданы фрагменты комплексов, в основном моделирующие предметную область небесной механики и динамики КА. В ряде случаев их точность превышает упомянутые передовые зарубежные решения [35], но это уже узкоспециализированные средства. Есть и Open Source (общедоступные, разрабатываемые в инициативном порядке) пакеты, наиболее развитый из них — GMAT (General Mission Analysis Tool) [36].

Отдельно следует указать инструментальные средства, относимые к симуляторам космических миссий [37, 38]. В основу большинства из них положены более грубые математические модели. Но они наиболее близки к этапу реализации миссии и интересны тем, что в первом приближении в них лучше реализована логика процесса человеко-машинного взаимодействия.

Следует отметить, что перечисленные средства относятся к области проектирования космических систем. Для поддержки космических миссий на этапе эксплуатации нужны собственные решения, так как дополнительно требуется сбор данных о фактическом состоянии комплекса технических средств миссии, анализ больших объемов данных, выработка прогнозных состояний, моделирование вариантов реализации управляющих воздействий и др.

Такие инструменты начинают создаваться за рубежом. Разработка ЦД Земли была анонсирована главой Европейского космического агентства Йозефом Ашбахером в качестве одной из центральных тем на 36-м Космическом симпозиуме [39]. Корпорация Lockheed Martin

рассматривает технологию ЦД как ключевую для поддержки КА в дальнем космосе в режиме реального времени [40]. В марте 2022 г. Космические силы США выступили заказчиком разработки цифровой модели космической среды по технологии ЦД [41]. В рамках этого контракта создан прототип компьютерного симулятора Slingshot Laboratory компании Slingshot Aerospace, предназначенный для моделирования сценариев космических миссий, активно разрабатываемый сегодня.

Такие технологии широко применяются и в космическом образовании. В качестве примера можно привести исследования научных коллективов ведущих университетов мира (MIT, University of Cambridge, The Alan Turing Institute) в области создания ЦД для аэрокосмической промышленности. Так, в исследованиях, продолжающихся и в настоящее время [42, 43], поставлена цель создания иммерсивной реальности для сравнения характеристик различных авиационных двигателей с целью установления причин отклонений в производительности и выработке рекомендаций по капитальному ремонту их компонентов. Результатом работ по созданию ЦД Земли стала платформа для моделирования космического пространства и орбитальных миссий [44].

В области обработки больших массивов информации отечественными компаниями созданы и развиваются программные продукты для тематической обработки данных с метеорологических спутников [45]. Известны отечественные симуляторы моделирования орбитальных спутников, созданные специалистами частных российских космических компаний, например «СПУТНИКС: симулятор спутника».

Среди новых подходов — создание программно-определяемых полезных нагрузок, когда целевое использование КА заранее жестко не запрограммировано на Земле и может изменяться в зависимости от потребностей во время эксплуатации КА.

ЦД для поддержки космических миссий. Более узкая предметная область, относимая к ЦД для управления и поддержки инопланетных космических миссий с использованием напланетных аппаратов, также характеризуется большим многообразием ЦД. Достаточно исчерпывающее представление может дать реализация этой технологии миссии NASA с применением планетоходов на Марсе — Perseverance [46].

ЦД примарсианивания марсохода, выполненный в среде цифрового моделирования Adams, активно применялся при отработке процесса посадки на планету [47]. Это была повторная реализация доказавшей свою эффективность технологии, ранее она уже использовалась для другого марсианского марсохода Curiosity в программном обеспечении компании MSC Software [48].

Согласованная работа подсистем движения и энергопитания марсохода при расчете траекторий оценивалась на ЦД в программе MapleSim компании Maplesoft [49]. Взаимодействие колес марсохода с грунтом моделировалось в ЦД Vortex Studio разработки компании CM Labs (Канада) [50].

Почти во всех примерах — именно комплексная отработка различных систем аппарата на ЦД типа ЦД процесса в классификации IBM [51].

Важной особенностью ЦД недавних реализаций является двунаправленный обмен данными на постоянной основе, как это сделано в ЦД космического телескопа NASA James Webb, созданного компанией Raytheon [52]. Можно сказать, что технология ЦД коэволюционирует с методами создания и сопровождения сложных систем, предоставляя все больше возможностей.

Подводя итог по обзору технологий ЦД, следует отметить, что научные основы перечисленных конкурирующих разработок в открытой печати отражены достаточно слабо, что является следствием взрывного роста частного сектора ракетно-космической отрасли за рубежом. Поэтому о них можно судить непосредственно по результатам реализации в виде соответствующих программных комплексов, что, по мнению руководителей и специалистов ведущих зарубежных космических фирм, например спутниковой компании York Space Systems, будет определять будущее спутниковых технологий [53].

Кроме того, разрозненный характер результатов приведенных исследований подтверждает новизну научного направления данной работы, в рамках которого частные задачи требуют комплексного рассмотрения при реализации космических миссий и создания соответствующей методической основы.

Методические вопросы разработки ЦД в РКТ. Системно и методически увязать приве-

денные разрозненные примеры можно с использованием:

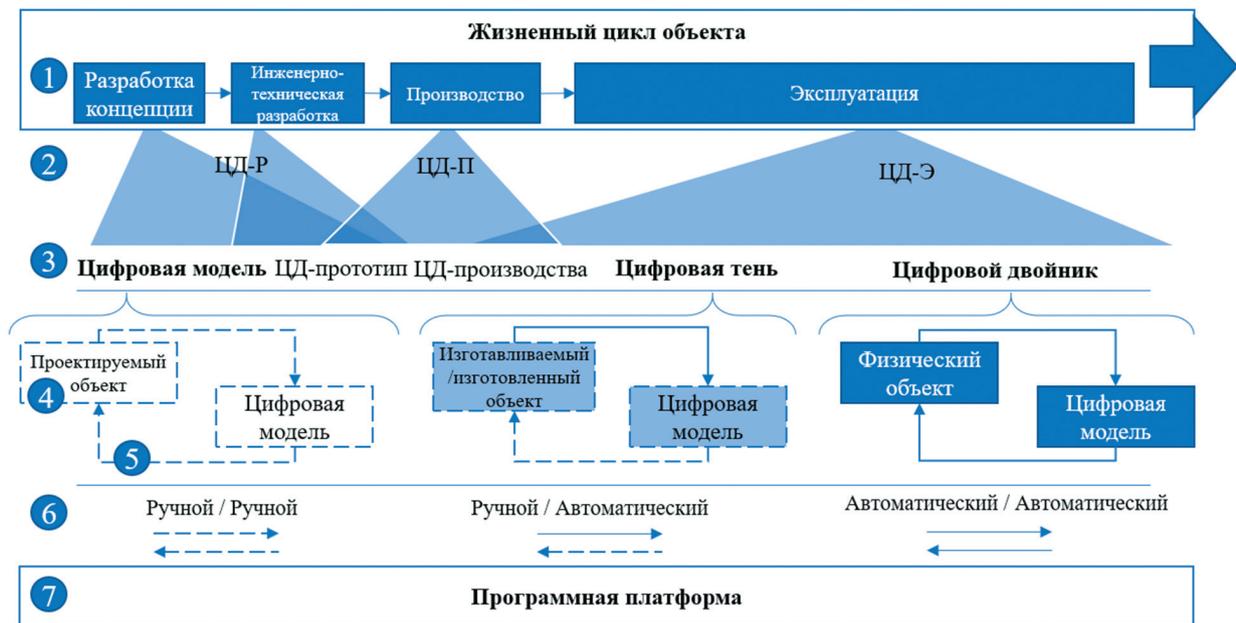
- рис. 1, выполненного с опорой на работы коллектива авторов [54], и результата работы сообщества участников создания отечественного ГОСТ по ЦД изделий; эта часть относится к принципам организации разработки всей сложной наукоемкой техники в контексте технологий ЦД;

- таблицы, сконцентрированной на особенностях моделирования в РКТ на этапах концеп-

туального и инженерно-технического проектирования.

Далее в разрезе выполненной систематизации будет предложен подход к модельному описанию объектов на начальных стадиях создания РКТ.

