

Трансформация отраслевого управления в ракетно-космической промышленности на основе цифровых технологий

В. П. Куприяновский^{1,2}, Р. С. Ступин^{3,4}, В. А. Сухомлин⁵, К. В. Утолин^{4*}

¹ ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Российская Федерация
Адрес: 127994, Российская Федерация, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 115409, Российская Федерация г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

³ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

⁴ АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королев, Российская Федерация

Адрес: 141074, Российская Федерация, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 4

* utolinkv@tsniimash.ru

⁵ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1

Аннотация

В статье рассмотрены основные аспекты, тренды и подходы к цифровой трансформации предприятий ракетно-космической промышленности зарубежных стран. Рассмотрены основные инициативы отраслевого государственного управления в сфере цифровизации зарубежных предприятий ракетно-космической промышленности. В качестве предиктивного условия эффективной цифровизации основных, управленческих и поддерживающих процессов на предприятиях рассматривается проведение мероприятий по трансформации системы отраслевого управления: внедрения гибких форм проектного управления, формирования матричных структур, развитие технологической кооперации и совершенствование форматов взаимодействия государства, бизнеса и граждан. Рассмотрены основные подходы и методики исследования цифровых технологий и оценки перспектив их внедрения в производственные и управленческие процессы зарубежных предприятий ракетно-космической промышленности. В статье сопоставлены основные подходы международных агентств к практике отраслевого управления. На основе изучения кейсов цифровой трансформации дана оценка барьеров и рисков имплементации сквозных цифровых технологий на предприятиях ракетно-космической промышленности. Рассмотрены методы повышения эффективности отраслевого управления в ракетно-космической промышленности, положенные в основу лучших международных практик. В статье также рассмотрены возможности применения Модели анализа поведенческой сложности напряженных социотехнических систем, которая базируется на анализе процессов самоподобия, возникающих в ходе изменений, для митигации рисков внедрения цифровых технологий и новых управленческих практик на предприятиях ракетно-космической промышленности.

Ключевые слова: цифровая трансформация, цифровые технологии, датацентричное управление, управление данными, цифровизация промышленности, ракетно-космическая промышленность, отраслевое управление

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Трансформация отраслевого управления в ракетно-космической промышленности на основе цифровых технологий / В. П. Куприяновский [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 3. С. 752-770. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202303.752-770>

© Куприяновский В. П., Ступин Р. С., Сухомлин В. А., Утолин К. В., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Transformation of Industry Management in the Rocket and Space Industry Based on Digital Technologies

V. P. Kupriyanovsky^{a,b}, R. S. Stupin^{c,d}, V. A. Sukhomlin^e, K. V. Utolin^{d*}

^a Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation
Address: 9 Obraztsova St., build. 9, Moscow 127994, Russian Federation

^b National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation

Address: 31, Kashirskoe Highway, Moscow 115409, Russian Federation

^c National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation

Address: 20 Myasnitskaya St., Moscow 101000, Russian Federation

^d JSC "Central Research Institute of Mechanical Engineering", Korolev, Russian Federation

Address: 4 Pioneerskaya St., Korolev 141074, Moscow region, Russian Federation

* utolinkv@tsniimash.ru

^e Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Address: 1 Leninskie gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation

Abstract

In the article the main aspects, trends and approaches to digital transformation of the enterprises of the space-rocket industry of foreign countries are considered. The main initiatives of public administration in the field of digitalization of the foreign enterprises of the space-rocket industry are considered. As predictive condition of effective digitalization of the main, the administrative and supporting processes at the enterprises carrying out actions for transformation of system of sectoral management is considered: implementations of flexible forms of project management, forming of array structures, and development of technology cooperation and improvement of formats of interaction of the state, business and citizens. The main approaches and techniques of research of digital technologies and assessment of perspectives of their implementation in production and administrative processes of the foreign enterprises of the rocket and space industry are considered. The article compares the main approaches of international agencies to the practice of sectoral management. On the basis of studying of cases of digital transformation, the assessment of barriers and risks of implementation of through digital technologies at the enterprises of the rocket and space industry is given. The article also discusses methods for increasing the efficiency of sectoral management in the rocket and space industry, which form the basis of best international practices. The article also examines the possibilities of using the Model for analyzing the behavioral complexity of tense sociotechnical systems, which is based on the analysis of self-similarity processes that arise during changes, to mitigate the risks of introducing digital technologies and new management practices at enterprises of the rocket and space industry.

Keywords: digital transformation, digital technologies, data governance, data-driven management, digital manufactory, space industry, sectoral public administration

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Kupriyanovsky V.P., Stupin R.S., Sukhomlin V.A., Utolin K.V. Transformation of Industry Management in the Rocket and Space Industry Based on Digital Technologies. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(3):752-770. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202303.752-770>



Введение

Цифровизация представляет собой комплекс мероприятий по трансформации всех бизнес-процессов на основе исследования и экономически обоснованного внедрения перспективных информационных технологий. Цифровизация осуществляется в промышленности посредством создания единой системы, интегрирующей в себе всю инфраструктуру (производственное оборудование, автоматизированные рабочие места, системы безопасности, системы управления ресурсами, управление межзаводской кооперацией). Ключевым инструментом цифровой трансформации промышленности являются информационные технологии, которые включают широкий перечень программного обеспечения, программно-аппаратных комплексов и современного станочного фонда.

Теоретические основы цифровизации промышленности заложены в книге Николаса Негропonte «Being Digital»¹. Автор указывает, что влияние процессов цифровой трансформации на эффективность деятельности предприятий промышленности растёт вслед за повышением роли цифровых технологий в экономике и обществе, а также с увеличением количества собираемых, обрабатываемых и накапливаемых данных.

Цифровизация промышленности определяет создание и развитие новых моделей стратегического управления, в рамках которой повышается роль больших данных, инструментов цифрового проектирования, платформенных подходов в организации управленческой и производственной деятельности. Эффективная модель цифровизации ракетно-космической промышленности формируется на основе анализа передовых технологий и учета технологических трендов цифровой трансформации отрасли [1].

Мировая ракетно-космическая промышленность доцифровой эпохи формировалась на основе хорошо структурированных иерархических цепочек вокруг генеральных подрядчиков. Отличительная особенность ракетно-космической промышленности большинства стран заключается в высокой степени влияния государства на отраслевые управленческие и производственные процессы.

С ростом влияния процессов цифровой трансформации и совершенствованием инструментов информационно-коммуникационных технологий космическая индустрия развивается как совокупность промышленных экосистем, формирующихся вокруг космической инфраструктуры², которая теперь может быть и частной³. Такая децентрализация влечёт за собой как новые возможности⁴, так и новые риски⁵. А поскольку структуры управления космических агентств

тесно связаны с теми институциональными задачами, которые они имели изначально, в моменты их создания, то их трансформация происходит по мере изменения этих задач [2] с целью повышения эффективности деятельности в новых условиях.

Сегодняшняя и перспективная на ближайшие десятилетия космическая деятельность характеризуется не только рядом технологических прорывов, но и нарастающей организационно-экономической (институциональной) сложностью. New Space – этап развития космической деятельности, характеризующийся особенностями развития технологий, участников и системы отношений между ними, которые несут устойчивый взаимозависимый характер. К таким особенностям можно отнести следующие:

- рост непосредственного потребления результатов космической деятельности, и как следствие, их интеграция в различные горизонтальные сферы деятельности и бизнесы;
- развитие обще-технологического уровня, приведшее к утрате уникальности существенной доли компетенций ракетно-космической отрасли промышленности;
- миниатюризация в космической технике и превращение малых спутников в экономически эффективный инструмент решения научных и прикладных задач;
- снижение барьеров входа в космическую отрасль для стартапов и компаний из смежных отраслей экономики;
- активное использование венчурного и биржевого финансирования для запуска крупномасштабных проектов;
- рост участия частных компаний и соответствующих организационных подходов вдоль всего жизненного цикла космических проектов, где ранее господствовали государственные игроки;
- рост разнообразия форм государственно-частного партнёрства и постепенный пересмотр восприятия общественного блага в сфере космической деятельности как чистого продукта деятельности государственных агентств.

Цифровые технологии позволяют фирмам пересмотреть свои бизнес-модели, чтобы в полной мере использовать возможности, открываемые использованием этих технологий [3]. Происходит преобразование операционного управления предприятием из функции управления обязанностями и рабочими процессами в управление данными, переходу операционных моделей к оцифровке операций и от координации к совместному использованию потенциала цифровых инфраструктур [4]. Новейшими бизнес-моделями космической отрасли явля-

¹ Negroponte N. Being Digital. First Edition. Knopf Doubleday Publishing Group, 1995. P. 4.

² Moranta S. The Space Downstream Sector: Challenges for the Emergence of a European Space Economy. Études de l'Ifri, Ifri, 2022. 29 p. URL: https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/moranta_space_downstream_sector_2022_.pdf (дата обращения: 29.06.2023).

³ Там же.

⁴ Returns and Benefits from Public Space Investments 2021 [Электронный ресурс] // GOV.UK, 28 April 2022. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/returns-and-benefits-from-public-space-investments-2021/returns-and-benefits-from-public-space-investments-2021#summary-and-conclusion> (дата обращения: 29.06.2023).

⁵ The role of space in driving sustainability, security, and development on Earth / R. Brukaradt, J. Klempler, D. Pachthod, B. Stokes [Электронный ресурс] // McKinsey & Company, 2022. 44 p. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/the-role-of-space-in-driving-sustainability-security-and-development-on-earth> (дата обращения: 29.06.2023).



ются «Космос как услуга», «Спутник как услуга» и «Космические данные как услуга»⁶.

В качестве унифицированного единого подхода, используемого космическими центрами и агентствами зарубежных стран, можно выделить изучение перспективных технологий с одновременной оценкой влияния на текущую системы отраслевого управления.

В частности, в Китайской Народной Республике подобный подход прямо заявлен в подразделе 1 «Развитие инноваций» раздела V «Модернизация управления космосом» выпущенного в начале 2022 года документа «Космическая программа Китая: перспектива 2021 г.». Согласно документу, Китай строит перспективные планы стратегических, фундаментальных и технологических прорывов в космической науке, при этом интегрируя применение информационных технологий нового поколения в космическом секторе и ускоряя инженерное применение прорывных технологий. Документ также описывает перспективы применения спутников для развития национальной экономики и коммерциализацию результатов космической деятельности⁷.

Предиктивным условием оценки влияния цифровых технологий на эффективность функционирования экосистемы космической промышленности является оценка воздействия выбранного набора технологий на различные компоненты бизнес-модели. Например, чтобы эффективно использовать технологии искусственного интеллекта, с одной стороны, необходимо создать новое организационное подразделение для внедрения машинного обучения в услуги компании, а с другой стороны, работать над программным обеспечением для машинного обучения с открытым исходным кодом, что позволит пользователям при желании самостоятельно кастомизировать и развивать продукт под отраслевые требования. В случае, если данные предоставляются разными организациями, а их обработка осуществляется другими, для реализации подобной бизнес-модели требуется эффективная интеграция между всеми участниками процесса в том числе на организационно-правовом уровне [5].

Проблематика и методология исследования

С точки зрения теории сетевого государственного управления проблема технологического обеспечения цифровой системы управления ракетно-космической отрасли исследуется как фактор обеспечения эффективности государственной политики не только в космической промышленности, но и в смежных областях, использующих для формирования сетевого, дата-центричного управления массивы данных, полученные на основе результатов космической деятельности (дистанционное зондирование земли, навигационные сервисы, сети вещания и ретрансляции).

Результаты космической деятельности, формирующие отрас-

левые дата-сети для органов исполнительной власти, учреждений и ведомств могут рассматриваться как инструменты снижения транзакционных издержек на всех уровнях государственного управления. Таким образом, ракетно-космическая отрасль является ключевым источником данных для индикативного планирования и развития программно-целевого подхода в системе управления национальным научно-техническим развитием.

