

Концептуальное проектирование космических систем на основе Lean-принципов

В. Ю. Ключников, д.т.н., с.н.с., klyushnikovvy@tsniimash.ru
ФГУП «ЦНИИ машиностроения», Москва, Российская Федерация

А. А. Романов, д.т.н., профессор, romanov@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Сформулированы основные положения методологии концептуального проектирования космических систем и их составных частей на основе Lean-принципов, в соответствии с которыми необходимая целевая эффективность системы должна обеспечиваться при минимальных ресурсных затратах и приемлемом уровне риска неудачной реализации проекта ее создания.

В понятие концептуального проектирования вкладываются два смысла: концептуальное проектирование как заключительная стадия формирования инновационного научно-технического задела и концептуальное проектирование как начальная стадия создания космической системы, на которой принимаются решения, определяющие ее последующий облик.

Показано, что концепция космической Lean-системы тождественна идее идеальной технической системы в теории решения изобретательских задач. В этой связи введены понятия степени идеальности и критерия идеальности системы, позволяющие оценивать результаты Lean-проектирования.

Обобщены и классифицированы возможные концептуальные решения, принимаемые в процессе Lean-проектирования космических аппаратов, ракет-носителей, средств наземного комплекса управления и космической системы в целом. Рассмотрены основные направления программной реализации методов автоматизированной поддержки концептуального Lean-проектирования.

Основные положения методологии концептуального Lean-проектирования космических систем могут быть использованы при разработке отраслевых нормативно-методических документов, а также при создании и развитии новой научно-производственной системы ракетно-космической отрасли.

Ключевые слова: космическая система, космический аппарат, ракета-носитель, степень идеальности, концептуальное проектирование, Lean-проектирование

Conceptual Design of Space Systems Based on Lean Principles

V. Yu. Klyushnikov, Dr. Sci. (Engineering), Senior Researcher, klyushnikovvy@tsniimash.ru
Central Research Institute for Machine Building (FGUP TSNIIMASH), Korolev, Moscow region, Russian Federation

A. A. Romanov, Dr. Sci. (Engineering), Prof., romanov@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article discusses the main thesis of the methodology of conceptual design of space systems and their components based on Lean principles. Lean principles require providing the necessary target system efficiency with minimum resource costs and an acceptable level of risk.

The conceptual design idea has two aspects: conceptual design as the final stage in the formation of innovative scientific and technical reserve and conceptual design as the initial stage in the creation of a space system at which decisions are made that determine its architecture.

It is shown that the concept of a space Lean system is identical to the idea of an ideal technical system in the theory of solving inventive problems. In this regard, the concepts of the degree of ideality and the ideality criterion of the system are introduced, which allow us to evaluate the results of Lean-design.

Possible conceptual decisions made during the Lean-design of satellites, launch vehicles, ground control complex equipment and the space system as a whole are generalized and classified. The main directions of software implementation of the methods of automated support of conceptual Lean-design are considered.

The main provisions of the methodology of conceptual Lean-design of space systems can be used in the development of industry normative and methodological documents, as well as in the creation and development of a new scientific and production system for the space industry.

Keywords: space system, satellite, launch vehicle, degree of ideality, conceptual design, Lean design

Введение

Широкое распространение результатов космической деятельности и проведение фундаментальных космических исследований при помощи космических аппаратов (КА) сдерживают чрезвычайно высокая себестоимость космической техники и длительный производственный цикл ее создания.

Под Lean production [1] понимают концепцию управления производственным предприятием, основанную на устранении всех видов потерь по самым разным причинам: из-за перепроизводства, из-за ожидания, при ненужной транспортировке, из-за лишних этапов обработки, лишних запасов, ненужных перемещений, выпуска дефектной продукции и т. д. Привлекательность Lean состоит в том, что система на 80 % состоит из организационных мер и только 20 % составляют инвестиции в технологию.

Мысль о реализации принципов Lean production не только на уровне производственных процессов, но и на уровне проектирования (облика) изделий космической техники впервые была высказана в 2014 году профессором Менгу Чо (Технологический институт Кюсю, Япония) и профессором Филиппо Грациани (G.A.U.S.S. Sri, Италия), которые выдвинули концепцию Lean-спутника (Lean Satellite Concept) [2]. К признакам спутника, созданного по технологии Lean Satellite, были отнесены низкая общая стоимость, короткое время поставки, простота, высокая надежность, низкие риски, малая продолжительность миссии, возможность оперативного запуска, небольшие издержки и т. п. Идея Lean-спутника получает все большее распространение в мире. В январе 2018 года в Японии в г. Китакусю прошел очередной, начиная с 2011 года, специализированный международный семинар по Lean спутникам (<https://lean-sat.org/iwls2-2018.html>).