Трансформация цифровых моделей в ЦД. Согласование моделей. В качестве основы для систематизации авторы работы [54] предлагают градацию степени зрелости ЦД по мере их развития в зависимости от наличия и характера



- 1 Стадии жизненного цикла объекта
- 2 ЦД-Р, ЦД-П, ЦД-Э – цифровой двойник на этапах разработки, производства и эксплуатации ЖЦ объекта
- 3 Степень зрелости цифровых моделей, варианты реализации цифрового двойника
- 4 Информация об объекте по стадиям материализации
- 5 Направление и характер потоков синхронизации информации об объекте
- 6 Режим реализации и обработки потоков обмена информацией
- 7 Программная платформа разработки и управления цифровыми двойниками

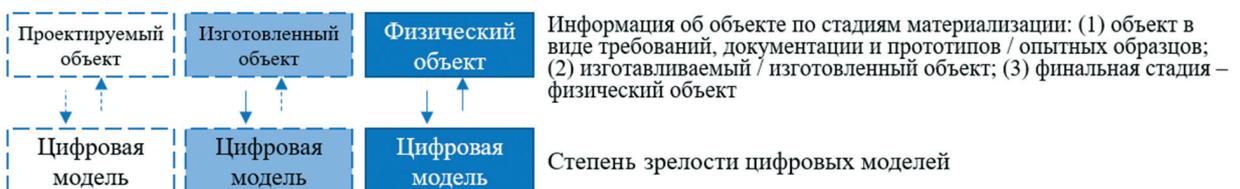


Рис. 1. Схема последовательной трансформации цифровых моделей в ЦД

взаимообмена информацией: от цифровых моделей (ручной обмен данными) к цифровой тени (автоматизированный обмен данными в направлении от физического объекта к цифровой модели) и ЦД (синхронный автоматический обмен данными между физическим объектом и его цифровой моделью).

На рис. 1 степени зрелости цифровых моделей увязаны с этапами ЖЦ изделия и соответствующими вариантами реализации цифровых моделей — ЦД в трактовке ГОСТ Р 57700.37–2021, представленных на рисунке под «куполоми» соответствующих стадий ЖЦ. С этими состояниями по степеням зрелости связаны все более расширяющиеся возможности для анализа и управления целевым объектом, которые подразделены на следующие шесть видов:

- 1) описательная аналитика (только модель);
- 2) анализ (данные о целевом объекте переносятся на модель);
- 3) оперативный анализ (данные о целевом объекте синхронизируются с моделью);
- 4) предписывающая аналитика (данные моделирования передаются на целевой объект с целью изменения его состояния);
- 5) когнитивная аналитика (целевой объект в связке с его ЦД взаимодействуют и функционируют автономно);
- 6) сетевая когнитивная аналитика (ЦД целевого объекта обменивается информацией с другими ЦД, тем самым расширяя возможности по управлению целевым объектом).

Вопросы комплексной увязки моделей разного вида решают с помощью методов системной инженерии на основе моделей (MBSE). Так как речь идет об автоматизации, неудивительно, что для этих целей подошли методы MBSE из программной инженерии Model Driven Engineering (MDE). Основной принцип состоит в разделении областей создания моделей и управления ими.

Создание метамodelей с использованием языковых средств информационного моделирования UML/SysML проводится независимо от прикладных технологий их реализации, что позволяет предоставить не только комфортные условия для разработчиков-предметников, но и получить основу для согласования моделей различных предметных областей целевого объекта.

Согласование моделей для целенаправленного управления выполняется такими способами, как сравнение моделей, преобразование

модели из одной в другую, объединение моделей, перевод модели в текст (как правило, при необходимости формирования отчетных документов) и перевод текста в модель (например, для формирования концептов метамodelей).

Таким образом, методика разработки ЦД, предложенная в работе [54], базируется на последовательном прохождении соответствующих этапов зрелости цифровых моделей.

По мере того, как объект проходит стадии ЖЦ (в виде требований; документации и физических прототипов/опытных образцов; объекта) фиксируется информация об его частных состояниях (расчетных случаях, режимах эксплуатации и др.), по мере накопления которой формируется целостное описание, позволяющее реализовать двунаправленную связь в автоматическом режиме. Это невозможно сделать без использования специализированных программных платформ.

Управление моделями. SPDM-системы. От моделей CAE к ЦД. В машиностроительной промышленности давно известно содержание, скрываемое за аббревиатурами PDM, позже — PLM, призванных обеспечить управляемость и прослеживаемость процессов этапов ЖЦ изделий. Несмотря на более чем 20-летнюю историю [55], на первый план выходят системы класса SPDM [56]. Первоначально предназначенные для инженеров-расчетчиков, работающих с CAE, эти системы все чаще стали ассоциироваться с технологиями в области ЦД. Моделей совершенно разных по своей природе (мультидисциплинарных) становится все больше. Если к этому добавить разные версии одних и тех же моделей, их вариации с разными значениями параметров и т. д., возникает ситуация, при которой данных настолько много, что становится трудно использовать преимущества модельно-ориентированного подхода.

На решение этой проблемы была направлена совместная научная программа Института проблем передачи информации РАН и европейского аэрокосмического концерна Airbus Group [57], в результате которой сегодня распространяется отечественная SPDM-платформа pSeven [58]. По оценкам инженеров Airbus, эффект от сокращения затрат на проектирование самолетов компании составил не менее 10 % [57].

Важно отметить, что центральным элементом SPDM-систем является блок управления расчетными моделями и данными. Однако целевым ориентиром, позволяющим осуществ-

лять направленную разработку, остается блок управления требованиями, который давно присутствует в системах класса PLM. Поэтому предприятия ракетно-космической промышленности [3, 12, 13] часто в качестве платформы используют PLM-решения, дополняя их средствами автоматизации вычислений. В российской платформе CML-Bench присутствуют оба блока, что обусловлено историей разработки системы. Разработчик этого программного обеспечения, выполняя заказы автомобилестроительной промышленности [17] и не владея объектом разработки, был вынужден реализовать этот модуль в рамках своей системы. Хотя это не исключает использования уже настроенного решения в рамках PLM-системы.

Созданный на базе CML-Bench демонстратор ЦД ГТД является ярким и немногочисленным прикладным примером завершенного комплексного описания объекта аэрокосмической отрасли, несмотря на то, что он разработан в рамках фиксированного схемного решения для наиболее простого двигателя малой мощности.

Таким образом, этот пример демонстрирует возможность достижения решения задачи комплексного описания целевого объекта.

Создание моделей. 1D-моделирование. Мультидоменное моделирование. Традиционно такие модели создавались с использованием полнофункциональных средств инженерного (прежде всего, конечно-элементного) анализа CAE. Такие системы общеизвестны: ANSYS, Nastran, ABAQUS и др. Отечественные аналоги, например Логос, интенсивно развиваются.

Однако, как отмечено в работе [59], автоматизированные рабочие места (АРМ) на базе тяжелого программного обеспечения доступны только крупным корпорациям. Кроме того, даже для них АРМ не покрывают полностью потребность в поддержке различных методов анализа, моделирования и синтеза в разных предметных областях. Современные требования вынуждают искать другие подходы к созданию и использованию программного обеспечения. Авторы работы [59] относят к ним графовое представление алгоритма, динамическое управление алгоритмами, максимальную гибкость и вариативность реализуемых алгоритмов, коллективную работу над проектом и др.

На сегодняшний день для создания ЦД мультидоменных моделей в РКТ доступны (в той или иной степени) удовлетворяющие пе-

речисленным требованиям отечественные программные решения, разработанные специалистами аэрокосмической и автомобильной промышленности, в том числе при участии вузов (МГУ, МАИ, МГТУ, МФТИ и др.): Engee [60], SimInTech [61], Euler [62], Pradis [63], MAPC [64] и др. Указанный, далеко не полный перечень, программного обеспечения предназначен для решения задач создания и анализа комплексных моделей систем. Всех их объединяет возможность графического построения математических моделей.

Однако подходы, положенные в их основу, различаются. Например, по словам разработчиков программного обеспечения «Эйлер», инструмент создавался «от описания механических систем», в то время как SimInTech — «от описания систем управления». В результате эволюции обоих программных средств, функциональность каждого из них была дополнена возможностями во взаимно противоположных областях. В итоге оба программных продукта позволяют создавать комплексные модели, в том числе с учетом контура управления целевым объектом.

Проблемы моделирования предметной области РКТ. В настоящее время потенциал имеющегося задела математических моделей в авиакосмической отрасли исчерпан [65]. Используемый на многих предприятиях отрасли принцип разработки изделий на основе адаптации решений по созданным ранее изделиям-аналогам дает неудовлетворительные результаты и не годится для создания техники нового поколения.

Система обучения в аэрокосмических вузах предусматривает отдельные специальные дисциплины, в рамках которых применяются традиционные модели компонентов РКТ: системы управления двигателями, системы энергопитания и др. При этом постановка и решение задачи системного проектирования осуществляется традиционными методами, например методом ограничений, путем поиска функциональной зависимости между целевыми выходными показателями и параметрами.