Данные, генерируемые в космической индустрии, могут рассматриваться как формируемые для системы государственного управления «данные первого уровня», на основе которых формируется большая часть отраслевых дата-сетей органов исполнительной власти, учреждений, организаций и ведомств. Таким образом, исследование эффективности цифровой системы управления данными и отраслевых политик в сфере данных ракетно-космической отрасли является важным инструментом анализа и прогнозирования развития дата-центричного управления, совершенствования системы индикативного анализа и программно-целевого планирования в системе органов государственной власти, а также для изучения феномена Data Governance и Digital Governance как перспективных подходов отраслевого управления.

Стоит отметить, что перечень отраслевых решений, принимаемых на основе данных, сформированных в результате космической деятельности, является достаточно обширным: управление в сфере геологии, природопользования, градостроительной политики, информационных технологий и связи, медицины и образования, культуры и туризма. Результаты космической деятельности определяют предпосылки эффективного создания сервисов и услуг для широких слоев населения. Таким образом, проблема эффективности цифровой системы управления в ракетно-космической отрасли получает развитие с позиций теории общественной ценности.

С точки зрения подходов концепции governance необходимо исследовать оценку цифровой системы администрирования в вопросах регламентации и регулирования отраслевого государственного управления, изучения соответствия текущих административных норм требований эффективного внедрения цифрового государственного управления для решения государственных задач в ракетно-космической отрасли.

Следует отметить, что существует серьезный разрыв между сбором и практическим использованием данных, получаемых в результате космической деятельности. На сегодняшний день в России формируется национальная система управления данными, включающая в том числе такие инструменты как витрины данных, федеральная государственная информационная система в сфере управления данными. Правительством Российской Федерации установлены обязательные требования по формированию отраслевых массивов данных. Собираемые и публикуемые данные должны стать общедоступным инструментом для поддержки принятия решений в отраслевом государственном управлении на федеральном и субфедеральном

⁶ Hein A. M., Rosete B. C. Space-as-a-Service: A Framework and Taxonomy of-as-a-Service Concepts for Space [Электронный ресурс] // IAC 2022 congress proceedings, 73rd International Astronautical Congress (IAC). Article number: 68150. Paris, France, 2022. URL: <https://dl.lafastro.directory/event/IAC-2022/paper/68150/> (дата обращения: 29.06.2023).

⁷ China's Space Program: A 2021 Perspective. The State Council Information Office of the People's Republic of China. January 2022 [Электронный ресурс]. URL: https://english.www.gov.cn/archive/whitepaper/202201/28/content_WS61f35b3dc6d09c94e48a467a.html (дата обращения: 29.06.2023).



уровнях. В то же время, данные космической деятельности не включены в обязательные витрины данных, а их операторы не включены в перечень обязательных поставщиков данных для государственного управления. Таким образом, национальная система управления данными не учитывает важный фрагмент полных и достоверных данных, которые могли бы стать эффективным инструментом для принятия решений в системе государственного управления.

Аналогичная ситуация наблюдается и в других аспектах цифровой трансформации государственного управления. В частности, операторы космической деятельности не включены в число участников проекта «ГосТех» по созданию единой информационной инфраструктуры государственного управления.

Еще один аспект практического разрыва между системой государственного управления и результатами космической деятельности наблюдается в реализации процедуры согласования и утверждения ведомственных программ цифровой трансформации. Основным регулятором данного процесса Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации проводит экспертизу и утверждение стратегических документов в сфере цифровой трансформации органов исполнительной власти, государственных учреждений, организаций и ведомств. Тем самым министерство осуществляет мониторинг и контроль унификации подходов к цифровому развитию различных отраслей и секторов экономики. В то же время, организации ракетно-космической промышленности не включены в перечень субъектов, которые обязаны согласовывать документы стратегического цифрового планирования с государственными регуляторами. Таким образом, подход к цифровой трансформации, политике управления данными и развитию информационных технологий ракетно-космической отрасли может существенно отличаться, или даже противоречить, подходам отраслевого государственного управления. Данная дилемма образует риски снижения эффективности цифровой трансформации государства в целом и ракетно-космической отрасли в частности.

В рамках подготовки настоящей статьи сформулирован исследовательский вопрос о применимости новых форм стратегического управления и опыта зарубежных стран по имплементации цифровых технологий в отраслевую практику ракетно-космической промышленности в российской практике. Также авторы рассмотрели вопрос о влиянии цифровой трансформации ракетно-космической промышленности на социально-экономическое развитие и эффективность смежных отраслей промышленности [6].

Основная гипотеза исследования заключается в формуле, что используемые зарубежными агентствами и центрами модели цифровой трансформации и стратегического управления являются применимыми в российских условиях, хотя и требуют значительной адаптации.

Подтверждение гипотезы основывалось на следующих методах и инструментах:

- системный анализ;
- анализ кейсов цифровой трансформации ведущих мировых космических агентств и центров;
- анализ кейсов государственного регулирования цифровой трансформации и стратегического планирования в космической индустрии;
- автоматизированный контент-анализ релевантных источников.

Влияние цифровых технологий на эффективность управления в ракетно-космической промышленности

В космической деятельности новые технологии определяют развитие следующих тенденций:

- ускорение принятия решений за счёт использования цифрового моделирования и возможностей создания единых цифровых пространств для обсуждений и планирования действий;
- снижение времени и стоимости создания новых образцов техники за счёт использования цифровых систем управления, предиктивной аналитики и виртуальных испытаний;
- создание мультиобъектных систем, ведущих деятельность в том числе на принципах самоорганизации;
- создание изделия больше не фокусируется на простых комбинациях механических частей, которые могут быть рассмотрены отдельными разработчиками. Спутники и космические аппараты (КА) всегда являлись системами, состоящими из множества различных подсистем и компонентов, которые взаимосвязаны друг с другом. Но в настоящее время они всё чаще и всё больше включают в себя программные системы как части общей функции и структуры всей системы (программно-реконфигурируемые полезные нагрузки).

Рассмотрим некоторые аспекты реализации этих тенденций. В последние годы эксперты приходят к выводу, что наиболее адекватным инструментом для цифровизации создания изделий на всех этапах их жизненного цикла является цифровая платформа⁸, использующая синтез модельно-ориентированной системной инженерии (MBSE), онтологии предметной области и математических моделей создания цифровых двойников изделий и производств⁹, дополненных средствами для когнитивной визуализации (визуального обнаружения скрытых в данных закономерностей) [7]. В MBSE модели имеют общие предположения, базовые онтологии и представления. Модели в MBSE представляют собой централизованные цифровые репозитории, которые связывают информацию из нескольких источников и дисциплин, так что изменение в одной части модели можно отследить до исходного/производного

⁸ Bottcher E. What I Talk About When I Talk About Platforms [Электронный ресурс] // Martin Fowler. 05 March 2018. URL: <https://martinfowler.com/articles/talk-about-platforms.html> (дата обращения: 29.06.2023).

⁹ Groulier J. Dassault Aviation's "Aircraft Twin" Project Delivers Greater Predictivity in Real-Time to Optimize Fleet Usage, Performance and Maintenance [Электронный ресурс] // ESI Group. 2 December 2021. URL: <https://www.esi-group.com/blog/dassault-aviations-aircraft-twin-project-delivers-greater-predictivity-in-real-time-to-optimize-fleet-usage-performance-and-maintenance> (дата обращения: 29.06.2023).



требования или варианта использования. SysML, расширение подмножества UML, разработанное Международным советом по системной инженерии (INCOSE) и впоследствии развитое до онтологического стандарта Object Management Group (OMG) и INCOSE, стало популярным языком системного моделирования.

В области промышленного производства цифровая модель относится к виртуальному представлению физического продукта или процесса, которое объединяет данные, полученные из различных источников, таких как данные интерфейса прикладных программ (API), исторические данные, данные встроенных датчиков из систем промышленного интернета вещей (IIoT) и открытые данные, и которое может предоставить производителям беспрецедентную информацию об ожидаемых характеристиках продукта или дефектах, которые могут привести к сбоям в работе.

Подход MBSE призван обеспечить более высокую степень соединения динамических цифровых моделей с точки зрения функциональных сетей, прослеживаемости критического пути, проверки пользователей и требований и окончательной проверки технической системы. Этот подход должен быть масштабируемым на всех уровнях детализации. Кроме того, процессы MBSE должны быть стандартизированы и модульны, в отличие от описаний процессов в системной инженерии на основе документов, которые сильно зависят от неявных знаний, имеющихся у владельцев процессов и экспертов в предметной области.

Отметим, что в ряде исследований [8] цифровые платформы делят на три условных типа:

1) Платформы, собственная среда разработки которых обеспечивает интеграцию всех приложений платформы с бесшовным взаимодействием данных и моделей данных. Примерами являются платформы Forge от Autodesk или 3DEXperience от Dassault Systèmes. Эти решения предлагают широкий спектр функций приложений с поддержкой веб-сервисов, которые можно гибко комбинировать, единое прикладное моделирование, имитационное моделирование и анализ деятельности инженеров. Кроме того, предлагаются другие типы возможностей, например, в отношении управления проектами, статистического анализа и взаимосвязей между технологиями, таких как наложения AR/VR-визуализации и взаимодействия с системами информационного моделирования зданий (BIM), вплоть до полной заводской среды и среды умного города. Как и в случае SysML, BIM становится онтологическим стандартом усилиями buildingSMART.

2) Платформы, ориентированные на промышленный Интернет вещей (IIoT) как услугу. Здесь данные, доставленные периферийными устройствами, хранятся и обрабатываются в рамках анализа данных, включая их использование для обучения и применения систем предиктивной аналитики на основе ИИ. Это помогает разным пользователям таких платформ учиться на одних и тех же источниках данных, если они используются совместно. Типичными примерами такой проприетарной цифровой платформы являются Mindsphere от Siemens или ThingWorx от PTC, использующие расширенную аналитику от периферии до облака с использованием и обработкой данных от подключенных продуктов, заводов и систем. Чтобы инженеры могли создавать и настраивать свои соб-

ственные приложения, на этих платформах IIoT предлагаются среды разработки приложений с минимальным кодом или без кода (low-, или no-code).

3) Платформы, предназначенные для предоставления масштабируемых вычислительных мощностей, хранилищ и программных сред в соответствии с общими потребностями клиентов. Фактически, это облачные среды вычислений и обработки данных.

Различают следующие типы подобных платформ:

- облачное программное обеспечение как услуга (SaaS) – это тип облачного решения, который предлагает приложение клиентам или организациям через веб-браузер. Данные для приложения запускаются на сервере в сети, а не через приложение на компьютере пользователя.
- облачная инфраструктура как услуга (IaaS) предоставляет своим клиентам оборудование и обычно виртуализированную компьютерную операционную систему. Плата за программное обеспечение взимается только за используемую вычислительную мощность, обычно это количество процессорных часов, используемых в месяц.
- облачная платформа как услуга (PaaS) предоставляет сетевые компьютеры, работающие в размещенной среде, а также добавляет поддержку среды разработки. В такой среде также можно разрабатывать приложения для цифровой инженерии, используя преимущества динамической масштабируемости, автоматизированного резервного копирования базы данных без необходимости специального кода для этого. Однако общие PaaS не предлагают никаких конкретных вариантов модели цифровых данных. Плата за PaaS взимается как дополнительная услуга сверх платы за IaaS.

В промышленности цифровые платформы и технологии разработки и применения цифровых двойников должны обеспечить семантические связи между хранилищами данных и репозиториями моделей и создать основу для согласованного подхода к информационной модели на всех этапах жизненного цикла создания продукта, также закладывая основу для создания систем управления знаниями на базе онтологий.