Использование принципов LeanSatellite позволяет [3]:

- снизить время, затрачиваемое на создание перспективных космических систем (КС) и комплексов, от сегодняшних 2–10 лет до **6–9 месяцев**;
- сократить время, необходимое для адаптации КА к ракете-носителю (РН) и вывода на заданную орбиту, запуска и развертывания КС,

от сегодняшних 3–12 месяцев до **нескольких часов с момента получения запроса на развертывание**;

- доставлять информационный продукт конечному потребителю в реальном масштабе времени (непрерывно/секунды);
- снизить стоимость космических информационных услуг.

Поскольку стоимость той или иной космической информационной услуги складывается не только из стоимости спутника, но и из стоимости запуска, управления и услуг операторов, то к реализации принципов Lean необходим системный комплексный подход. Lean-принципы было бы целесообразно обобщить и на другие изделия космической техники, включая и средства выведения (СВ), и объекты наземной космической инфраструктуры (НКИ), прежде всего — наземный комплекс управления (НКУ).

Цель предлагаемой статьи — выявление сущности и разработка принципов концептуального Lean-проектирования космических систем.

1. Общая постановка задачи проектирования космической Lean-системы

Задача проектирования космической Lean-системы может быть формализована на основе понятия идеальной технической системы, введенного Г. С. Альтшуллером в 1956 году в созданной им теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) [4, 5] в связи с общими закономерностями развития технических систем. Основной такой закономерностью является повышение степени идеальности системы в процессе ее эволюции, представляющей собой соотношение между качеством выполнения целевой функции и требующимися для этого ресурсами.

Сущность концептуального Lean-проектирования космической системы заключается в обосновании и взаимном согласовании основных решений, определяющих последующий облик системы, которые бы позволили **обеспечить показатели целевой эффективности не ниже заданных при минимальных ресурсных затратах и приемлемом уровне риска**.

В таком случае под степенью идеальности изделия КС следует понимать отношение обобщенного показателя целевой эффективности применения системы по назначению к значению некоторой обобщенной функции затрат на ее создание и функционирование. И конечная цель концептуального Leap-проектирования будет заключаться в **оптимизации (максимизации) идеальности (степени идеальности) космической системы при приемлемом уровне риска.**

Обобщенный показатель целевой эффективности представляет собой функцию от некоторых частных показателей, характеризующих целевые (потребительские) свойства космической системы: энергомассовое или конструктивное совершенство ракеты-носителя, скорость передачи данных в космической системе связи, точность позиционирования в космической системе навигации, линейное и спектральное разрешения космической системы дистанционного зондирования Земли и т. д.

Обобщенная функция затрат определяется стоимостью создания и эксплуатации системы, затратами времени на ее создание, производство и логистику, массогабаритными характеристиками, энергопотреблением и т. п.

Очевидно, повышение степени идеальности изделия космической техники может происходить как в рамках существующего конструктивного облика, так и в результате радикального изменения конструкции и самого принципа действия изделия.

2. Общие типовые концептуальные решения в процессе

Leap-проектирования составных частей космической системы

В [6] нами была предложена парадигма создания инновационного научно-технического изделия (НТЗ) в ракетно-космической отрасли, в соответствии с которой в понятие концептуального проектирования вкладываются два смысла:

- концептуальное проектирование как заключительная стадия формирования инновационного НТЗ в соответствии с предварительно выявленными направлениями его создания;

- концептуальное проектирование как начальная стадия создания космической системы, на которой принимаются решения, определяющие ее последующий облик, как правило, в условиях неполноты и неопределенности исходных данных.

2.1. Общие принципы концептуального Leap-проектирования космической системы

К концептуальным решениям верхнего уровня в процессе Leap-проектирования следует отнести Leap-спутник и Leap-носитель, а также Leap — наземный комплекс управления.

Leap-спутник

Leap-спутник — это спутник, при разработке которого используют нетрадиционные подходы, допускающие приемлемый уровень риска, с целью снижения стоимости спутника и минимизации сроков его поставки заказчику и запуска [7].