Анализ работ, посвященных только одному из компонентов РКТ — жидкостному ракетному двигателю, показывает недостаток как в аппарате для комплексного математического моделирования функционирования двигательной установки в целом [66], так и в модельном описании отдельных процессов и систем установки

[67]. Более того, в работе [68] показано что, моделирование этого компонента должно выполняться в составе моделирования объекта верхнего уровня — ракеты-носителя (РН).

Указанные достоинства современных технологий по интеграции и управлению моделями (см. рис. 1) нельзя использовать без пересмотра устройства самих моделей. Особенно это актуально на начальных этапах проектирования, когда нужно определиться со схемным решением. Для комплексной оценки схемного решения необходимы комплексные модели, позволяющие в сжатые сроки качественно оценить перспективность его дальнейшей разработки.

В таблице показано, в каких ограничениях можно вести разработку комплексных моделей.

Ожидается, что увеличение структурной сложности комплексной модели объекта, как следствие учета большего количества факторов его взаимодействия в надсистеме, будет компенсироваться снижением сложности за счет повышения уровня абстракции моделей подсистем. При этом создаваемые цифровые модели надсистем, например, ЦД Земли [39] и космического пространства [41], могут быть использованы как готовые компоненты при разработке разных объектов РКТ.

Основным требованием к разработке таких моделей должна стать возможность их переис-

пользования и пригодность для уточнения с целью их применения для создания ЦД в дальнейшем.

Подходы к созданию комплексных моделей, программная реализация. В отличие от подхода, примененного в работе [54], при котором поэтапно создавался ЦД РН в рамках одной конкретной системы энергопитания для конкретной РН (там же справедливо отмечено, что при включении в этот процесс других систем сложность и трудоемкость моделирования кратно возрастают), предлагается другой путь. Согласно ему, создается комплексная цифровая модель РН (всех систем РН) или КА, но в приближенном виде.

Такие укрупненные модели хорошо изучены, они дают целостное представление о принципах работы целевого объекта и его систем. Найти их можно в известных работах для РН [69] и КА [70]. Отдельные фрагменты их программной реализации для решения специфических задач выполнены энтузиастами разными способами, ознакомиться с которыми можно на профильных форумах, например, космонавтики и космического софта [71]. Примеры реализации электронных параметрических 3D-моделей типовых конструктивных решений разгонных блоков РН в среде геометрического моделирования, выполненных на основе наследия доцен-

Возможные ограничения разработки комплексных моделей на начальных стадиях создания РКТ

Стадия ЖЦ объекта	Комплекс моделей и их особенности на начальных стадиях создания объекта							Уровни моделей		
	объекта	составных частей объекта	процессов внутри объекта	целевого процесса	контура управления объектом	субъектов взаимодействия	среды	рассмотрения	сложности	зрелости
Разработка концепции	Объект в целом	Ограничено	Ограничено	Стационарный процесс/этапы процесса	Управление согласно программе	Субъекты в целом	Изотропность	Макроуровень	Структурная сложность	Комплекс моделей, цифровая модель
Инженерно-техническая разработка	Непостоянство характеристик объекта, его частей, процессов внутри объекта (материал, конструкция, рабочее тело и др.), эмерджентные эффекты от взаимодействия частей и реализации внутренних процессов			Переходные процессы, выход на режим, настройка	Адаптивное управление как компенсация отклонений	Субъект как система компонентов	Неоднородность, неустойчивость (возмущения среды)	Макро/микроуровень	Структурная сложность, гетерогенность, нелинейность	ЦД

та СГАУ Л.П. Юмашева приведены в учебном пособии [72].

Идея состоит в реализации целостного увязанного комплекса набора моделей, точность и детализация которых определяется вектором их существенных параметров для объекта в целом и векторов для каждой из его подсистем. В этом случае появляется основа для получения решения по устройству изделия, учитывающего все его части в противовес частным более точным детальным моделям отдельных подсистем, увязку которых выполняют в ручном режиме ввиду их сложности.

Основная сложность заключается в определении такого набора векторов и состава существенных параметров для каждого вектора, при которых, с одной стороны, можно было бы получить целостное описание изделия с последующим численным моделированием с приемлемыми затратами машинного времени, а с другой — чтобы этого было достаточно для нахождения комбинации параметров, обеспечивающих решение для системы в целом из области Парето (лучшие параметры одних систем будут ухудшать значения других).

В отличие от традиционного подхода к созданию таких моделей, параметры увязываются не функциональными отношениями (во многих случаях определить эти функции в явном виде не представляется возможным), а через связи частей моделируемого объекта. Параметры являются атрибутами выделенных классов (типов) объекта. Описание объектов выполняется

с помощью языков информационного моделирования UML, Express и др. Далее, для соединения разных моделей используются методы онтологического моделирования (аппарат RDF-графов) или большие лингвистические модели (LLM), связывающие концепты предметной области на основе семантической близости понятий.

В основу положений научной новизны работы положена разработка методической основы интеграции мультидоменных моделей, самих моделей, ориентированных на дальнейшее сопряжение, моделей разной степени абстракции, согласованных между собой и пригодных для дальнейшей детализации, и модульной архитектуры программных приложений.

Прикладными результатами, используемыми для студентов третьего курса МАИ в рамках дисциплины «Основы устройства РН и КА» являются версии моделей, применяемые для определения устройства РН и КА на этапах ЖЦ при решении транспортных и целевых задач [73].

На рис. 2 приведен фрагмент модели выведения трехступенчатой РН, разработанной в программной платформе модельно-ориентированного проектирования Engee и используемой для определения основных проектных параметров РН на начальных стадиях проектирования.

Модель построена на основе графического описания уравнений движения. В левой части рис. 2 показана структура модели, где графиче-

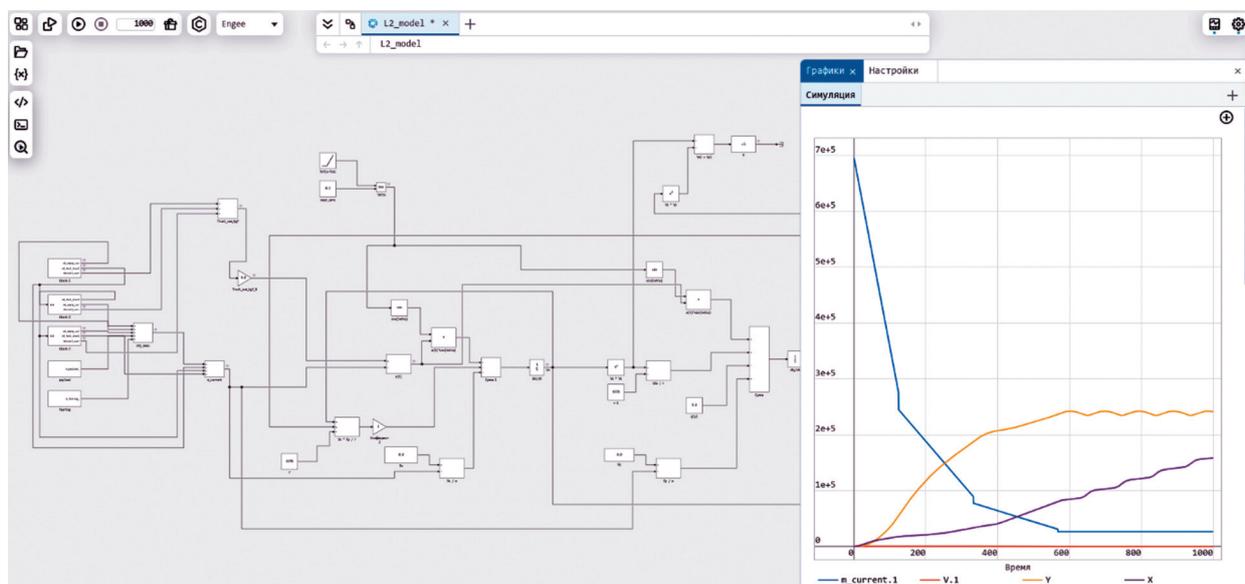


Рис. 2. Фрагмент модели выведения РН, созданной в среде Engee

ски заданы векторы параметров и связи между ними для модели РН и ее частей (массы: стартовой, конструкции, полезной нагрузки, ступеней; удельный импульс и тяга двигателей; ускорение, скорость полета, координаты положения и др.), модели окружения РН (координаты точки старта, радиус Земли, плотность воздуха и др.), модели управления РН (углы тангажа в момент старта и выхода на заданную орбиту и др.).