Такие платформы и создаваемые цифровые двойники процессов и изделий могут выступать как драйвер и интегратор сквозных цифровых технологий (цифровое проектирование и моделирование, системный и суперкомпьютерный инжиниринг, искусственный интеллект, средства обработки больших данных, цифровые (виртуальные) испытания, стенды и полигоны) и позволить частично роботизировать разработку наукоемких высокотехнологичных изделий, обеспечивая возможность генерации на системной и регулярной основе недоступных ранее решений. Онтологии обеспечивают совместимость представлений о данных и бизнес-процессах у всех участников проекта, включая поставщиков компонент.

Применение сочетания технологий MBSE и создания цифровых двойников позволяет применять методы машинного обучения нейросетей (ML), которые превосходно подходят для решения многоцелевых задач оптимизации с ограничениями, возникающих при проектировании и производстве летательных аппаратов и ракет [9]. Действительно, новые методы машинного обучения можно рассматривать как методы оптимизации на основе данных, которые идеально подходят для ре-



шения многомерных и многокритериальных задач. Например, в Европейском космическом агентстве (ESA) разрабатывают систему, которая использует методы обработки естественного языка на основе AI (NLP) в области управления требованиями¹⁰, поскольку большинство требований являются текстовыми и, как правило, формально не моделируются, даже если они имеют определенный уровень структуры и правил. Используя технологию NLP, семантическая информация может быть извлечена из текстовых требований, что может иметь несколько преимуществ, которые будут оценены: найти связанные требования, сравнение содержимого спецификаций, идентификация перекрывающихся требований и связывание инженерных текстовых артефактов (таких, как отчеты о проектировании, отчеты об испытаниях и т.д.) с содержимым цифровых моделей.

В целом же на этом направлении можно отметить следующие направления развития¹¹: автоматическое извлечение информации из данных космических миссий для создания графа знаний, позволяющего использовать эти знания при планировании новых миссий; применения ИИ в области наблюдений Земли и космического пространства; программы по использованию ИИ для планирования миссий и разработки новых конструкций космических аппаратов для этих миссий и, конечно же, для автоматических КА и планетарных машин.

Необходимо выделить важное конкурентное преимущество использования цифровых моделей по сравнению с традиционной схемой подготовки проектной документации. в случае реализации проектов, допускающих использование каких-то элементов предыдущих изделий необходимо практически полностью переработать ранее подготовленную проектную документацию в части изменения геометрических параметров, используемых материалов и т. д. Это может занять много времени. В том же случае, если проектная документация выполнена в виде цифровой модели, сделать это достаточно просто, изменив в модели ряд параметров, и компьютер автоматически сможет пересчитать все необходимые характеристики для подготовки проектной документации. Это экономит время и снижает стоимость её подготовки.

В ракетно-космической отрасли целесообразно разрабатывать платформенные решения для цифрового проектирования и моделирования как минимум критически важных систем (например таких как корпус, силовые установки и системы накопления энергии и система термозащиты), которые позволяют проводить все необходимые цифровые (виртуальные) испытания, моделировать и измерять любые показатели изделий РКП в течение всего жизненного цикла с детальным учетом характеристик материалов и особенностей технологических процессов, а также последующих условий эксплуатации изделий. При этом рост применения цифровых платформ сдерживают потребность в инвестициях для их разработки и

применения, а также подготовке высококвалифицированных кадров.

Задача состоит в том, чтобы реализовать цифровую непрерывность, которая направлена на создание связей между объектами и процессами через разнородные инструменты с использованием методов на основе моделей. Эти связи должны быть созданы в трех измерениях системной инженерии:

- по дисциплинам
- на протяжении всего жизненного цикла
- по цепочке поставок.

Использование новых технологий должно покрывать весь системный жизненный цикл от управления требованиями и дизайна к инновационным решениям для производства и эксплуатации космических систем при развитии следующих ключевых направлений:

- системное проектирование на основе моделей (MBSE)¹² для сквозного развития через всю систему от поставок комплектующих и материалов, и до утилизации изделий;
- встроенные в изделия датчики и предиктивная аналитика - оптимизированные сборка и тестирование плюс непрерывное совершенствование изделий на основе анализа данных от встроенных в них датчиков;
- применение дополненной реальности, методов автоматизации и методов, поддерживающих контроль выполнения сборки и тестирования, чтобы предотвратить аномалии и отказы, и повысить эффективность.

При этом для снижения рисков и повышения управляемости изменениями все эти процессы должны основываться на доверенных и авторитетных источниках данных и инструментах их усовершенствованного представления и анализа. Эти инструменты должны извлекать информацию из неоднородных, рассеянных и распределенных источников данных и строить ориентированные на пользователя представления этих данных. Должны использоваться эффективные методы и инструменты для совместного использования данных, в т.ч. в системах «человек-машина», с соответствующими механизмами обеспечения прав доступа и требованиями к защите. Это требует обеспечения функциональной совместимости между моделями и между информационными системами сотрудников. Решение этих задач производится за счёт создания онтологий, графов знаний, метамоделей и эталонных моделей. С точки зрения данных онтологии – это семантические модели данных, которые определяют типы сущностей в конкретной области, отношения между сущностями и свойства, которые можно использовать для описания сущностей. Онтологии являются универсальными моделями данных в том смысле, что они моделируют только универсальные типы сущностей, которые имеют определенные общие свойства, но не включают информацию о конкретных сущностях в предметной области. Онтология состоит из трех основных элементов: классов, которые представляют собой различные типы сущностей, суще-

¹⁰ Artificial intelligence (AI) and natural language processing (NLP) to support space engineering activities [Электронный ресурс] // ESA, 2022. URL: <https://nebula.esa.int/content/artificial-intelligence-ai-and-natural-language-processing-nlp-support-space-engineering> (дата обращения: 29.06.2023).

¹¹ Pawar S. Contribution of AI in Space Exploration [Электронный ресурс] // Analytics Drift. December 4, 2022. URL: <https://analyticsdrift.com/contribution-of-ai-in-space-exploration/> (дата обращения: 29.06.2023).

¹² Knizhnik J., Tonn S. MBSE through the Project Lifecycle // 2016 Model Based Engineering Workshop at NASA's Goddard Space Flight Center. NASA, 2016 [Электронный ресурс]. URL: https://sma.nasa.gov/docs/default-source/News-Documents/mbse-through-the-project-lifecycle.pdf?sfvrsn=4536e0f8_0 (дата обращения: 29.06.2023).



ствующих в предметной области; отношения, связывающие любые два класса; и атрибуты, которые представляют собой свойства, описывающие отдельный класс. Когда классы связаны отношениями, онтологию можно визуализировать в виде графа. Используя онтологию в качестве организующей структуры, можно к сущностям в онтологии добавить реальные данные о конкретных объектах в предметной области – и тогда получится граф знаний.

Метамоделю выражают логические синтаксические структуры, которым должны соответствовать предметно-ориентированные модели для обеспечения масштабируемости, повторного использования и расширяемости. Метамоделю связаны с определением символов и структуры для предопределенного класса задач, а также с правилами, которые работают с символами. Эти свойства позволяют создавать экземпляр модели из метамодели. Таким образом, метамодель определяет общую структуру, ограничения и символы, которые можно использовать для моделирования системы. Поскольку метамодели не определяют семантику моделей, они не могут использоваться отдельно. Однако онтологии и метамодели являются взаимодополняющими и синергетическими. В частности, онтология может формально представлять понятия и отношения, используя структуру, предоставляемую метамоделью. Хотя онтологии могут не использовать метамодель, те из них, которые ее используют, будут обладать определенными желательными свойствами (например, функциональной совместимостью, повторным использованием, синтаксической правильностью, семантической непротиворечивостью).

Эталонные модели – это предметно-ориентированные онтологии, состоящие из взаимосвязанного набора четко определенных концепций, созданных авторитетными источниками в определенных сообществах заинтересованных сторон. Эталонная модель может представлять бизнес-функции и системные компоненты, если они составляют полный набор. Эталонная модель отличается от связанных таксономий, объектов и отношений, но может включать в себя связанные таксономии, объекты и отношения для выявления иерархий (например, системной иерархии, системной архитектуры), важных для заинтересованных сторон.

В целом описанная методология приводит к сращиванию подхода системного проектирования на основе моделей (MBSE) с подходом создания цифровых двойников (Digital Twins – DT) систем и процессов¹³ и «цифровых нитей» (digital thread) или «цифровых потоков» [8]. При этом экономически эффективное внедрение цифровых двойников могут обеспечить облачные технологии, периферийные устройства и Интернет вещей. Впрочем, исследования экономических эффектов и возможностей конвергентной синергии цифровых технологий и внедрения методов MBSE в производстве ещё только на-

чинаются [10]. В рамках настоящего исследования проводится анализ опыта разных стран по развитию указанных подходов в системе отраслевого управления в ракетно-космической промышленности.

Опыт Соединенных Штатов Америки

Одной из фундаментальных концепций, используемых в NASA для управления основными системами, является жизненный цикл программы/проекта, который классифицирует все, что должно быть сделано для выполнения программы или проекта, на отдельные фазы, разделенные ключевыми точками принятия решений (KDP). KDP – это события, при которых орган, принимающий решения, определяет готовность программы/проекта к переходу к следующей фазе жизненного цикла (или к следующему KDP). Границы фаз определяются таким образом, чтобы они обеспечивали естественные точки для принятия решений «идти» или «не идти». Программе или проекту, не прошедшему KDP, может быть разрешено повторить попытку позже после устранения недостатков, препятствовавших прохождению KDP, или он может быть прекращен¹⁴.

Традиционные космические проекты, впервые разработанные для программы «Аполлон», часто имеют жесткую структуру и используют поэтапный подход, как указано в Руководстве по системной инженерии NASA. Таким образом, на последующих этапах невозможно легко изменить конструкцию космического корабля без изменения решений, принятых на предыдущих этапах. Особую проблему это представляет для разрабатываемых в настоящее время технологий сборки космических аппаратов непосредственно в космосе, в том числе и автоматически, без участия людей [11]. Для такого типа сборки процессы, формирующие жизненный цикл изделия, будут выглядеть отlišно от привычных сейчас. При этом руководитель цифровой трансформации в NASA Джилл Марлоу во время выступления 18 января 2022 года в ATARC (Advanced Technology Academic Research Center)¹⁵ заявила: «Мы не занимаемся цифровыми технологиями ради цифровых технологий. Мы проводим цифровую трансформацию, чтобы стимулировать изменения в NASA для достижения наших основных целей, и эти цели показывают, как должны выглядеть эти изменения».

Для решения этих задач в NASA запущена инициатива, получившая название model-based anything (MBx), чтобы использовать возможности искусственного интеллекта и машинного обучения для усиления человеческого интеллекта в решении проблем возрастающей сложности, масштаба и неопределенности [12].