В табл. 1 представлены результаты экспертной оценки относительной значимости характеристик и отличительных особенностей Leap-спутника.

Эффективность целевого применения мало-размерных КА, созданных по технологиям Leap,

Таблица 1. Относительная значимость характеристик и отличительных особенностей Leap-спутника [7]

№	Характеристика/особенность	Вес, %
1	Общая стоимость	20
2	Срок поставки	20
3	Простота	11
4	Допустимость риска	12
5	Меры по снижению риска	5
6	Требования к надежности	10
7	Продолжительность миссии	4
8	Сложность запуска	10
9	Минимизация образования космического мусора	8

может быть радикально повышена на основе объединения КА в орбитальные группировки (кластеры), где спутники решают совместно некоторую общую задачу и воспринимаются потребителями космических услуг как единое целое. Тем самым уменьшается и риск отказа космической системы, поскольку выход из строя одного или даже нескольких КА группировки (кластера) лишь незначительно снизит эффективность ее целевого функционирования. Однако при этом возрастают затраты ресурсов на создание и развертывание кластера.

Lean-носитель

Концепция Lean-носителя соответствует идее так называемого «большого тупого (глупого) носителя» (Big Dumb Booster — BDB) [8]. Основными признаками Big Dumb Booster (BDB) являются максимально простая конструкция, низкая стоимость запуска КА и повышенный риск отказа носителя в полете, признаваемый допустимым.

Уменьшение стоимости запуска достигается за счет упрощения технологий: использование дешевых конструкционных материалов, низко напряженных ракетных двигателей, вытеснительной системы подачи ракетного топлива, а также простых традиционных технологий сборки.

В [9] сформулированы основные признаки Lean-носителя:

- низкая общая стоимость (стоимость пуска) РН в сочетании с низкой стоимостью выведения единицы массы (1 кг) полезного груза на орбиту;
- короткий производственный цикл в сочетании с высокой оперативностью пуска;
- максимально высокое совершенство конструкции.

К дополнительным признакам Lean-носителя могут быть отнесены использование экологически чистого ракетного топлива и высокая надежность.

Следует, однако, заметить, что концепция BDB противоречит концепции Lean-спутника и тенденциям создания кластерных группировок из малых КА: BDB-носитель не поддается масштабированию и **может оказаться переразмеренным для развертывания и особенно для восполнения и наращивания кластеров малых КА, созданных по технологиям Lean.**

Поэтому в последнее десятилетие стремятся создать легкие и сверхлегкие носители с приемлемыми удельными экономическими показателями. В настоящее время в мире насчитывается несколько десятков проектов микроракет, рассчитанных на выведение на низкую околоземную орбиту грузов до 100 кг. Летные испытания многих из них намечены на 2019–2020 годы.

В числе перспективных технологий, используемых в перспективных проектах РН сверхлегкого класса, необходимо назвать [10]:

- модульную конструкцию на основе унифицированных модулей, в том числе многоразовых, для масштабирования возможностей выведения на орбиту полезных нагрузок различной массы;
- воздушный (авиационный или аэростатический) старт;
- топливные баки, переходные отсеки, головные обтекатели из композитных материалов; широкое использование «интеллектуальных» материалов в силовых элементах конструкции и в конструкции двигательной установки;
- двигательные установки первых ступеней не менее чем из трех–четырех ЖРД (как традиционных схем, так и клиновоздушных) на нетоксичных компонентах ракетного топлива с широким диапазоном регулирования тяги с вытеснительной или электротурбонасосной системой подачи топлива в камеры сгорания;
- широкое применение аддитивных технологий для изготовления сложных элементов конструкции, включая ракетные двигатели, и др.

Lean-НКУ

Сама концепция космической Lean-системы подразумевает в числе прочего и повышение степени идеальности структуры наземного комплекса управления КА.

Узкое место контура управления полетом — связь между наземным и бортовым комплексами управления (НКУ и БКУ), которую в традиционном исполнении обеспечивает сеть наземных передаточных станций. Главное требование к системе, обеспечивающей связь между наземным и бортовым комплексами управления, — обеспечение

глобальности и непрерывности передачи командно-программной, целевой, служебной и телеметрической информации. Классический способ управления полетом спутников заключается в использовании сети командно-измерительных пунктов (КИП) наземного и морского базирования, развернутых на большой территории для обеспечения максимально возможной длительности сеансов связи с КА. Естественно, такой способ, во-первых, очень дорог, а во-вторых — практически неприменим для управления многоспутниковыми группировками.