В правой части рис. 2 показаны графики изменения параметров: текущей массы РН (видно ступенчатое изменение массы в моменты сброса отработанных ракетных блоков), координат X , Y местоположения РН, отображаемых в режиме реального времени в ходе динамической симуляции.

Увеличенная левая часть графических блоков рис. 2 показана на рис. 3, где можно проследить логику описания работы ракетных блоков РН block-1, block-2 и block-3, полезной нагрузки payload и обтекателя fayring. Модель имеет иерархическую вложенную структуру (устройство самих блоков — на уровень ниже, на рис. 3 не показано), так для block-1, block-2 и block-3 показан верхний уровень — только выходные параметры блоков (текущие значения массы блока и массы топлива в нем). Сигналы от них распределяются между блоками и

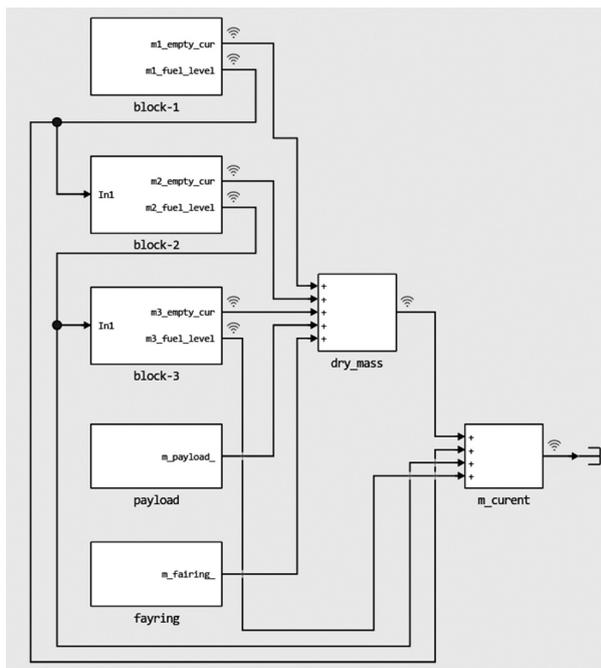


Рис. 3. Модель для описания работы ракетных блоков РН

суммируются в блоках `dry_mass` и `m_current`, соответственно, текущей пустой и текущей массы РН.

Модель можно дополнять и уточнять по мере ввода дополнительных параметров, повышающих точность перечисленных компонентов, но в то же время усложняющих ее. Приведенный способ построения модели использован для демонстрации основных принципов ракетной техники, наглядно показывающих переход от уравнений движения к логике работы основных систем и элементов конструкции РН.

Комплексование моделей и организация их взаимодействия выполняются с помощью библиотек «Подсистемы» и «Конечные автоматы». Среда позволяет генерировать C-код, что в дальнейшем можно использовать для визуализации динамики движения в динамических системах 3D-рендеринга (по типу Unreal Engine, Unigine и др.) с представлением анимации процесса выведения РН на орбиту.

В модели предусмотрены интерфейсы (так называемые заглушки) для подключения моделей подсистем, разрабатываемых разными исполнителями. Среда обеспечивает совместную работу и контроль версии моделей. Таким образом, создаваемую комплексную модель в дальнейшем можно уточнить и дополнить более строгими и детальными моделями в рамках специализированных курсов (двигатели летательных аппаратов, теория автоматического управления и др.). В рамках этих курсов, посвященных углубленному изучению устройства компонентов РКТ и их систем, существуют теоретические расчетные модели (в ряде случаев, имеющие аналитическое решение), что может служить валидационным базисом разрабатываемых комплексных моделей объектов РКТ и их элементов, особенно на первоначальных этапах их разработки.

Опыт разработки стартовых моделей показал существенное увеличение качества предлагаемых студентами проектов РН для решения поставленных задач выведения в рамках курсовых проектов, а также материалов дипломных проектов объектов РКТ в части сложности их проработки. В промышленности указанные подходы развиваются в рамках научных работ аспирантов, работающих на предприятиях отрасли и ведущих исследования по созданию ЦД реальных объектов РКТ.

Выводы

1. Рассмотрена проблема недостаточной методической проработки создания целостных комплексных моделей в РКТ. Отмечено, что она во многом связана с уровнем развития цифровых технологий и владением соответствующим технологическим стеком в области программной реализации: подавляющее число публикаций в ведущих научных журналах афилировано с коммерческими ИТ-компаниями.

2. Выполнен аналитический обзор технологий цифрового моделирования и ЦД с описа-

нием их методической основы в отраслях авиа-, ракетостроения, космических систем.

3. Показано, что эффективность использования технологий определяется не только предоставляемыми возможностями в части согласования и управления моделями, но и их устройством.

4. Предложен подход, позволяющий подойти к проблеме реализации комплексных моделей и работы с ними на начальных стадиях создания РКТ. Приведены средства решения этой задачи, а также стартовые модели, разработанные на их основе.

Литература

- [1] *Эффективное производство 4.0. Мат. практ. промышленной конф.* URL: <https://oeec-conf.ru/materials?ysclid=lybh4trxl617710582> (дата обращения: 20.06.2024)
- [2] Кабанов А.А., Федоров И.А., Дацюк И.В. Содержание и опыт реализации направления модельно-ориентированной разработки ракетно-космических систем в профильных учебных заведениях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 11, с. 78–91, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-11-78-91>
- [3] Создание виртуальной платформы для проектирования цифровых двойников. *borlas.ru: веб-сайт*. URL: <https://www.borlas.ru/projects/27/2907> (дата обращения: 20.06.2024).
- [4] Ученые создадут цифровой двойник систем космического спутника «Аист» для защиты от сбоев. *Дистанционное зондирование Земли из космоса*, 2020, № 19, с. 21. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2022/Dec/19..53..10.20.pdf>
- [5] Асанова Е.А., Денисов А.Ю., Ревяков Г.А. Научно-методические подходы к формированию модели технологического ресурса цифрового двойника предприятия. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2023, т. 10, № 4, с. 3–14.
- [6] Яхутин С.А. Виртуальные механические испытания объектов ракетно-космической техники с использованием цифровых двойников. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2021, т. 8, № 3, с. 43–47, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.43.47>
- [7] Кочетков А.Ю. Повышение эксплуатационных и метрологических характеристик термовакуумной камеры ВК-48 путем создания ее цифрового двойника. *Вестник РВО*, 2024, № 2. URL: <https://www.vestnik-rvo.ru/issues/2024-06/6097/> (дата обращения: 20.06.2024).
- [8] Юдинцев А.Г., Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. и др. Структурно-функциональная схема цифрового двойника испытательного комплекса системы электроснабжения космических аппаратов на основе многоуровневой компьютерной модели. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 2022, № 3-4, с. 141–150, doi: <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-141-150>
- [9] Создание цифрового двойника космоса для управления спутниками. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:%D0%A6%D0%9D%D0%98%D0%98%D0%BC%D0%B0%D1%88:%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%B4%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%BE%D1%81%D0%B0?ysclid=mele3auk (дата обращения: 25.05.2024).
- [10] Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Тимофеев Ю.А. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2021, т. 8, № 3, с. 11–19, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.11.19>