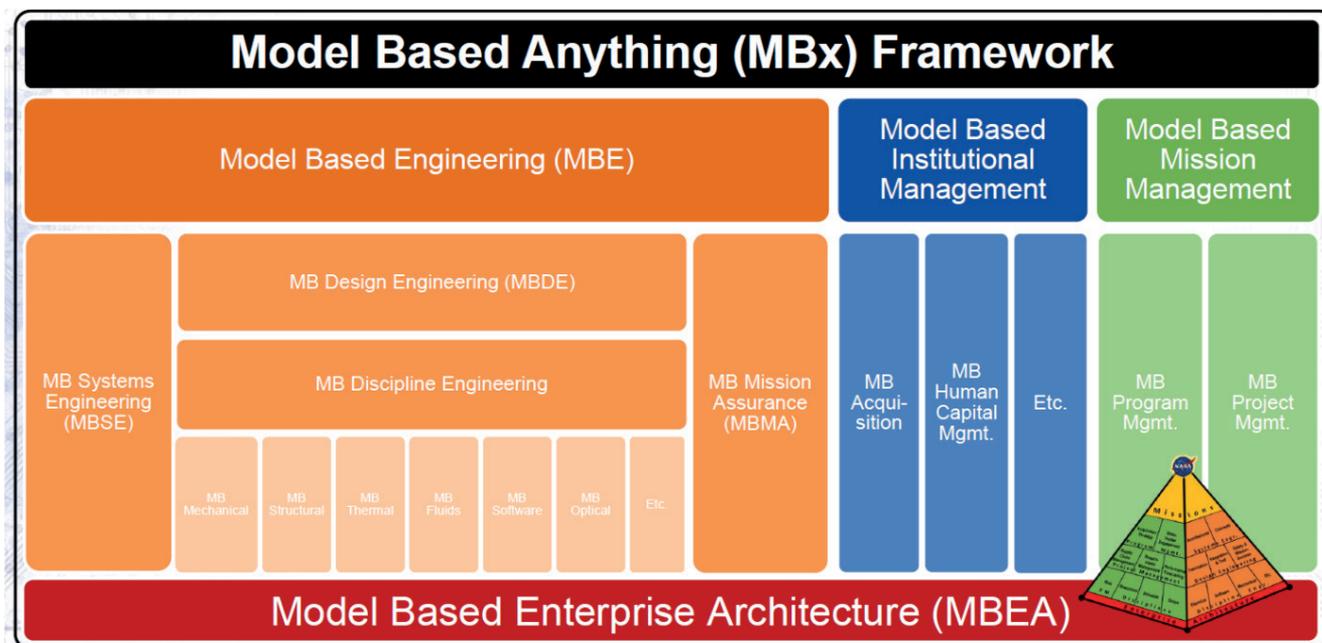
Общая структурная схема реализации модельно-ориентированного подхода представлена на рисунке 1.

¹³ Assuring Trustworthiness in Dynamic Systems Using Digital Twins and Trust Vectors / A. Budiardjo [et al.] // Digital Twin Consortium, 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/wp-content/uploads/sites/3/2022/10/Assuring-Trustworthiness-in-Dynamic-Systems.pdf> (дата обращения: 29.06.2023).

¹⁴ SEH 3.0 NASA Program/Project Life Cycle [Электронный ресурс] // NASA. Feb 6, 2019. URL: <https://www.nasa.gov/reference/3-0-nasa-program-project-life-cycle/> (дата обращения: 29.06.2023).

¹⁵ Curran J. NASA Official: Vision Marks First Step in Digital Transformation [Электронный ресурс] // MeriTalk: Federal Technology News, Research & Events. Jan 18, 2022. URL: <https://www.meritalk.com/articles/nasa-official-vision-marks-first-step-in-digital-transformation/> (дата обращения: 29.06.2023).





Р и с. 1. Общая схема реализации подхода model-based anything (MBx)¹⁶
 Fig. 1. General scheme for implementing the model-based anything (MBx) approach¹⁶

Альтернатива традиционному управлению для космических проектов возможна путём улучшения взаимодействия проектной группы за счет параллельного проектирования, интегрированного с информационными технологиями, позволяющими делать частые сверки действий для раннего обнаружения ошибок. Для чего применяется гибридный поэтапно-гибкий подход, объединивший управление проектами и системную инженерию, используя в качестве показателя прогресса мероприятия по верификации – четко определенные технические вехи, значимые для всех участников проекта [13].

Идеальную возможность поэкспериментировать с подходами к управлению проектами для создания высокоадаптивной структуры управления предоставил проект Iris по разработке микроспутника CubeSat. Команда Iris использовала управленческий подход, который позволил командам самоорганизовываться и направлять проектный труд, тем самым меняя роли руководителя проекта, а системная инженерия привела к руководству и координации.

Iris продемонстрировали меньшие управленческие усилия и более сбалансированную загрузку задач по сравнению с традиционным управляемым проектом по созданию спутника. Кроме того, проект Iris продемонстрировал замечательную устойчивость к трудовым ограничениям из-за пандемии COVID-19. Результаты показывают, что можно обеспечить гиб-

кость космических проектов с децентрализованной структурой управления и улучшенным командным взаимодействием, сохраняя при этом строгий график выполнения, необходимый для большинства космических программ.

Центр Управления космическими технологиями (GCD) NASA на основе MBSE развернул систему управления программами (от разработки до выполнения миссий) на основе моделей (MBPM), которая работает над автоматизацией и расширением процессов с помощью цифровых инструментов для поддержки эффективного, предсказуемого и обоснованного принятия решений¹⁷. GCD фокусируется на технологиях с высоким риском и высоким потенциальным выигрышем и продвигает исследовательские концепции в решения для космических полетов, которые откроют новые возможности или радикально изменят существующие подходы. Программа финансирует более 100 проектов в области космических технологий во многих различных областях.

Отдельный научный интерес представляет использование подхода MBSE для снижения рисков отказов и т.п. Подобный подход назвали «анализом безопасности на основе моделей» (Model-based safety analysis, MBSA). В MBSE создается виртуальная модель системы, как правило, на стадии проектирования или планирования. А в разделе MBSA по обеспечению безопасности выполнения миссий (Model-Based Mission Assurance,

¹⁶ Model Based Mission Assurance & Flight Worthiness Workshop. Outbrief of Content and Results / N. Lao, R. Stevens, A. Chang, A. Gil // The Aerospace Corporation, September 14th, 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://sef.aerospace.org/files/2022/01/Model-Based-Mission-Assurance-Flight-Worth-Workshop.pdf> (дата обращения: 29.06.2023).

¹⁷ Knowledge and Digital Information Sharing Event Advances Community Partnerships [Электронный ресурс] // APPEL Knowledge Services, June 10, 2021. URL: <https://appel.nasa.gov/2021/06/10/knowledge-and-digital-information-sharing-event-advances-community-partnerships/> (дата обращения: 29.06.2023).



МВМА)¹⁸ отдел обеспечения безопасности полетов (SMA) NASA использует эту модель для выполнения различных анализов надежности на более ранних этапах жизненного цикла, а не после того, как система была спроектирована и разработана. Управление безопасности и обеспечения полетов (OSMA) NASA поощряет развитие МВМА во всем агентстве¹⁹. Чтобы приступить к созданию основы для обмена данными, команда NASA по надежности и ремонтпригодности (R&M) собирает данные для создания библиотеки режимов отказов (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA), которая доступна во всем агентстве²⁰. В настоящее время в NASA создается Платформа данных предприятия (EDP), реализующая руководящие принципы, установленные в федеральной Стратегии Данных США и при этом учитывающая специфику разнородности данных, собираемых, генерируемых и используемых NASA. Основной задачей является консолидация и сопоставление данных из разных источников, и стандартизация каналов их получения с единственной Платформы Данных.

Также поставлена задача стандартизации комплекта продуктов для первичного анализа данных, включая систему поддержки принятия решений (BI) на основании когнитивной визуализации данных. Конечной целью использования EDP является возникновение и рост непрерывного цикла положительной обратной связи, в котором политика использования данных, управления данными и масштабируемости продуктов аналитики данных позволит создать организационную культуру использования данных и доверия к ним [14].

Для оценки эффективности цифровых технологий в космической индустрии США целесообразно рассмотреть релевантный опыт компаний частного сектора²¹. Частная космическая компания Space X на ранних стадиях своего развития исходила из концепции обеспечения исследования космоса с помощью данных и аналитики, и разработки и создания космических систем как комплексных модульных инженерных платформ [15]. Применяя вертикальную интеграцию и модульный подход к разработке программного обеспечения, компания повела тестирование систем для управления жизненным циклом и управления данными о продуктах (PDM), после чего выбрала наиболее подходящие именно для её модели проведения работ. При этом был настроен и поддерживается обмен данными между системами проектирования (CAD/CAE) и системами

PLM/PDM. После чего все работы по созданию и производству ракет и космических аппаратов осуществляются путём создания их цифровых двойников²².

Созданная система хранит цифровые двойники сборок ракет и базы данных элементов и операций, которые совместно используются различными группами экспертов через централизованное хранилище [16]. Централизованный характер баз данных также способствует общению и сотрудничеству команд Space X, тем самым устраняя разрозненность.

Процесс разработки с большим объемом данных позволяет внедрять инновации в более сложные и продвинутое системы. Поскольку аналитика данных выявляет влияние множества переменных на характеристики ракеты, инженеры могут принимать более обоснованные решения о проектных спецификациях и ограничениях. Space X так сравнительно быстро разработала и запустила многоразовые ракеты Falcon 9 во многом именно благодаря такому подходу к разработке.

Инвестиции Space X в цифровые платформы привели к повышению производительности на 50%. Данные также позволяют внедрять новые производственные процессы, такие как 3D-печать, что позволяет Space X вертикально интегрироваться. Данный подход является частью бизнес-модели компании (в настоящее время Space X производит более 85% своего оборота для запуска собственными силами). Что позволяет им дополнительно сокращать расходы²³.

Опыт Европейского Союза

Европейское космическое агентство (ЕКА) использует при оценке рисков проектов концепцию оценки жизненного цикла (LCA) космической техники в самом широком смысле, в том числе используя для этого методы системного проектирования на основе моделей (MBSE) [17-20]. В своей последней Технологической стратегии ЕКА²⁴ поставило перед европейской космической отраслью серьезные задачи, включая сокращение темпа производства изделий и запуска миссий на 30% и повышение экономической эффективности на порядок. Эти цели не могут быть достигнуты только за счет улучшения технологии проектирования и производства изделий и услуг, в связи с чем в ЕКА принято решение внедрять MBSE²⁵. В стратегической повестке ЕКА на период до 2025 года²⁶ отмечается,

¹⁸ Joshi A., Heimdahl M., Miller S.P., Whalen M. Model-Based Safety Analysis. NASA, CR-2006-213953. Hampton: National Aeronautics and Space Administration, 2006. 60 p.

¹⁹ DiVenti T., Cornford S. ModelBased Mission Assurance the Context of NASA's Digital Transformation (DT) Program [Электронный ресурс] // Systems Engineering Forum. The Aerospace Corporation, 2022. URL: <https://sef.aerospace.org/files/2022/01/ModelBased-Mission-Assurance-NASAs-DT.pdf> (дата обращения: 29.06.2023).

²⁰ Lindsey N., DiVenti T. Help NASA With Its Digital Transformation Strategy [Электронный ресурс] // Office of Safety and Mission Assurance, NASA. March 30, 2021. URL: <https://sma.nasa.gov/news/articles/newsitem/2021/03/30/help-nasa-with-its-digital-transformation-strategy> (дата обращения: 29.06.2023).

²¹ Kennedy B., Tyson A. Americans' Views of Space: U.S. Role, NASA Priorities and Impact of Private Companies [Электронный ресурс] // Pew Research Center. July 20, 2023. URL: <https://pewrsr.ch/44Qu85U> (дата обращения: 29.06.2023).

²² Thomson C. SpaceX delivers outer space at bargain rates [Электронный ресурс] // Siemens PLM Software, 2015. URL: <https://www.geopl.com/knowledge-base-resources/GEOPLM-Siemens-PLM-NX-SpaceX-cs-Z10.pdf> (дата обращения: 29.06.2023).

²³ Mishra S. How SpaceX Reduces Its Cost? [Электронный ресурс] // Medium. URL: <https://sanketmishra24.medium.com/how-spacex-reduces-its-cost-f5bbc1799e41#:~:text=SpaceX%20is%20a%20great%20example,rockets%20at%20an%20affordable%20price> (дата обращения: 29.06.2023).

²⁴ ESA's Technology Strategy [Электронный ресурс] // ESA. Version 1.2, September 2022. 80 p. URL: https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/ESA_Technology_Strategy_Version_1_0.pdf (дата обращения: 29.06.2023).

²⁵ Terrailon J.-L. Digital transformation in the European Space Industry // ERTS2022. Article number: fhal-03694417. France, Toulouse, 2022.