Кроме того, значительный недостаток существующих сетей приемо-передающих станций — ограниченные зоны радиовидимости КИП, что не позволяет обеспечить проведение сеансов связи с КА в любое требуемое время. При этом чем ниже орбита КА, тем короче продолжительность сеансов связи с одним КИП. Препятствиями для развертывания сети КИП с глобальным радиопокрытием являются неприемлемо высокие финансовые затраты.

АО «Российские космические системы» в целях упрощения и удешевления процесса управления полетом МКА было предложено использовать низкоорбитальные системы спутниковой связи (ССС). В этом случае в принципе можно обойтись одним КИП [11].

2.2. Концептуальное Lean-проектирование как процесс получения принципиально новых технических решений

Проблема концептуального проектирования на заключительной стадии формирования инновационного НТЗ, как правило, состоит в получении принципиально новых технических решений в соответствии с некоторыми предварительно выявленными требованиями и направлениями. К основному требованию к техническим решениям в контексте концептуального Lean-проектирования следует отнести повышение степени идеальности составных частей космической системы с акцентом на минимизацию потребных ресурсов. Выявление направлений формирования инновационного НТЗ подробно рассмотрено в [6].

Указанные требования и направления по сути представляют собой исходные данные (требования) к новому техническому решению, итерационно уточняемые по мере более точного формули-

рования потребностей потенциальных заказчиков и появления новых технологических возможностей.

Все известные технологии концептуального проектирования новых технических решений основаны на использовании систематизированных знаний о физических эффектах и явлениях. К наиболее известным таким технологиям относятся теория решения изобретательских задач и энергоинформационный метод синтеза новых технических решений.

Теория решения изобретательских задач [12] и энергоинформационный метод синтеза новых технических решений (энергоинформационная модель цепей — ЭИМЦ) [13] ориентированы на поддержку концептуального проектирования любых технических устройств, независимо от области их применения. Неотъемлемым элементом таких систем является наличие баз знаний, включающих модели поведения систем на основе уравнений математической физики. Физические эффекты в базах знаний этих систем имеют вербальное описание как причинно-следственные связи, могут сопровождаться аналитической формулой связи входа с выходом. Результатом работы этих систем является синтез нескольких альтернативных физических принципов действия технического устройства в виде цепочек последовательных преобразований от входа к выходу.

Энергоинформационный метод синтеза новых технических решений опирается на энергоинформационную модель цепей (ЭИМЦ), аппарат параметрических структурных схем, базу данных паспортов физико-технических эффектов (ФТЭ) и базу морфологических матриц конструктивных реализаций ФТЭ. ЭИМЦ позволяет описывать процессы и явления разной физической природы (ФП), протекающие в технических системах, с помощью единого математического аппарата [13].

Метод ориентирован преимущественно на концептуальное проектирование систем управления. Концептуальное проектирование нового технического устройства в рамках энергоинформационного метода [13] сводится к выполнению трех этапов, достаточно трудоемких по объему обработки данных (рис. 1).

Система, реализующая ЭИМЦ, автоматически генерирует варианты физического принципа дей-

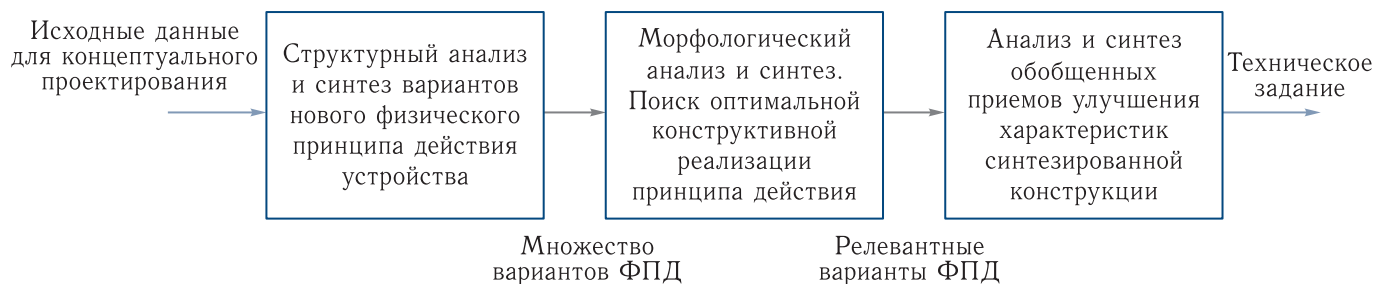


Рис. 1. Этапы концептуального проектирования технического устройства в рамках энергоинформационного метода синтеза новых технических решений

ствия (ФПД) системы, удовлетворяющей предъявляемым требованиям.