- [11] Лихтциндер Б.Я., Ольберг П.А. Моделирование и цифровые двойники. *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*, 2022, № 4, с. 20–32, doi: <https://doi.org/10.14498/tech.2022.4.2>
- [12] Центр Келдыша завершил 3-й этап по внедрению отечественных ИТ технологий в ракетно-космическую технику. keldysh-space.ru: веб-сайт. URL: https://keldysh-space.ru/press-tsentr/novosti/zavershen-3-iy-etap-po-vnedreniyu-otechestvennykh-it-tekhnologiy-v-raketno-kosmicheskuyu-tekhniku/?sphrase_id=2702 (дата обращения: 20.06.2024)
- [13] Булгаков Д.Г., Иванов А.В., Коновалов Р.А. и др. Применение современных САПР в цикле разработки ЖРД. *Труды НПО Энергомаш*, 2022, № S38-39, с. 259–289.
- [14] Виноградов К.А., Никулин А.С., Шмотин Ю.Н. Опыт АО «ОДК» по внедрению технологий цифрового двойника при создании газотурбинных двигателей. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2023, т. 22, № 4, с. 25–36, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2023-22-4-25-36>
- [15] Зильберберг В.Л., Куприянов Л.А., Мусеев А.А. Цифровой двойник вертолетного двигателя. В: *Перспективы развития двигателестроения. Мат. межд. науч.-тех. конф. Им. Н.Д. Кузнецова*. Т. 1. Самара, Самарский ун-т, 2023, с. 79–80.
- [16] Демонстратор цифрового двойника в облике малоразмерного газотурбинного двигателя на базе отечественного программного обеспечения: первые результаты работы и перспективы развития. URL: <https://ascon.ru/news/2023/10/20/demonstrator-cifrovogo-dvojnika-v-oblike-malorazmernogo-gazoturbinnogo-dvigatelya-na-baze-otechestvennogo-programmnogo-obespecheniya-pervye-rezultaty-raboty-i-perspektivy-razvitiya/?ysclid=melehrce1g588864793> (дата обращения: 25.05.2024).
- [17] Коростелкин А.А., Клявин О.И., Алешин М.В. и др. Оптимизация массы кузова в контексте краш-теста автомобиля класса внедорожник. *Вестник Машиностроения*, 2019, № 9, с. 44–50.
- [18] Боровков А., Бураков В., Мартынец Е. и др. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников "Digital Twins" CML-Bench®. Часть 1. САПР и графика, 2023, № 8, с. 42–51.
- [19] Боровков А., Бураков В. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников "Digital Twins" CML-Bench®. Часть 2. САПР и графика, 2023, № 8, с. 54–64.
- [20] Short C., Kay-Bunnell L., Cather D. et al. Revisiting trajectory design with STK astrogator. Part 2. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conf.*, 2021, art. AAS 21-561.
- [21] Roumeliotis I. et al. Dynamic simulation of a rotorcraft hybrid engine in Simcenter Amesim. *Proc. ERF2018*, 2018. URL: <https://core.ac.uk/reader/200198060> (дата обращения: 20.06.2024).
- [22] Audoire R., Colas T. NAVAIS webinar series: model based systems engineering in 3DEXPERIENCE. *NAVAIS Webinars of 2021*. URL: https://www.researchgate.net/publication/351455284_navais_webinar_series_model_based_systems_engineering_in_3dexperience (дата обращения: 20.06.2024).
- [23] Моисеев Н.Н. *Математические задачи системного анализа*. Москва, Наука, 1981. 488 с.
- [24] Моисеев Н.Н. *Математика ставит эксперимент*. Москва, Наука, 1979. 224 с.
- [25] Краснощеков П.С. и др. *Информатика и проектирование*. Москва, Знание, 1986. 46 с.
- [26] Трегуб В.Г. О математическом описании циклических технологических процессов в аппаратах периодического действия. *Электронное моделирование*, 1982, № 2, с. 85–88.
- [27] Скурихин В.И., ред. *Построение современных систем автоматизированного проектирования*. Киев, Наукова думка, 1983. 248 с.
- [28] Буч Г., Максимчук Р.А., Энгл М.У. и др. *Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений*. Москва, Вильямс, 2008. 720 с.
- [29] Li T., Lockett H., Lawson C. Using Requirement-Functional-Logical-Physical models to support early assembly process planning for complex aircraft systems integration. *J. Manuf. Syst.*, 2020, vol. 54, pp. 242–257, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.01.001>
- [30] Childs P.R.N. Specification. In: *Mechanical design engineering handbook*. Butterworth-Heinemann, 2019, pp. 49–73, doi: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05252-X>
- [31] Binder J. Planning space missions with FreeFlyer. *Aerospace America*, 2005, vol. 43, no. 7, pp. 24–25.
- [32] Зухба Р.Д., Куракин П.В., Малинецкий Г.Г. и др. Система моделирования «КОСКОН» как инструмент поддержки принятия решений в космической отрасли. *Препринты*

- ИПМ им. М.В. Келдыша, 2015, № 113. URL: https://keldysh.ru/papers/2015/prep2015_113.pdf
- [33] Балухто А.Н., Соколов Б.В., Карсаев О.В. Облачная платформа iWebsim как средство имитационного моделирования космических систем. Тр. Десятой всерос. науч.-практ. конф. ИММОД–2021. Санкт–Петербург, АО ЦТСС, 2021, с. 95–104.
- [34] Ключников В.Ю., Романов А.А. Концептуальное проектирование космических систем на основе Leap-принципов. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2019, т. 6, № 3, с. 42–56.
- [35] Овчинников М.Ю., Ткачев С.С., Ролдугин Д.С. и др. Программный комплекс для прецизионного моделирования орбитального и углового движения искусственных спутников Земли. *Управление движением и навигация летательных аппаратов. Сб. тр. XVII Всерос. семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов*. Ч. 1. Самара, Самарский ун-т, 2013, с. 121–123.
- [36] Parker J., Conway D. Using the general mission analysis tool (GMAT). *AAS Guidance, Navigation and Control Conf.*, 2017, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12685.54249>
- [37] Schweiger M. Orbiter: a free spacecraft simulation tool. *2nd ESA Workshop on Astrodynamics Tools and Techniques ESTEC*, 2004. URL: <https://trajectory.estec.esa.int/Astro/2nd-astro-workshop-presentations/025%20ORBITERSIM,%20a%20free%20spacecraft%20simulation%20tool.pdf> (дата обращения: 20.06.2024).
- [38] Kawthalkar A., Shah M., Prachchhak I. Modeling and simulation of a direct-ascent anti-satellite missile using Kerbal Space Program (KSP). *AS*, 2022, vol. 5, no. 6, pp. 285–299, doi: <https://doi.org/10.1007/s42401-022-00141-1>
- [39] Rothe D. When the world is an object: on the governmental promise of a digital twin earth. *Int. Polit. Sociol.*, 2024, vol. 18, no. 3, art. olae022, doi: <https://doi.org/10.1093/ips/olae022>
- [40] *LM digital twin maturity model. Lockheed Martin Corporation — 2021*. URL: https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/space/documents/digitaltwin/Lockheed%20Martin%20Digital%20Twin%20Maturity%20Model_2021.pdf (дата обращения: 10.06.2024).
- [41] Erwin S. *Slingshot wins 25 million space-force contract to develop digital-twin of the space environment*. Spacenews. URL: <https://spacenews.com/slingshot-wins-25-million-space-force-contract-to-develop-digital-twin-of-the-space-environment/> (дата обращения: 10.06.2024).
- [42] Tadeja S., Lu Y., Seshadri P. et al. Digital twin assessments in virtual reality: an explorational study with aeroengines. *IEEE Aerospace Conf.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.17863/CAM.47663>
- [43] Tadeja S.K., Seshadri P. AeroVR: An immersive visualisation system for aerospace design and digital twinning in virtual reality. *Aeronaut. J.*, 2020, vol. 124, no. 1280, pp. 1615–1635, doi: <https://doi.org/10.1017/aer.2020.49>
- [44] Key C., Ferris A., Geissbuhler M. et al. All-sky electro-optical tracking of megacostellations in low earth orbit. *AMOS Conf.*, 2022. URL: https://amostech.com/TechnicalPapers/2022/Optical-Systems_Instrumentation/Key.pdf (дата обращения: 20.06.2024).
- [45] Gershenzon O. «Lenticularis» is the new approach in L-band ground stations for LEO satellites. *CSPP Uses's Group Conf.*, 2019. URL: https://www.ssec.wisc.edu/meetings/cspp/2019/presentations/files/24%20Gershenzon_Olga_Lorett_LLC_Presentation.pdf (дата обращения: 20.06.2024).
- [46] Sun V.Z., Hand K.P., Stack K.M. et al. Overview and results from the Mars 2020 Perseverance rover's first science campaign on the Jezero crater floor. *JGR Planets*, 2023, vol. 128, no. 6, art. e2022JE007613, doi: <https://doi.org/10.1029/2022JE007613>
- [47] Betz E. The Skycrane: how NASA's Perseverance rover will land on Mars. *Astronomy Magazine*, 2021. URL: <https://www.astronomy.com/space-exploration/the-skycrane-how-nasas-perseverance-rover-will-land-on-mars/> (дата обращения: 20.06.2024).
- [48] Ширококов В. Без права на ошибку. *CADmaster*, 2012, № 6, с. 40–44.
- [49] Yue B. *A hardware-in-the-loop test platform for planetary rovers*. Master Thesis. University of Waterloo, 2011. 113 p.