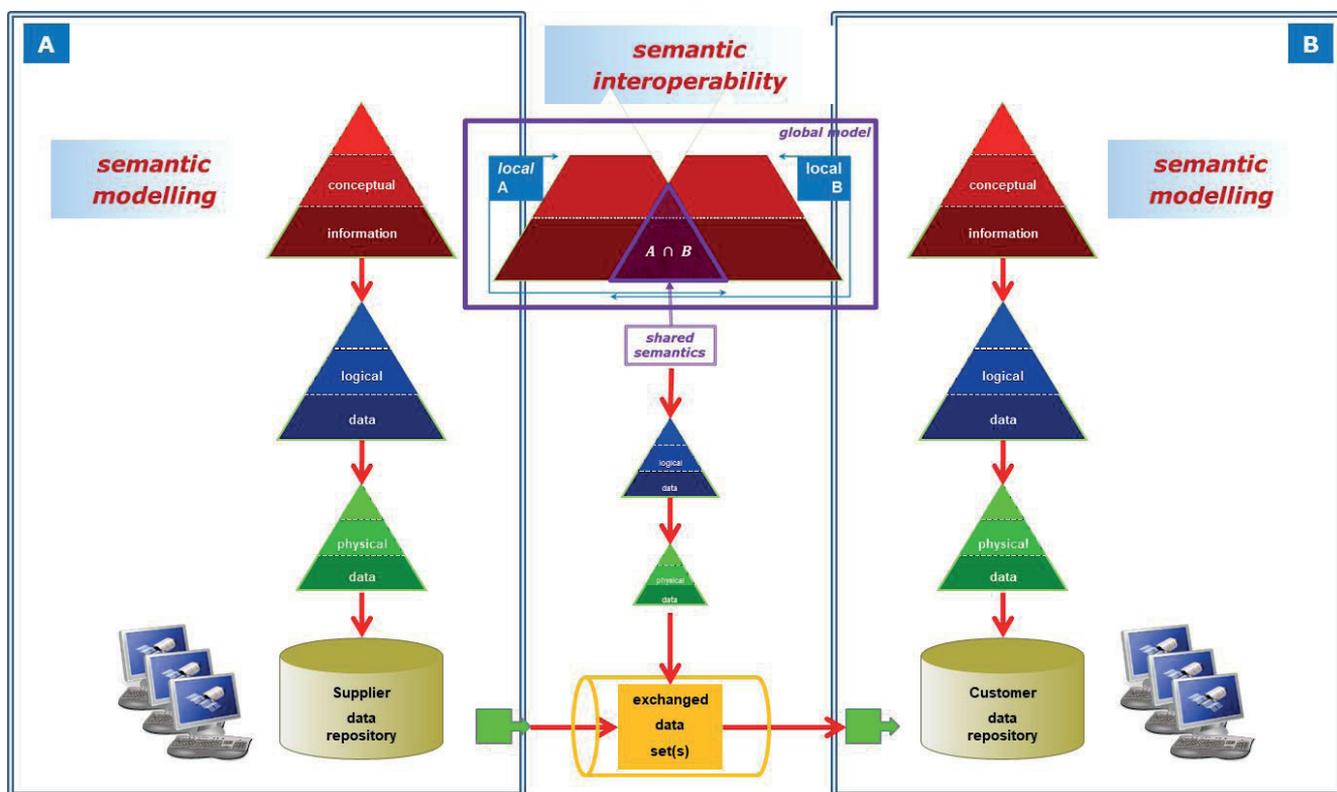
²⁶ Agenda 2025 [Электронный ресурс] // ESA. URL: https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/Agenda_2025 (дата обращения: 29.06.2023).



что Агентство полностью переводит управление проектами в цифровой формат, что позволит разрабатывать цифровых двойников как для проектирования с использованием MBSE, так и для закупок и финансов, обеспечивая полную цифровую непрерывность с промышленностью. Этот подход положен в основу и технологической стратегии ЕКА.

Стремясь объединить различные подходы к MBSE, в ЕКА объединили идеи трёх основных европейских космических компаний – Airbus Defense & Space, Thales Alenia Space и OHB SE – в области MBSE, создав единую онтологию. Цель данной меры состояла в том, чтобы увеличить потенциал для эффективной совместной работы различных подходов MBSE и обеспечить беспрепятственный обмен информацией, связанной с MBSE, между различными заинтересованными сторонами. В рамках проекта были предложены и реализованы решения по консолидации деятельности MBSE в Европе²⁷. В этом направлении ЕКА развивает систему OSMoSE (Общее семантическое моделирование для системной инженерии), которая призвана

обеспечить взаимодействие между инфраструктурами на основе моделей, чтобы обеспечить обмен информацией между различными заинтересованными сторонами, и создаёт Портал сквозной системной инженерии (ESEP)²⁸, использующий объектно-ролевое моделирование. Это позволяет совмещать наборы данных, идентифицированные каждым участником совместной работы и абстрагировать их в онтологию, а все онтологии согласовать в единую «Онтологию космической системы» (SSO), допуская семантическую возможность взаимодействия инструментов между различными дисциплинами. Таким же образом это применяется и к обменам данными между заказчиками и поставщиками изделий и комплектующих. Таким образом, онтологии создают совместимость представлений о данных и бизнес-процессах у всех участников проектов в ракетно-космической отрасли. Семантическая модель взаимодействия представлена на рисунке 2. Рисунок 3 представляет реализацию цифровой непрерывности.



Р и с. 2. Семантическая возможность взаимодействия²⁹

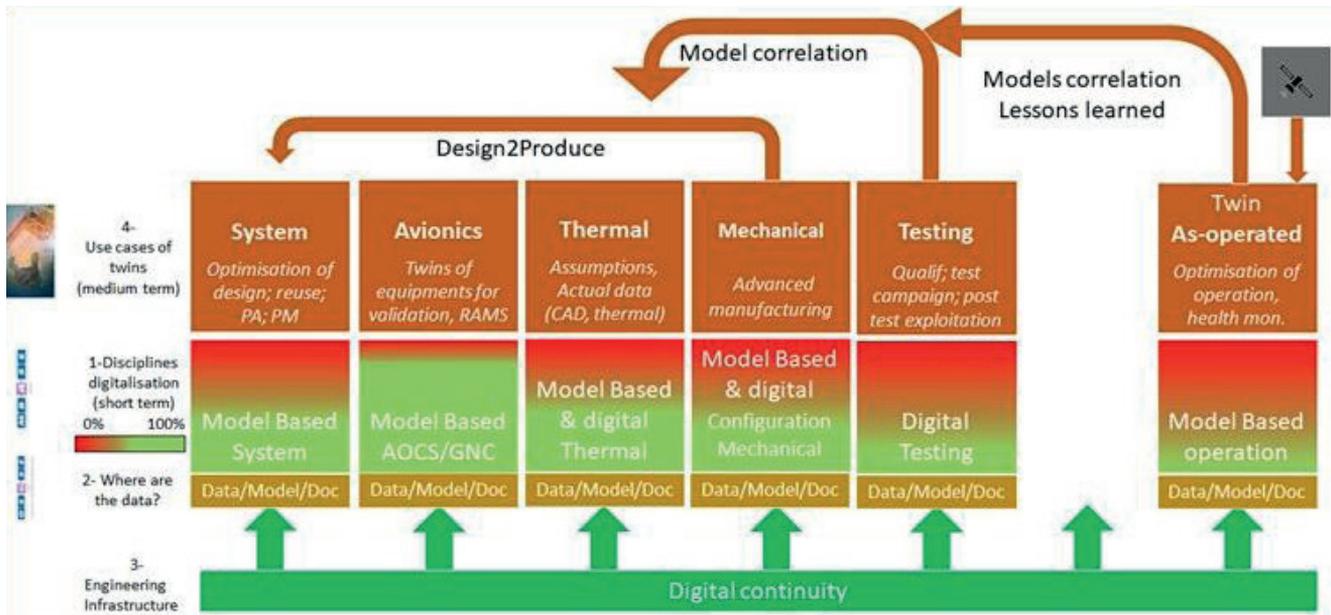
F i g. 2. Semantic interoperability²⁹

²⁷ Overall Semantic Modelling for System Engineering : Executive Summary Report [Электронный ресурс] // ESA. 23.11.2020. URL: <https://nebula.esa.int/content/osmose-ontology-governance> (дата обращения: 29.06.2023).

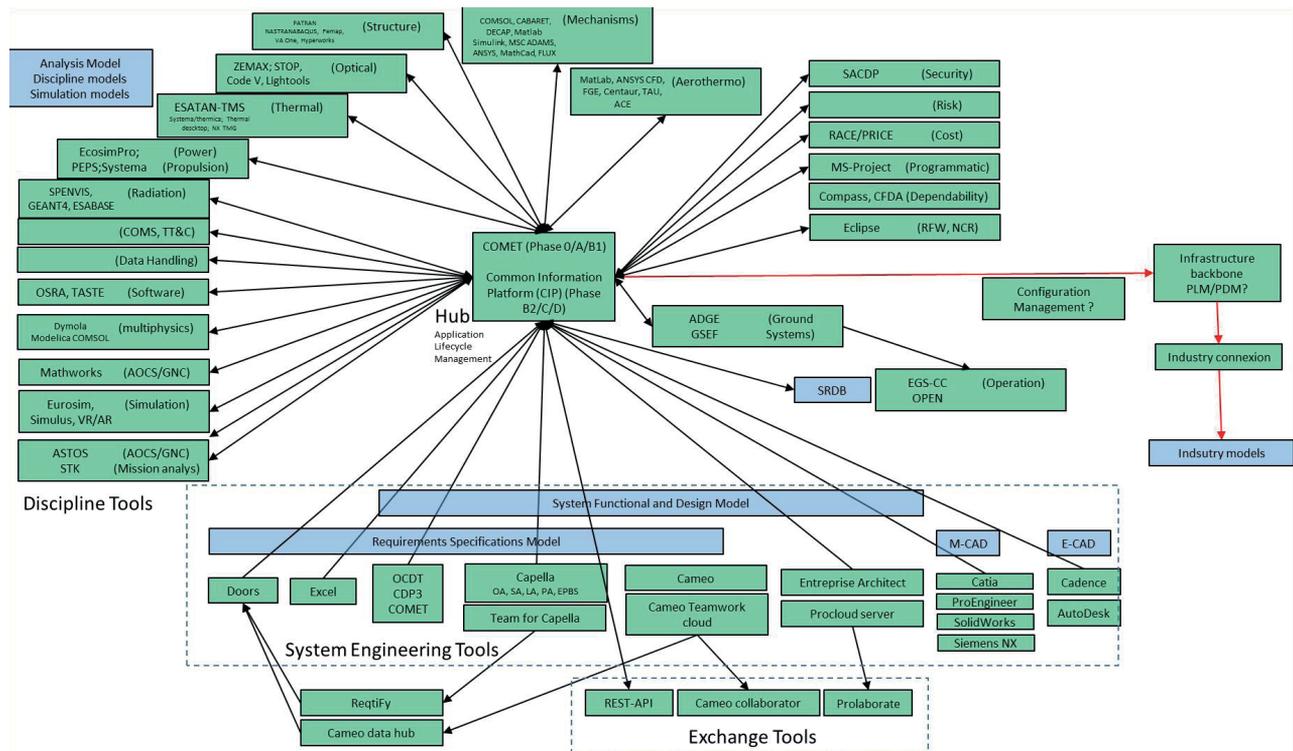
²⁸ Svaikauskaitė E. Concurrent Design Facility [Электронный ресурс] // ESA. URL: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Concurrent_Design_Facility (дата обращения: 29.06.2023).

²⁹ Terrailon J.-L. Digital transformation in the European Space Industry // ERTS2022. Article number: fihal-03694417. France, Toulouse, 2022.