Результатом структурного синтеза является последовательное, параллельное или смешанное соединение ФТЭ и параметров цепей разной физической природы. Структурных схем соединения ФТЭ по результатам синтеза может быть множество. Из этого множества выбирают схему, оптимальную по критерию идеальности проектно-конструкторского решения.

К сожалению, имеются трудности при разработке математических моделей, описывающих синтезированные варианты физического принципа действия и оценки их эксплуатационных характеристик, что не позволяет проводить количественное сравнение этих вариантов. Описание физических эффектов не сопровождается конструктивной проработкой технических реализаций.

2.3. Концептуальное Lean-проектирование как начальная стадия создания космической системы

Под концептуальным проектированием технических систем понимают начальную стадию проектирования, на которой определяют принцип действия системы, ее обобщенную функциональную структуру, а также при необходимости исследуют возможности реализации полученного концептуального решения.

Концептуальные решения в процессе проектирования космической системы образуют иерархическую структуру.

Как показывает анализ [14], разделить принципы повышения целевой эффективности примене-

ния космической системы по назначению и принципы минимизации затрат на ее создание и функционирование, как правило, не представляется возможным. Реализация указанных принципов или одновременно решает эти две задачи, или же, наоборот, повышая (снижая) целевую эффективность, повышает (уменьшает) затраты.

К Lean-принципам концептуального проектирования космических систем на нижних уровнях структурной иерархии следует отнести:

- использование неспециализированной элементной базы общепромышленного назначения;
- широкое применение принципов отказоустойчивости на основе различных видов избыточности (прежде всего функциональной, информационной и временной), включая самоустранение повреждений.

Использование неспециализированной элементной базы

Начиная с 1994 года в военной и космической технике все шире используются так называемые COTS-технологии (Commercial Off-The-Shelf — «готовые к использованию»), т. е. коммерческие технологии, готовые к использованию в самых различных предложениях. COTS-технологии в критических приложениях (атомной, военной и космической технике) начали использоваться после того, как министр обороны США Вильям Перри в своем меморандуме, известном как Perry Memo («Меморандум Перри»), выступил с COTS-инициативой. Основная идея инициативы Перри заключалась в открытии рынка интеграции военных систем для использования в них стандартных компонентов с так называемого «массового» рынка.

В понятие COTS-компонентов включают микросхемы и другие аппаратные компоненты, технологии, а также программное обеспечение.

Концепция COTS основана на следующих концептуальных положениях [15]:

- управление рисками: риск не может быть нулевым даже в случае принятия самых строгих мер;
- контроль производственного процесса повышает надежность компонентов;
- высокая серийность гарантирует достаточную надежность.

Разработчики методологии COTS сопроводили свою инициативу «подзаконными» определениями, за счет которых они включили в понятие COTS-продуктов не только то, что «может быть куплено, арендовано или лицензировано на массовом рынке», но и то, что может быть получено при модернизации COTS-продуктов, подпадающих под приведенное определение [16]. Так, например, полупроводниковые COTS-компоненты могут тестироваться на соответствие требованиям стандарта MIL-STD-883 в целях проведения отбраковочных испытаний и в соответствии с результатами тестирования делиться на три класса:

- класс А — компоненты повышенной надежности, предназначенные для работы в жестких режимах внешних воздействий;
- класс В — компоненты для работы в менее жестких условиях, когда главным требованием является стабильность параметров в течение длительного времени;
- класс С — компоненты для применений, когда на первое место ставится минимальная стоимость.

Резервирование электронных компонент класса Industrial позволяет для бортовых компьютеров аэрокосмических систем получать решения, удовлетворяющие заказчика с точки зрения надежности, радиационной стойкости и являющиеся более экономичными, чем решения на основе компонент класса Military или Space [17].

Электронные компоненты Industrial на порядок и более дешевле, чем компоненты Military (Space), а их мажоритарное выполнение позволяет обеспечить тот же уровень безопасности и надежности, что дает возможность снизить стоимость бортового компьютера в 1,5–2 раза даже с учетом умень-

шения ресурса из-за более низкой радиационной стойкости. Критичность по показателю радиационной стойкости может быть уменьшена при сеансовом режиме работы бортовой аппаратуры.