- [50] Azimi A., Holz D. et al. Mobility prediction of rovers on soft terrain: effects of wheel- and tool-induced terrain deformations. *Adaptive Mobile Robotics*, 2012, pp. 647–654.
- [51] Saracco R. Digital twins: evolution in manufacturing. *IEEE Digital Reality*, 2022. 32 p.
- [52] McElwain M.W., Feinberg L.D., Perrin M.D. et al. The James Webb space telescope mission: optical telescope element design, development, and performance. *PASP*, 2023, vol. 135, art. 058001, doi: <https://doi.org/10.1088/1538-3873/acada0>
- [53] Erwin S. York Space Systems acquires emergent space technologies. URL: <https://spacenews.com/york-space-systems-acquires-emergent-space-technologies> (дата обращения: 28.06.2024).
- [54] Wei R., Yang R., Liu S. et al. Towards an extensible model-based digital twin framework for space launch vehicles. *J. Ind. Inf. Integration*, 2024, vol. 41, art. 100641, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100641>
- [55] Norris M. 20 years of SPDM in successful production; towards a convergence of SPDM and PIDO. *NAFEMS World Congress 2021 SPDM International Conference*. 24 p.
- [56] Britto Maria R., de Freitas Leal M., Sousa Junior E. et al. Applications of SPDM in aircraft structural analysis at Embraer. *Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci.*, 2019, vol. 6, art. 12, doi: <https://doi.org/10.1186/s40323-019-0136-9>
- [57] Прохоров А.А., Назаренко А.М. Архитектура системы управления потоками работ с возможностью облачного и настольного развертывания. *Четвертый НСКФ*, 2015. URL: http://2015.nscf.ru/Presentations/08_Integraciya_visokoyrovnevix_resyrsov/8_05_347_ProkhorovAA.pdf (дата обращения: 20.06.2024).
- [58] Gusev M.P., Nikolaev S.M., Uzhinsky I.K. et al. Application of optimization in the early stages of product development, using a small UAV case study. In: *Product lifecycle management to support industry 4.0*. Springer, 2018, pp. 294–303, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01614-2_27
- [59] Биряльцев Е.В., Галимов М.Р., Демидов Д.Е. и др. Платформенный подход к выполнению исследовательских и проектных работ с использованием высокопроизводительных вычислений. *Программные системы: теория и приложения*, 2019, т. 10, № 2, с. 121–153, doi: <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2019-10-2-121-153>
- [60] Цымбал М.Р., Семичастнов А.Е., Балакин Д.А. и др. Разработка цифрового двойника наземной радионавигационной системы по принципам модельно-ориентированного проектирования с помощью математической среды моделирования Engae. *Труды МАИ*, 2024, № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180679>
- [61] Хабаров С.П., Шилкина М.Л. *Основы моделирования технических систем. Среда Simintech*. Санкт-Петербург, Лань, 2022. 120 с.
- [62] Бойков В.Г., Юдаков А.А. Моделирование динамики системы твердых и упругих тел в программном комплексе Euler. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2011, № 1, с. 42–52.
- [63] Карпенко А.П., Мухлисуллина Д.Т., Овчинников В.А. Разработка математической модели двигателя внутреннего сгорания с использованием программного комплекса PRADIS. *Наука и образование: научное издание*, 2015, № 1. EDN: KCKRWX
- [64] Ганджа Т.В., Ушаков А.О., Молоков П.Б. и др. Разработка математических моделей для аппаратов ядерно-топливного цикла в среде моделирования MAPS и их интеграция в виртуальную лабораторию. *Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти. Мат. межд. науч.-метод. конф. Ч. 1*. Томск, ТУСУР, 2024, с. 148–152.
- [65] Боровков А., Рябов Ю., Марусев В. «Умные» цифровые двойники – основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения. *Трамплин к успеху*, 2018, № 13, с. 12–16.
- [66] Партола И.С. Развитие средств математического моделирования двигательных установок ракет космического назначения. *Труды МАИ*, 2011, № 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26017>
- [67] Сафуанов Р.Р., Хороших А.В., Сальников А.Ф. К некоторым вопросам математического моделирования работы жидкостных ракетных двигателей. *Двигатель*, 2019, № 2, с. 1–11.

- [68] Mena D.J., Pluchart S., Mouvand S. et al. Rocket engine digital twin. *TFAWS*, 2019. URL: <https://tfaws.nasa.gov/wp-content/uploads/TFAWS19-ID-04-Paper.pdf> (дата обращения: 20.06.2024).
- [69] Феодосьев В.И. *Основы техники ракетного полета*. Москва, Наука, 1979. 494 с.
- [70] Фортескью П., ред., Суайдера Г., Старка Д. *Разработка систем космических аппаратов*. Москва, Альпина Паблицер, 2015. 764 с.
- [71] *Космический софт*. *forum.novosti-kosmonavtiki.ru: веб-сайт*. URL: <https://forum.novosti-kosmonavtiki.ru/index.php?topic=8151.0/> (дата обращения: 30.05.2024).
- [72] Баранов Д.А., Еленев В.Д. *Типовые решения в проектировании и конструировании элементов ракет-носителей*. Самара, Изд-во Самарского ун-та, 2020. 112 с.
- [73] Кабанов А.А. Прототипирование в разработке изделий ракетно-космической техники и систем их производства. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, № 8, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-8-2202>

References

- [1] *Effektivnoe proizvodstvo 4.0. Mat. prakt. promyshlennoy konf.* [Effective Production 4.0. Proc. Industrial Conf.]. URL: <https://oe-conf.ru/materials?ysclid=lybh4trxlff617710582> (accessed: 20.06.2024) (in Russ.).
- [2] Kabanov A.A., Fedorov I.A., Datsyuk I.V. The content and experience of implementing the direction of model-based development of rocket and space systems in specialized educational institutions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 11, pp. 78–91, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-11-78-91> (in Russ.).
- [3] *Sozдание virtualnoy platformy dlya proektirovaniya tsifrovyykh dvoynikov* [Making virtual platform for designing digital twins]. *borlas.ru: website*. URL: <https://www.borlas.ru/projects/27/2907> (accessed: 20.06.2024). (In Russ.).
- [4] Scientists to create digital twin of “Aist” space satellite systems to protect against failures. *Distantionnoe zondirovaniye Zemli iz kosmosa*, 2020, no. 19, p. 21. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/2022/Dec/19..53..10.20.pdf> (In Russ.).
- [5] Asanova E.A., Denisov A.Yu., Revyakov G.A. Scientific and methodological approaches to the formation of a technological resource model of a digital twin of an enterprise. *Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informatsionnyye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2023, vol. 10, no. 4, pp. 3–14. (In Russ.).
- [6] Yakhutin S.A. Virtual mechanical testing of rocket and space technology objects using digital twins. *Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informatsionnyye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2021, vol. 8, no. 3, pp. 43–47, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.43.47> (in Russ.).
- [7] Kochetkov A.Yu. Improving the operational and metrological characteristics of the vk-48 thermal vacuum chamber by creating its digital counterpart. *Vestnik RVO* [RVO Bulletin], 2024, no. 2. URL: <https://www.vestnik-rvo.ru/issues/2024-06/6097/> (accessed: 20.06.2024). (In Russ.).
- [8] Yuditsev A.G., Dmitriev V.M., Gandzha T.V. et al Structural and functional diagram of the digital twin of the test complex of the spacecraft power supply system based on a multi-level computer model. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekxy i sistemy* [Electrical and Data Processing Facilities and Systems], 2022, no. 3-4, pp. 141–150, doi: <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-141-150> (in Russ.).
- [9] *Sozдание tsifrovogo dvoynika kosmosa dlya upravleniya sputnikami*. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:%D0%A6%D0%9D%D0%98%D0%98%D0%BC%D0%B0%D1%88:%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%B4%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%BE%D1%81%D0%B0?ysclid=mele3auk (accessed: 25.05.2024). (In Russ.).
- [10] Potyupkin A.Yu., Volkov S.A., Timofeev Yu.A. Group control of multisatellite orbital grouping based on the concept of joint operating modes. *Raketno-kosmicheskoye priboro-*