Р и с. 3. Иллюстративный пример обеспечения цифровой непрерывности³⁰
F i g. 3. Illustrative example of digital continuity³⁰



Р и с. 4. Композиция инженерных инструментов «Цифрового космического корабля»³¹
F i g. 4. Composition of engineering instruments of the "Digital Spacecraft"³²

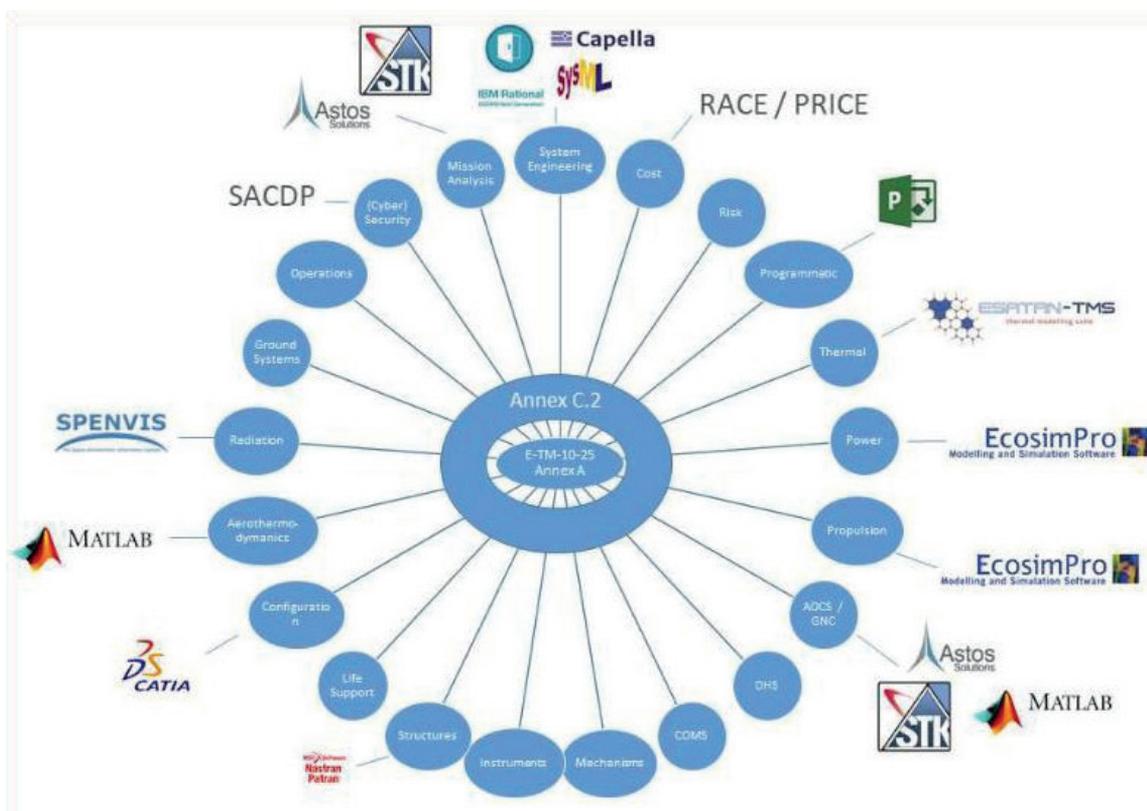
³⁰ Там же.

³¹ Там же.



Конечной целью ЕКА по применению всех описанных выше методов и технологий является программа создания «Цифрового космического корабля», которая представляет собой возможность сквозной непрерывной работы над космическими миссиями в единой европейской цифровой экосистеме³². «Цифровой космический корабль» является большим количеством инструментов реализации оцифровывания и включает много увязанных друг с другом на основе общей онтологии и

т.н. семантической интероперабельности технологий, таких как MBSE, CAD/CAE, методы математического и имитационного моделирования, дополненная, виртуальная и смешанная реальность (AR/VR/MR), искусственный интеллект (AI) и различные системы коммуникации, совместного ведения работ и управления проектами, а также технологии управления на уровне инфраструктуры и данных. Композиция проекта представлена на рисунке 4.



Р и с. 5. Система, взятая за прототип «Цифрового космического корабля» – COMET DEHP [21]

F i g. 5. The system taken as a prototype of the “Digital spacecraft” – COMET DEHP [21]

При соединении результатов моделирования с физическими данными в непрерывной синхронизации (цифровые двойники) «Цифровой космический корабль» призван создать обратную связь от операций назад к проектам, позволяя обнаруживать недочёты как в реальных физических системах, так и в их моделях. «Цифровой космический корабль» призван позволять динамично трансформировать модели для улучшенного принятия решений.

В более общем плане MBSE и концепция «цифрового космического корабля» означают радикальное изменение способа совместной работы ЕКА и промышленности, переход от 100% отношений между заказчиком и поставщиком к подходу, в большей степени основанному на совместном проектировании. Это означает более высокую прозрачность и доверие, более четкие цели и более прочное партнерство [21]. В отли-

чие от подходов, основанных на документах, требования сопоставляются с функциями в ходе разработки и, следовательно, прослеживаются во всей системе, даже если происходят изменения в её структуре.

Синергия подходов MBSE и концепции «цифрового космического корабля» происходит за счёт использования технологий «цифровых двойников» и аддитивного производства. Для реализации этого подхода запущен финансируемый ЕС проект IoTwins [22], направленный на создание надежной платформы, к которой производители могут получить доступ для разработки гибридных цифровых двойников (DT) своих активов, развертывания их как можно ближе к источнику данных (на шлюзе IoT или на граничных узлах) и получения преимуществ облачных ресурсов для разгрузки интенсивных вычислительных задач, таких как, например, анализ больших данных и об-

³² Terraillon J.-L. Digital transformation in the European Space Industry // ERTS2022. Article number: fihal-03694417. France, Toulouse, 2022.



учение моделей машинного обучения (ML).

А в рамках новой инициативы Advanced Manufacturing³³ ЕКА стремится сосредоточиться на новых производственных технологиях, которые открывают новые промышленные возможности с точки зрения свободы проектирования, оптимизации этапов производства и снижения затрат, а также повышения производительности конечного продукта. Эти же направления присутствуют и в технологической стратегии ЕКА³⁴.

Чтобы вселить в руководителей миссий достаточную уверенность в деталях, напечатанных на 3D-принтере, необходимо разработать методы, гарантирующие, что эти элементы будут работать в соответствии с эталонным воспроизводимым стандартом. Конечная цель состоит в том, чтобы внедрить специальный стандарт Европейской координации космической стандартизации (ECSS) для общего использования всеми европейскими космическими проектами.

Опыт Китайской Народной Республики

Модель современного развития космической отрасли в КНР основана на «четверной спирали» [23], которая охватывает процесс генерации инноваций, основанный на взаимодействии государства, научных кругов, бизнеса и гражданского общества. Университеты и предприятия проводят исследования и разработки, тогда как государство обеспечивает нормативно-правовую базу самостоятельно или совместно с партнерами по исследованиям. Гражданское общество, состоящее из сообществ и сетей, генерирует знания, способствующие инновациям. Другим важным фактором развития космической деятельности являются Китайская академия наук и академические круги в целом.

Компания Charming Globe Satellite Technology Limited, созданная на базе академии. Другой пример – Zhuhai Satellite, производитель спутников, созданный на базе Харбинского технологического института. Есть также случаи, когда университеты оказывают поддержку исследователям, работающим над спутниками или другими технологиями, которые становятся коммерчески жизнеспособными в Китае, что позволяет этим исследователям создавать компании. Эта стратегия часто приводит к тому, что университет становится акционером компании или имеет аналогичные отношения. Академическая сторона обеспечивает важный механизм поддержки как с точки зрения финансирования, так и технологий. Довольно часто по этой схеме действует аэрокосмический университет Бэйхан.

Технологической основой для реализации принципов «четверной спирали» являются платформенные решения [24]. Так, например, для расширения возможностей поддержки научных исследований и инноваций под эгидой Академии наук Китая (CAS) создано China Science and Technology Cloud (CSTCloud)³⁵, которое направлено на разработку электронной инфраструк-

туры следующего поколения для исследований, в том числе с использованием космической деятельности. Версия 2.0 CSTCloud объединяет 52 платформы и более 1000 исследовательских программ, предоставляя цифровые услуги для исследований, требующих больших объемов вычислений и данных. Чтобы поддерживать бесперебойные услуги на высшем уровне, CSTCloud реализовал интеграцию и облачную обработку высокоскоростных исследовательских сетей, массивного хранилища данных, крупномасштабного вычислительного анализа, исследовательского программного обеспечения, научных данных и других цифровых ресурсов.

Экономические риски и барьеры внедрения цифровых технологий

В настоящее время в России активно изучаются вопросы коммерциализации космической деятельности. При этом в размещенной на сайте Минэкономразвития России «белой книге» высоких технологий в России и за рубежом³⁶ указано, что существующие отечественные телекоммуникационные и геоинформационные космические системы не в полной мере отвечают задачам, которые стоят перед экономикой России в рамках цифровой трансформации и повышения эффективности экономики. Как уточняется в документе, зарубежные продукты и услуги в этой области часто превосходят отечественные, при этом иностранные компании снижают себестоимость услуг за счет внедрения систем многократного использования ракет-носителей, стандартизации и организации массового производства продукции.

Прежнее экономическое преимущество российских предприятий ракетно-космической промышленности (сравнительно более низкие ставки вознаграждения) уступает более высокой производительности труда в коммерческих космических компаниях США, а также китайской и индийской космической промышленности, агрессивно выходящим на международный рынок запусков. И это тоже требует создания более современных систем разработки, производства и эксплуатации КА с более низкими удельными затратами на технологические процессы [25].

Важно использовать комплексный подход к внедрению цифровых технологий, выходящий за рамки внимания только к технологиям и опирающийся на понимание цифровых бизнес-моделей как сложных социально-экономико-технических систем. При этом следует отметить, что определение оптимальной для той или иной государственной структуры и отрасли промышленности модели цифровой трансформации представляет собой весьма трудную задачу.

Следует заметить, что положительный эффект от внедрения цифровой технологии может оказаться очень большим, но на довольно продолжительном интервале времени. В связи

³³ Advanced Manufacturing [Электронный ресурс] // ESA. URL: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Advanced_Manufacturing (дата обращения: 29.06.2023).

³⁴ ESA'S Technology Strategy [Электронный ресурс] // ESA. Version 1.2, September 2022. 80 p. URL: https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/ESA_Technology_Strategy_Version_1_0.pdf (дата обращения: 29.06.2023).

³⁵ CSTCloud 2.0 [Электронный ресурс] // China Science and Technologies Cloud. URL: <https://www.cstcloud.net/ucintro.htm> (дата обращения: 29.06.2023).

³⁶ Развитие отдельных высокотехнологичных направлений. Белая книга / Т. Л. Броницкий, К. О. Вишневыский, Л. М. Гохберг, Т. С. Зинина [и др.]. М.: НИУ ВШЭ, 2022. 186 с.



с этим и окупаемость инвестиций в новые технологии имеет длинное динамическое измерение. Также при выборе момента, когда внедрение экономически рентабельно, необходимо учитывать наличие реального спроса (как рыночного, так и государственного – оборонного и т.п.) на предлагаемую к внедрению технологию и продукты на её основе, а также все транзакционные издержки, включая те, которые связаны с неполной амортизацией заменяемых технологий, затратами на их выведение из строя и утилизацию при замене на новые и будущими операционными расходами на поддержание работоспособности цифровой техники и устройств, и эксплуатацию программного обеспечения и цифровых моделей (включая затраты на переподготовку и обучение способных на это кадров)³⁷ [26, 27]. Именно уровень транзакционных издержек на одну полезную транзакцию, создающую единицу добавленной стоимости высоко технологичных производств (операций) может быть важнейшим показателем эффективности цифровизации, конечно, с учётом затрат на саму цифровизацию. Это потребует расчёта так называемой полной хозяйственной эффективности разрабатываемых и реализуемых государственных программ развития. Данный метод в своё время был разработан советской экономической школой, не заслуженно забыт в настоящее время, требует и ждёт своего применения на правительственном уровне.