- stroenie i informatsionnye sistemy*, 2021, vol. 8, no. 3, pp. 11–19, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.11.19> (in Russ.).
- [11] Likhhtsinder B.Ya., Olberg P.A. Modeling and digital twin. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2022, no. 4, pp. 20–32, doi: <https://doi.org/10.14498/tech.2022.4.2> (in Russ.).
- [12] *Tsentr Keldysha zavershil 3-y etap po vnedreniyu otechestvennykh IT tekhnologiy v raketno-kosmicheskuyu tekhniku* [Keldysh Centre completed the 3rd stage of introducing domestic IT technologies into rocket and space technology]. *keldysh-space.ru: website*. URL: https://keldysh-space.ru/press-tsentr/novosti/zavershen-3-iy-etap-po-vnedreniyu-otchestvennykh-it-tekhnologiy-v-raketno-kosmicheskuyu-tekhniku/?sphrase_id=2702 (accessed: 20.06.2024) (In Russ.).
- [13] Bulgakov D.G., Ivanov A.V., Konovalov R.A. et al. Application of modern CAD systems in the development cycle of a liquid-propellant rocket engine. *Trudy NPO Energomash*, 2022, no. S38-39, pp. 259–289. (In Russ.).
- [14] Vinogradov K.A., Nikulin A.S., Shmotin Yu.N. JSC “ODK” experience in implementing digital twin technologies in the design of gas turbine engines. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2023, vol. 22, no. 4, pp. 25–36, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2023-22-4-25-36> (in Russ.).
- [15] Zilberberg V.L., Kupriyanov L.A., Museev A.A. Tsifrovoy dvoynik vertoletnogo dvigatelya [Digital twin of helicopter engine]. V: *Perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya* [In: Prospects of development of engine building]. *Mat. mezhd. nauch.-tekh. konf. Im. N.D. Kuznetsova. T. 1* [Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. n.a. N.D. Kuznetsov. Vol. 1]. Samara, Samarskiy un-t Publ., 2023, pp. 79–80. (In Russ.).
- [16] *Demonstrator tsifrovogo dvoynika v oblike malorazmernogo gazoturbinnogo dvigatelya na baze otechestvennogo programmno obespecheniya: pervyye rezul'taty raboty i perspektivy razvitiya*. URL: <https://ascon.ru/news/2023/10/20/demonstrator-cifrovogo-dvoynika-v-oblike-malorazmernogo-gazoturbinnogo-dvigatelya-na-baze-otchestvennogo-programmnogo-obespecheniya-pervye-rezultaty-raboty-i-perspektivy-razvitiya/?ysclid=melehrce1g588864793> (accessed: 25.05.2024). (In Russ.).
- [17] Korostelkin A.A., Klyavin O.I., Aleshin M.V. et al. Optimization of frame mass in crash testing of off-road vehicles. *Vestnik Mashinostroeniya*, 2019, no. 9, pp. 44–50. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Engin. Res.*, 2019, vol. 39, no. 12, pp. 1021–1028, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19120116>)
- [18] Borovkov A., Burakov V., Martynets E. et al. The CML-Bench® Digital Twins development and application platform. Part 1. *SAPR i grafika*, 2023, no. 8, pp. 42–51. (In Russ.).
- [19] Borovkov A., Burakov V. The CML-Bench® Digital Twins development and application platform. Part 2. *SAPR i grafika*, 2023, no. 8, pp. 54–64. (In Russ.).
- [20] Short C., Kay-Bunnell L., Cather D. et al. Revisiting trajectory design with STK astrogator. Part 2. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conf.*, 2021, art. AAS 21-561.
- [21] Roumeliotis I. et al. Dynamic simulation of a rotorcraft hybrid engine in Simcenter Amesim. *Proc. ERF2018*, 2018. URL: <https://core.ac.uk/reader/200198060> (accessed: 20.06.2024).
- [22] Audoire R., Colas T. NAVAIS webinar series: model based systems engineering in 3DEXPERIENCE. *NAVAIS Webinars of 2021*. URL: https://www.researchgate.net/publication/351455284_navais_webinar_series_model_based_systems_engineering_in_3dexperience (accessed: 20.06.2024).
- [23] Moiseev N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 488 p. (In Russ.).
- [24] Moiseev N.N. *Matematika stavit eksperiment* [Mathematics makes an experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 224 p. (In Russ.).
- [25] Krasnoshchekov P.S. et al. *Informatika i projektirovanie* [Information technologies and design]. Moscow, Znanie Publ., 1986. 46 p. (In Russ.).
- [26] Tregub V.G. Mathematical description of cyclic technological processes in batch apparatuses. *Elektronnoe modelirovanie*, 1982, no. 2, pp. 85–88. (In Russ.).

- [27] Skurikhin V.I., ed. *Postroenie sovremennykh sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Construction of modern systems of computer-aided design]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983. 248 p. (In Russ.).
- [28] Booch G., Maksimchuk R.A., Engle M.W. et al. *Object-oriented analysis and design with applications*. Addison-Wesley, 2007. 720 p. (Russ. ed.: *Obektno-orientirovannyi analiz i proektirovanie s primerami prilozheniy*. Moscow, Vilyams Publ., 2008. 720 p.)
- [29] Li T., Lockett H., Lawson C. Using Requirement-Functional-Logical-Physical models to support early assembly process planning for complex aircraft systems integration. *J. Manuf. Syst.*, 2020, vol. 54, pp. 242–257, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.01.001>
- [30] Childs P.R.N. Specification. In: *Mechanical design engineering handbook*. Butterworth-Heinemann, 2019, pp. 49–73, doi: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05252-X>
- [31] Binder J. Planning space missions with FreeFlyer. *Aerospace America*, 2005, vol. 43, no. 7, pp. 24–25.
- [32] Zukhba R.D., Kurakin P.V., Malinetskiy G.G. et al. The simulation system 'COSCON' as a tool for decision support in the space industry. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* [KIAM Preprint], 2015, no. 113. URL: https://keldysh.ru/papers/2015/2015_prep2015_113.pdf (in Russ.).
- [33] Balukhto A.N., Sokolov B.V., Karsaev O.V. [iWebsim cloud platform as a tool for space system simulation]. *Tr. Desyatoy vseros. nauch.-prakt. konf. IMMOD-2021* [Proc. 10th Russ. Sci.-Pract. Conf. IMMOD-2021]. Sankt-Petersburg, AO TsTSS Publ., 2021, pp. 95–104. (In Russ.).
- [34] Klyushnikov V.Yu., Romanov A.A. Conceptual design of space systems based on lean principles. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2019, vol. 6, no. 3, pp. 42–56. (In Russ.).
- [35] Ovchinnikov M.Yu., Tkachev S.S., Roldugin D.S. et al. [Software complex for precision modelling of orbital and angular motion of artificial Earth satellites]. *Upravlenie dvizheniem i navigatsiya letatelnykh apparatov. Sb. tr. XVII Vseros. seminaru po upravleniyu dvizheniem i navigatsii letatelnykh apparatov. Ch. 1* [Motion Control and Navigation of Aircraft. Proc. XVII Russ. Workshop on Motion Control and Aircraft Navigation. P. 1]. Samara, Samarskiy un-t Publ., 2013, pp. 121–123. (In Russ.).
- [36] Parker J., Conway D. Using the general mission analysis tool (GMAT). *AAS Guidance, Navigation and Control Conf.*, 2017, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12685.54249>
- [37] Schweiger M. Orbiter: a free spacecraft simulation tool. *2nd ESA Workshop on Astrodynamics Tools and Techniques ESTEC*, 2004. URL: <https://trajectory.estec.esa.int/Astro/2nd-astro-workshop-presentations/025%20ORBITERSIM,%20a%20free%20spacecraft%20simulation%20tool.pdf> (accessed: 20.06.2024).
- [38] Kawthalkar A., pp.hah M., Prachchhak I. Modeling and simulation of a direct-ascent anti-satellite missile using Kerbal Space Program (KSP). *AS*, 2022, vol. 5, no. 6, pp. 285–299, doi: <https://doi.org/10.1007/s42401-022-00141-1>
- [39] Rothe D. When the world is an object: on the governmental promise of a digital twin earth. *Int. Polit. Sociol.*, 2024, vol. 18, no. 3, art. olae022, doi: <https://doi.org/10.1093/ips/olae022>
- [40] LM digital twin maturity model. Lockheed Martin Corporation — 2021. URL: https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/space/documents/digitaltwin/Lockheed%20Martin%20Digital%20Twin%20Maturity%20Model_2021.pdf (accessed: 10.06.2024).
- [41] Erwin S. Slingshot wins 25 million space-force contract to develop digital-twin of the space environment. *Spacenews*. URL: <https://spacenews.com/slingshot-wins-25-million-space-force-contract-to-develop-digital-twin-of-the-space-environment/> (accessed: 10.06.2024).
- [42] Tadeja S., Lu Y., Seshadri P. et al. Digital twin assessments in virtual reality: an explorational study with aeroengines. *IEEE Aerospace Conf.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.17863/CAM.47663>
- [43] Tadeja S.K., Seshadri P. AeroVR: An immersive visualisation system for aerospace design and digital twinning in virtual reality. *Aeronaut. J.*, 2020, vol. 124, no. 1280, pp. 1615–1635, doi: <https://doi.org/10.1017/aer.2020.49>
- [44] Key C., Ferris A., Geissbuhler M. et al. All-sky electro-optical tracking of mega-constellations in low earth orbit. *AMOS Conf.*, 2022. URL: https://amostech.com/TechnicalPapers/2022/Optical-Systems_Instrumentation/Key.pdf (accessed: 20.06.2024).

- [45] Gershenzon O. «Lenticularis» is the new approach in L-band ground stations for LEO satellites. *CSPP Uses's Group Conf.*, 2019. URL: https://www.ssec.wisc.edu/meetings/cspp/2019/presentations/files/24%20Gershenzon_Olga_Lorett_LL_C_Presentation.pdf (accessed: 20.06.2024).
- [46] Sun V.Z., Hand K.P., Stack K.M. et al. Overview and results from the Mars 2020 Perseverance rover's first science campaign on the Jezero crater floor. *JGR Planets*, 2023, vol. 128, no. 6, art. e2022JE007613, doi: <https://doi.org/10.1029/2022JE007613>
- [47] Betz E. The Skycrane: how NASA's Perseverance rover will land on Mars. *Astronomy Magazine*, 2021. URL: <https://www.astronomy.com/space-exploration/the-skycrane-how-nasas-perseverance-rover-will-land-on-mars/> (accessed: 20.06.2024).
- [48] Shirobokov V. Without margin for error. *CADmaster*, 2012, no. 6, pp. 40–44. (In Russ.).
- [49] Yue B. *A hardware-in-the-loop test platform for planetary rovers*. Master Thesis. University of Waterloo, 2011. 113 p.
- [50] Azimi A., Holz D. et al. Mobility prediction of rovers on soft terrain: effects of wheel- and tool-induced terrain deformations. *Adaptive Mobile Robotics*, 2012, pp. 647–654.
- [51] Saracco R. *Digital twins: evolution in manufacturing*. IEEE Digital Reality, 2022. 32 p.
- [52] McElwain M.W., Feinberg L.D., Perrin M.D. et al. The James Webb space telescope mission: optical telescope element design, development, and performance. *PASP*, 2023, vol. 135, art. 058001, doi: <https://doi.org/10.1088/1538-3873/acada0>
- [53] Erwin S. *York Space Systems acquires emergent space technologies*. URL: <https://spacenews.com/york-space-systems-acquires-emergent-space-technologies> (accessed: 28.06.2024).
- [54] Wei R., Yang R., Liu S. et al. Towards an extensible model-based digital twin framework for space launch vehicles. *J. Ind. Inf. Integration*, 2024, vol. 41, art. 100641, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100641>
- [55] Norris M. 20 years of SPDM in successful production; towards a convergence of SPDM and PIDO. *NAFEMS World Congress 2021 SPDM International Conference*. 24 p.
- [56] Britto Maria R., de Freitas Leal M., Sousa Junior E. et al. Applications of SPDM in aircraft structural analysis at Embraer. *Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci.*, 2019, vol. 6, art. 12, doi: <https://doi.org/10.1186/s40323-019-0136-9>
- [57] Prokhorov A.A., Nazarenko A.M. Архитектура системы управления потоками работ с возможностью облачного и настольного развертывания [Workflow management system architecture with cloud and desktop deployment options]. *4th NSKF*, 2015. URL: http://2015.nscf.ru/Presentations/08_Integraciya_visokoyrovnevix_resyrsov/8_05_347_ProkhorovAA.pdf (accessed: 20.06.2024). (In Russ.).
- [58] Gusev M.P., Nikolaev S.M., Uzhinsky I.K. et al. Application of optimization in the early stages of product development, using a small UAV case study. In: *Product lifecycle management to support industry 4.0*. Springer, 2018, pp. 294–303, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01614-2_27
- [59] Biryaltsev E.V., Galimov M.R., Demidov D.E. et al. The platform approach to research and development using high-performance computing. *Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Program Systems: Theory and Applications], 2019, vol. 10, no. 2, pp. 121–153, doi: <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2019-10-2-121-153> (in Russ.).
- [60] Tsymbal M.R., pp.emichastnov A.E., Balakin D.A. et al. Development of a digital twin of a ground-based radio navigation system based on the principles of model-oriented design using the mathematical modeling environment Engee. *Trudy MAI*, 2024, no. 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180679> (in Russ.).
- [61] Khabarov S.P., pp.hilkina M.L. *Osnovy modelirovaniya tekhnicheskikh sistem. Sreda Simintech* [Fundamentals of modelling technical systems. Simintech environment]. Sankt-Petersburg, Lan Publ., 2022. 120 p. (In Russ.).
- [62] Boykov V.G., Yudakov A.A. Dynamical simulation of rigid and flexible bodies system in Euler. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy* [Journal of Information Technologies and Computing Systems], 2011, no. 1, pp. 42–52. (In Russ.).
- [63] Karpenko A.P., Mukhlisullina D.T., Ovchinnikov V.A. Development of a mathematical model of an internal combustion engine using the PRADIS software package. *Nauka i*

- obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2015, no. 1. EDN: KCKRWX (in Russ.).
- [64] Gandzha T.V., Ushakov A.O., Molokov P.B. et al. [Development of mathematical models for nuclear fuel cycle devices in mars modeling environment and their integration into a virtual laboratory]. *Sovremennoe obrazovanie: integratsiya obrazovaniya, nauki, biznesa i vlasti. Mat. mezhd. nauch.-metod. konf.* Ch. 1 [Modern Education: Integration of Education, Science, Business and Government. Proc. Int. Sci.-Method. Conf. P. 1]. Tomsk, TUSUR Publ., 2024, pp. 148–152. (In Russ.).
- [65] Borovkov A., Ryabov Yu., Marusev V. Development of mathematical models for nuclear fuel cycle apparatuses in the MARS modelling environment and their integration into the virtual laboratory. *Tramplin k uspekhu*, 2018, no. 13, pp. 12–16. (In Russ.).
- [66] Partola I.S. Evolution of mathematic simulation instruments for space launch vehicle engine devices. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26017> (in Russ.).
- [67] Safuanov R.R., Khoroshikh A.V., Salnikov A.F. To some questions of mathematical modeling of liquid rocket engines operation. *Dvigatel*, 2019, no. 2, pp. 1–11. (In Russ.).
- [68] Mena D.J., Pluchart S., Mouvand S. et al. Rocket engine digital twin. *TFAWS*, 2019. URL: <https://tfaws.nasa.gov/wp-content/uploads/TFAWS19-ID-04-Paper.pdf> (accessed: 20.06.2024).
- [69] Feodosyev V.I. *Osnovy tekhniki raketnogo poleta* [Fundamentals of rocket flight technique]. Moscow, Nauka, Publ., 1979. 494 p. (In Russ.).
- [70] Fortescue P., Swinerd G., Stark J. *Spacecraft systems engineering*. Wiley, 2011. 736 p. (Russ. ed.: *Razrabotka sistem kosmicheskikh apparatov*. Moscow, Alpina Publisher Publ., 2015. 764 p.)
- [71] Kosmicheskiiy soft [Space software]. *forum.novosti-kosmonavtiki.ru: website*. URL: <https://forum.novosti-kosmonavtiki.ru/index.php?topic=8151.0/> (accessed: 30.05.2024). (In Russ.).
- [72] Baranov D.A., Elenev V.D. *Tipovye resheniya v proektirovanii i konstruirovanii elementov raket-nositeley* [Typical decisions in designing and construction of elements of launch vehicles]. Samara, Izd-vo Samarskogo un-ta Publ., 2020. 112 p. (In Russ.).
- [73] Kabanov A.A. Prototyping in developing rocket and space technology products and their production systems. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2022, no. 8, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-8-2202> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.11.2024

Информация об авторе

КАБАНОВ Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Космические системы и ракетостроение». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: drdt@mail.ru).

Information about the author

KABANOV Aleksandr Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Space Systems and Rocket Engineering. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: drdt@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кабанов А.А. Методические вопросы разработки комплексных моделей на начальных стадиях создания ракетно-космической техники. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 124–143.

Please cite this article in English as:

Kabanov A.A. Methodological problems in design and development of a complex model at the initial stage of creating the rocket and space technology. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 8, pp. 124–143.