И поскольку, с одной стороны, создание методик и инструментов для действительно релевантных оценок эффективности внедрения цифровых и вообще новых технологий вызывает существенные затруднения, а с другой, без реальных оценок целесообразности их внедрения в точно определённые моменты экономическая эффективность таких внедрений сомнительна, без государственных мер стимулирования внедрения цифровых технологий оно будет происходить медленно. И во всех странах это, судя по всему, понимают, поскольку имеют программы подобного стимулирования. Особо интересен в этом смысле опыт Израиля. Израильское космическое агентство в партнерстве с Управлением по инновациям Израиля предлагает поддержку в космическом секторе частным компаниям, которая поощряет исследования и разработки для поиска новых, передовых технологических решений и продуктов в космическом секторе, в том числе путём использования космической среды, либо путем интеграции, обработки и анализа данных из космоса. В рамках этой программы, которая существует с 2012 года, 62 проекта НИОКР уже выиграли в общей сложности около 160 миллионов шекелей. Программа позволяет проводить долгосрочные исследования и разработки для разработки будущих инновационных продуктов и технологий, которые обеспечат компании конкурентное преимущество, позволят им выйти на новые рынки и укрепить общий рост израильской экономики. «Крупная» компания, участвующая в этой программе (компания с годовой выручкой 100 млн долларов США и более в течение года, предшествующего подаче

заявки), получит грант в размере 50% от утвержденных расходов на НИОКР. «Небольшая» компания (с годовой выручкой менее 100 миллионов долларов США в течение года, предшествующего подаче заявки, получит грант в размере 60% на НИОКР наземных продуктов и систем или грант в размере 85% на НИОКР продуктов и систем, предназначенных для работы в космосе. При этом программа обеспечивает участникам разделение рисков в процессе разработки, не полагаясь на прибыль или будущие успехи. Поддерживаемая компания возместит финансирование, полученное от Управления инноваций Израиля, за счет лицензионных отчислений от продаж, только если предприятию удастся выйти на коммерческую стадию. Также в Израиле работает крупный инкубатор Earth&Beyond для поддержки космических проектов³⁸.

В России нормативно-правовая база цифровой трансформации бизнес-моделей в промышленности, несмотря на принимаемые меры, не сформирована на уровне, достаточном для существенного повышения эффективности экономики и достижения технологического суверенитета. Государственная политика цифровой трансформации перерабатывающей промышленности РФ и ее нормативно-правовое обеспечение, хотя и ориентированы на лучшие мировые практики и претендуют на комплексный подход, тем не менее имеют ряд проблем: недостаточная системность, высокая изменчивость правового поля, недостаточное развитие технического регулирования, наличие противоречий в законодательстве, стандартах и технических регламентах.

Относительно подходов к финансированию и управлению космической деятельностью следует отметить, что практически во всех зарубежных агентствах в значительной степени реализуются государственно-частные партнерства (ГЧП) как способ преодоления барьеров, таких как высокие требования к капиталу и риски инвестиций, сложные технологии и длительные сроки разработки. ГЧП может принимать несколько форм, но, как правило, используются совместные инвестиции между правительством и промышленностью, или предоставление государством неких мощностей и оборудования, или их комбинация. В США для повышения эффективности ГЧП создают специальную гибридную космическую архитектуру (HSA). HSA – это информационная архитектура, которая поддерживает интеграцию и объединение новых возможностей космических малых спутников с традиционными космическими системами правительства США и союзников. HSA также предполагает, что любая миссия достигается с помощью нескольких платформ, обеспечивающих составные компоненты системы систем. В дополнение к расширению возможностей и экономии средств за счет партнерства, естественный синергизм, обеспечиваемый сообществами HSA, станет важным фактором в формировании космической экосистемы, которая обеспечивает полезность для широкого круга пользователей³⁹ [28].

Также в США реализуют программу Flight Opportunities STMD,

³⁷ Ступин Р. С., Лукьянова П. Е. Основные инструменты формирования цифровой культуры в ракетно-космической промышленности // Вызовы цифровой экономики: импортозамещение и стратегические приоритеты развития / Сб. статей V Юбилейной Всероссийской НПК с межд. участием. Брянск: БГИТУ, 2022. С. 580-586. EDN: SISEUG

³⁸ NIS 18.5 million to be given to 11 companies for space tech development [Электронный ресурс] // The Jerusalem Post. January 8, 2022. URL: <https://www.jpost.com/business-and-innovation/tech/article-691885> (дата обращения: 29.06.2023).

³⁹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Leveraging Commercial Space for Earth and Ocean Remote Sensing. Washington, DC: The National Academies Press, 2022. 94 p. <https://doi.org/10.17226/26380>



которая быстро демонстрирует технологии для исследования космоса, открытий и расширения космической торговли. В 2022 году заявка TechFlights впервые включала доступ к возможностям тестирования, размещенным на коммерческих платформах и космических кораблях на орбите в сотрудничестве с программой NASA по технологиям малых космических кораблей. В 2022 году NASA выбрало девять космических технологий для летных испытаний, чтобы продвигать инновации, отвечающие потребностям как агентства, так и коммерческой космической отрасли. Заявка включала три тематические области, которые отражают приоритеты NASA в отношении дальнейшего освоения космоса и целей научных открытий. Эти темы сосредоточены на поддержке инфраструктуры и возможностей для надежной лунной экономики; услуг и инфраструктуры наблюдения Земли, начиная от низкой околоземной орбиты и заканчивая геосинхронной околоземной орбитой; а также систем для мониторинга и решения проблем изменения климата⁴⁰.

При этом есть примеры неудачных ГЧП. Так, например, европейская спутниковая программа Galileo GNSS. В первоначальной структуре программа включала значительные финансовые вложения в наземный и прикладной сегменты от промышленного консорциума, наградой за которые должен был стать надежный коммерческий рынок для созданных услуг. Однако консорциум, состоящий из многих ведущих европейских космических подрядчиков, не выполнил цели, поставленные Европейским союзом (ЕС), ввергнув всю программу в финансовый кризис, который разрешился только после того, как ЕС предоставил дополнительное финансирование и взял программу под свой контроль. Однако извлеченные уроки позволили ЕС к настоящему времени отладить эффективные механизмы создания подобных ГЧП. Было установлено, что ГЧП менее успешны, когда правительство, стремясь покрыть собственные расходы, делает ставки на рынках, которые он не полностью понимает и над которыми он не имеет существенного контроля. Аналогичный опыт есть также в США, КНР, Великобритании и Новой Зеландии. Пример последней показывает, как точная ставка на определенную рыночную нишу позволила создать коммерчески успешный проект легкой ракеты-носителя Electron от Rocket Lab⁴¹.

Зарубежный опыт технологической кооперации государства и бизнеса может быть использован для повышения эффективности основной деятельности и коммерциализации цифровых продуктов и сервисов российских предприятий ракетно-космической промышленности с учётом адаптации к современным, в т.ч. международным, условиям.

Заключение

Особенностью развития космической индустрии в Российской Федерации является то, что в части производственных и управленческих процессов значительный акцент осуществляется на производство ракетно-космической техники, а не на исследовательские программы и разработку средств для осуществления научных экспериментов в космосе. Таким образом, полный переход системы государственного управления ракетно-космической отраслью на имплементацию платформенного подхода и развития датацентричности связан с существенными административно-правовыми барьерами. В качестве перспективной модели отраслевого государственного управления в ракетно-космической промышленности может быть рассмотрена диверсификация видов производственной и экономической деятельности, создание платформы цифрового управления отраслью. Государственно-частное партнерство при этом может строиться на двухуровневой модели диверсификации, в рамках которой государство должно продолжить финансирование оборонных заказов и НИОКР, а предприятия, производящие продукцию гражданского назначения, должны быть рентабельными и совершенствовать инструменты коммерциализации. В настоящем исследовании продемонстрирован аналогичный подход ведущих мировых космических центров и агентств (NASA, ESA, CNSA).

Опыт успешной коммерциализации космической деятельности зарубежных агентств показывает, что в ракетно-космической промышленности Российской Федерации в качестве перспективных мер повышения эффективности коммерческой деятельности в сфере выпуска гражданской продукции может быть рассмотрена кооперация с частными компаниями, заинтересованными в развитии сервисов и услуг на основе результатов космической деятельности (спутниковая навигация, телерадиовещание и связь, гидрометеорология, дистанционное зондирование Земли из космоса). Среди потенциальных партнеров в развитии цифровых продуктов и сервисов, созданных на основе результатов космической деятельности, можно выделить:

- операторы мобильной связи;
- компании агропромышленного комплекса;
- девелоперские агентства;
- операторы транспортно-логистической деятельности.

Важным аспектом повышения эффективности является также развитие международной кооперации в сфере цифровых продуктов и сервисов, созданных на основе результатов космической деятельности. При этом форматы и направления сотрудничества должны учитывать особенности текущей геополитической ситуации и стратегии внешней политики Российской Федерации.

Также отечественной ракетно-космической промышленности необходим новый подход в формировании стратегических приоритетов и направлений развития, основанный на модели

⁴⁰ Signé L., Dooley H. How space exploration is fueling the Fourth Industrial Revolution [Электронный ресурс] // The Brookings Institution. March 28, 2023. URL: <https://www.brookings.edu/articles/how-space-exploration-is-fueling-the-fourth-industrial-revolution/> (дата обращения: 29.06.2023); Flight Opportunities // NASA : сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/flightopportunities/index.html> (дата обращения: 29.06.2023).

⁴¹ Europe Faces More Government Financing for Galileo Program [Электронный ресурс] // Space News. March 14, 2007. URL: <https://spacenews.com/europe-faces-more-government-financing-galileo-program/> (дата обращения: 29.06.2023).



реверсивного инжиниринга. В качестве контрольной точки анализа может быть рассмотрена роль космических исследований и освоения космического пространства в человеческой деятельности, а также оценка влияния космической деятельности на социально-экономическое развитие. Данный подход позволит применять форсайтные модели исследований, работать с инновационной неопределенностью, формировать прогнозы развития на период времени 30 лет и более, что, в свою очередь, позволит приоритизировать направления финансирования в ракетно-космической отрасли.

Применимость указанного подхода в космической отрасли России анализируется в научных трудах Малинецкого и Тимофеева [29]. Статья является основополагающей в части формирования представлений о трендах развития мировой космонавтики и оценки способов реагирования на глобальные вызовы. В работе сформулированы направления потенциального развития пилотируемой космонавтики, стратегические выгоды для социально-экономического развития и повышения уровня жизни человека. Отметим, что сделанные в статье прогнозы соответствуют ключевым трендам развития пилотируемой космонавтики, которые подробно изучены и отражены в докладах NASA⁴² и программных заявлениях «белой книги» 2021 года о космической деятельности КНР. Кроме того, предлагаемый подход соответствует современным методологиям технологического прогнозирования с точки зрения сложных систем [30].

Основные проблемы внедрения цифровых технологий заключаются в том, что использование сложных алгоритмов приводит к высокой стоимости и длительным срокам разработки основанных на них систем. Кроме того, необходимо обеспечить эффективное взаимодействие между специалистами по разработке цифровых систем и специалистами по предметной области, чтобы определить соответствующие правила/конфигурации для различных сценариев и настроек. И всё это, как было показано выше, требует изменения - порой кардинального - бизнес-моделей и моделей управления. Что в условиях крупной корпорации, тем более с государственным участием и работающей в такой сложной области, как космическая деятельность, необходимо производить, с одной стороны, незамедлительно, а с другой, взвешенно и осторожно.

Не подвергнуть риску основной бизнес при внедрении перспективных управленческих и технологических практик, добываясь от них максимальной отдачи, можно с помощью Модели анализа поведенческой сложности напряженных социо-

технических систем, которая базируется на анализе процессов самоподобия, возникающих в ходе изменений в компании. Модель использует фрактальное (информационное) измерение и показатель Херста, а в качестве математического аппарата для моделирования - сети Петри. Модель позволяет мониторить процессы целенаправленных изменений в компании, определяя ее текущее месторасположение в пространстве: -1 - стабильность, но застой и низкая эффективность; 0 - зона изменений и инноваций в пределах границ порядка и хаоса; +1 - срыв в хаос. Для каждой точки в этом пространстве рассчитываются показатели эффективности и пределы адаптивности.

В практическом плане система позволяет понять для каждого контрольного момента времени: нужно ли сейчас включить жесткий менеджмент или дать ситуации (сотрудникам), самоорганизуясь, самостоятельно найти оптимальный путь дальнейших изменений.

Данная модель оптимальна для использования при перестройке в организации ракетно-космической промышленности:

- структуры менеджмента любых уровней;
- методов управления инновациями;
- методов оценки личной и групповой эффективности;
- мотивационных схем и механизмов;
- систем управления рабочим временем и организации рабочих пространств.

Представленный метод позволяет находить пределы напряженности, когда поведение системы становится хаотичным. Знание этих пределов может позволить разработать оптимальный процесс для требуемого напряжения в системе или для существующего процесса, который приводит к инновациям. Представленный подход к анализу сложности социотехнических систем использует моделирование с помощью классических сетей Петри.

Возможно расширение этого подхода с использованием других инструментов, которые могут анализировать сложность на основе самоподобия или других характеристик (например, аттрактор в фазовом пространстве, неупорядоченное состояние, или моделирование на основе многоагентских алгоритмов). Такой подход гарантирует, что анализ сложности будет более надежным (с разных точек зрения), а в случае моделирования на основе агентов также позволит более детально анализировать самоорганизацию сложных систем.

References

- [1] Bousedra K. Downstream Space Activities in the New Space Era: Paradigm Shift and Evaluation Challenges. *Space Policy*. 2023;64:101553. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101553>
- [2] Brandenburg M., Lieberman S. Critical Spaces: European and US Institutions for Outer Space. *Astropolitics*. 2022;20(1):93-111. <https://doi.org/10.1080/14777622.2022.2098014>
- [3] Aloini D., Latronico L., Pellegrini L. The impact of digital technologies on business models. Insights from the space industry. *Measuring Business Excellence*. 2022;26(1):64-80. <https://doi.org/10.1108/MBE-12-2020-0161>
- [4] Kritsyn A.A., Stupin R.S. Technological partnerships and innovation clusters in the aerospace industry. *Ekonomika i upravlenie v mashinostroyeni*. 2022;(3):38-48. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: DNAWOW

⁴² Nasa Technology Transfer Program [Электронный ресурс] // NASA, 2023. URL: <https://technology.nasa.gov/> (дата обращения: 29.06.2023).



- [5] Bohlmann U.M., Petrovici G. Developing planetary sustainability: Legal challenges of Space 4.0. *Global Sustainability*. 2019;2:e10. <https://doi.org/10.1017/sus.2019.10>
- [6] Giannopapa C., Staveris-Poykalas A., Metallinos S. Space as an enabler for sustainable digital transformation: The new space race and benefits for newcomers. *Acta Astronautica*. 2022;198:728-732. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.06.005>
- [7] Gorokhov V.L., Baryshev Yu.V., Vitkovsky V.V. Methodology of cognitive visualization of multidimensional data. *Soft Measurements and Computing*. 2018;(4):26-61. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YMBGHZ
- [8] Stark R. Future Virtual Product Creation Solutions with New Engineering Capabilities. In: *Virtual Product Creation in Industry*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2022. p. 555-648. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64301-3_21
- [9] Brunton S.L. et al. Data-Driven Aerospace Engineering: Reframing the Industry with Machine Learning. *AIAA Journal*. 2021;59(8):2820-2847. <https://doi.org/10.2514/1.J060131>
- [10] Ritter C., Browning J., Nelson L., Borders T., Bumgardner J., Kerman M. Digital Engineering Ecosystem for Future Nuclear Power Plants: Innovation of Ontologies, Tools, and Data Exchange. In: Madni A.M., Boehm B., Erwin D., Moghaddam M., Sievers M., Wheaton M. (eds.) *Recent Trends and Advances in Model Based Systems Engineering*. Cham: Springer; 2022. p. 15-24. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82083-1_2
- [11] Xue Z., Liu J., Wu C., Tong Y. Review of in-space assembly technologies. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021;34(11):21-47. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.043>
- [12] Makridakis S. The forthcoming Artificial Intelligence (AI) revolution: Its impact on society and firms. *Futures*. 2017;90:46-60. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.03.006>
- [13] Campos J., Ferguson P. Decentralized project management concept for schedule-critical space projects *Aerospace Systems*. 2021;4(3):191-200. <https://doi.org/10.1007/s42401-021-00098-7>
- [14] Pop G.I., Titu A.M., Pop A.B. Enhancing Aerospace Industry Efficiency and Sustainability: Process Integration and Quality Management in the Context of Industry 4.0. *Sustainability*. 2023;15(23):16206. <https://doi.org/10.3390/su152316206>
- [15] Blount P.J. One Small Step: The Impact of the U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act of 2015 on the Exploitation of Resources in Outer Space. *North Carolina Journal of Law and Technology*. 2016;18(2):160-186. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3388543> (accessed 29.06.2023).
- [16] Yavuz H., Konacaklı E. Digital Twin Applications in Spacecraft Protection. In: Karaarslan E., Aydin Ö., Cali Ü., Challenger M. (eds.) *Digital Twin Driven Intelligent Systems and Emerging Metaverse*. Singapore: Springer; 2023. p. 283-294. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0252-1_14
- [17] Wilson A.R., Vasile M., Maddock C., Baker K.J. The Strathclyde space systems database: a new life cycle sustainability assessment tool for the design of next generation green space systems. In: *Proceedings of the 8th International Systems & Concurrent Engineering for Space Applications Conference (SECESA 2018)*. Glasgow, United Kingdom: Technology & Innovation Centre; 2018. Article number: 21. Available at: <https://strathprints.strath.ac.uk/65685/> (accessed 29.06.2023).
- [18] Maury T., Loubet P., Serrano S.M., Gallice A., Sonnemann G. Application of environmental life cycle assessment (LCA) within the space sector: A state of the art. *Acta Astronautica*. 2020;170:122-135. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.035>
- [19] Fischer P.M., Lüdtke D., Lange C., Roshani F.-C., Dannemann F., Gerndt A. Implementing model-based system engineering for the whole lifecycle of a spacecraft. *CEAS Space Journal*. 2017;9(3):351-365. <https://doi.org/10.1007/s12567-017-0166-4>
- [20] Younse P.J., Cameron J.E., Bradley T.H. Comparative Analysis of Model-Based and Traditional Systems Engineering Approaches for Architecting a Robotic Space System Through Automatic Information Transfer. *IEEE Access*. 2021;9:107476-107492. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3096468>
- [21] Mattila J., Ala-Laurinaho R., Autiosalo J., Salminen P., Tammi K. Using Digital Twin Documents to Control a Smart Factory: Simulation Approach with ROS, Gazebo, and Twinbase. *Machines*. 2022;10(4):225. <https://doi.org/10.3390/machines10040225>
- [22] Costantini A., Di Modica G., Ahouangonou J.C., Duma D.C., Martelli B., Galletti M., Antonacci M., Nehls D., Bellavista P., Delamarre C., Cesini D. IoTwins: Toward Implementation of Distributed Digital Twins in Industry 4.0 Settings. *Computers*. 2022;11(5):67. <https://doi.org/10.3390/computers11050067>
- [23] Zhang Y., Tsang D. Knowledge and Innovation Within Chinese Firms in the Space Sector. *Journal of the Knowledge Economy*. 2023;14(3):2905-2926. <https://doi.org/10.1007/s13132-022-00935-w>
- [24] Ansar A., Flyvbjerg B. How to solve big problems: bespoke versus platform strategies. *Oxford Review of Economic Policy*. 2022;38(2):338-368. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grac009>
- [25] Corrado L., Cropper M., Rao A. Space exploration and economic growth: New issues and horizons. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2023;120(43):e2221341120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2221341120>
- [26] George K.W. The Economic Impacts of the Commercial Space Industry. *Space Policy*. 2019;47:181-186. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.12.003>
- [27] Nam Yu. One-Way Ticket to Mars: The Priv o Mars: The Privatization of the Space Industr atization of the Space Industry and its Environmental Impact on Earth and Beyond. *Northwestern Journal of Law & Social Policy*. 2023;19(1):6. Available at: <https://scholarlycommons.law.northwestern.edu/njls/vol19/iss1/6> (accessed 29.06.2023).
- [28] Leon A.M. Mining for meaning: an examination of the legality of property rights in space resources. *Virginia Law Review*. 2018;104(3):497-547. Available at: <https://virginialawreview.org/articles/mining-meaning-examination-legality-property-rights-space-resources/> (accessed 29.06.2023).



- [29] Malinetskii G.G., Timofeev N.S. To the Methodology of Forecast of Aircraft and Aerospace Development. *Keldysh Institute Preprints*. 2012;(72):1-16. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: PIUYTN
- [30] Petropoulos F. et al. Forecasting: theory and practice. *International Journal of Forecasting*. 2022;38(3):705-871. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.11.001>

*Поступила 29.06.2023; одобрена после рецензирования 16.08.2023; принята к публикации 19.09.2023.
Submitted 26.06.2023; approved after reviewing 16.08.2023; accepted for publication 19.09.2023.*

Об авторах:

Куприяновский Василий Павлович, заместитель директора научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» Российской открытой академии транспорта, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (127994, Российская Федерация, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9); научный сотрудник Высшей инженеринговой школы, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Российская Федерация г. Москва, Каширское шоссе, д. 31), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3493-8729>**, v.kupriyanovsky@rut.digital

Ступин Роман Сергеевич, аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20); руководитель проекта, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141074, Российская Федерация, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 4), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9594-7480>**, rstupin@hse.ru

Сухомлин Владимир Александрович, заведующий лабораторией открытых информационных технологий кафедры информационной безопасности факультета вычислительной математики и кибернетики, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (119991, Российская Федерация, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1), доктор технических наук, профессор, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9468-7138>**, sukhomlin@mail.ru

Утолин Константин Владимирович, руководитель проекта, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141074, Российская Федерация, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 4), **ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2506-0244>**, utolinkv@tsniimash.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the authors:

Vasily P. Kupriyanovsky, Deputy Director of the Research and Training Center for Digital High-Speed Transport Systems of the Russian Open Transport Academy, Russian University of Transport (MIIT) (9 Obraztsova St., build. 9, Moscow 127994, Russian Federation); Research Fellow of the Higher Engineering School, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) (31, Kashirskoe Highway, Moscow 115409, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3493-8729>**, v.kupriyanovsky@rut.digital

Roman S. Stupin, Postgraduate Student, National Research University Higher School of Economics (20 Myasnitskaya St., Moscow 101000, Russian Federation); Project Manager, JSC “Central Research Institute of Mechanical Engineering” (4 Pioneerskaya St., Korolev 141074, Moscow region, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9594-7480>**, rstupin@hse.ru

Vladimir A. Sukhomlin, Head of the Open Information Technologies Lab, Department of Information Security, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (1 Leninskie gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation), Dr. Sci. (Tech.), Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9468-7138>**, sukhomlin@mail.ru

Konstantin V. Utolin, Project Manager, JSC “Central Research Institute of Mechanical Engineering” (4 Pioneerskaya St., Korolev 141074, Moscow region, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2506-0244>**, utolinkv@tsniimash.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