В целом COTS-подход быстро развивается, распространяясь в системе координат «номенклатура коммерческих продуктов — номенклатура критических приложений», что отражает тенденцию перехода в критических приложениях от оптимизации по критерию «целевая (функциональная) эффективность — надежность (безопасность)» к оптимизации по критерию «целевая (функциональная) эффективность — надежность (безопасность) — стоимость». Любой перенос коммерческих продуктов должен сопровождаться нормированием и оценкой качества/надежности получаемых решений.

Устойчивость к отказам как дополнение к использованию COTS-технологий

Снизить риск отказов при создании Lean-системы можно на основе обеспечения устойчивости технических систем к отказам.

Отказоустойчивые аппаратные и программные средства должны быть способны продолжать выполнение запланированных операций (возможно, с понижением целевой эффективности) при отказе их компонентов [18]. Отказоустойчивость может быть достигнута на основе сочетания высокой (возможно, даже избыточной) целевой эффективности и различных видов резервирования (табл. 2).

Из всех перечисленных в табл. 2 видов резервирования наибольший интерес в рамках концепции Lean-проектирования представляет функциональное резервирование, поскольку позволяет минимизировать дополнительные затраты массы, энергетики и других ресурсов на реализацию такого рода избыточности.

3. Программная реализация методов автоматизированной поддержки концептуального проектирования

Программная реализация методов автоматизированной поддержки концептуального Lean-проектирования для случаев получения новых техниче-

Т а б л и ц а 2. Виды резервирования в космической технике

Вид резервирования	Определение	Примеры использования в космической технике
Структурное	Применение резервных элементов структуры изделия	— Резервирование на основе мажоритарной логики; — резервирование на основе дублирования подсистем с детектором ошибок; — резервирование на основе постепенной деградации вычислительной системы
Функциональное	Использование способности элементов, агрегатов и систем изделия выполнять дополнительные функции, а также возможность выполнять заданную функцию дополнительными средствами	Интегрированная инерциально-астропутниковая (ГЛОНАСС + GPS) система навигации и ориентации для космических средств выведения [19]. Функционально избыточная система управления движением космического аппарата [20]
Временное	Использование резервного времени для выполнения заданной функции. При этом допускается перерыв функционирования системы или устройства из-за отказа элемента	Использование резервов времени на: — повторение операции бортовой системы (при сбое); — замену операции одной системы набором операций других бортовых систем
Информационное	Использование в качестве резерва избыточной резервной информации	Помехоустойчивое кодирование передаваемой информации

ских решений и начальной стадии создания космической системы различна. В первом случае речь идет о программных средствах автоматизации инновационных процессов (CAI-системах¹). Во втором — о пакетах прикладных программ модельно-ориентированного проектирования изделий космической техники, успешно работающих в центрах параллельного инжиниринга зарубежных космических агентств.

Автоматизация получения новых технических решений при концептуальном Lean-проектировании

К настоящему времени в целях автоматизации процессов концептуального проектирования разработано множество программных продуктов (CAI-систем), которые можно условно разделить на две группы [21]:

- автоматизированные системы, созданные на основе теории решения изобретательских задач (ТРИЗ);

¹CAI — Computer Aided Invention — поиск инновационных решений с помощью компьютера.

- автоматизированные системы поддержки инженерного творчества (АСПИТ) и поискового конструирования.

Наиболее известные пакеты программ представлены в табл. 3.

CAI-системы позволяют систематизировать и в десятки раз расширить объем знаний, активно используемых специалистами.

К проблемным вопросам таких систем относят неавтоматизированное пополнение баз знаний и отсутствие интеграции процессов функционального (морфологического) синтеза и синтеза на основе физического принципа действия технической системы.

Автоматизация концептуального Lean-проектирования

Основными инструментами концептуального Lean-проектирования являются параллельный инжиниринг и модельно-ориентированное проектирование (МОП).

Цифровая модель космической системы в МОП является единой для разработчиков — специалистов в различных областях знаний (инженеров-разработчиков систем управления, физиков,

Таблица 3. Средства автоматизированной поддержки концептуального проектирования [22]

Название, разработчик	Назначение	Достоинства	Недостатки
«Интеллект», М. Ф. Зарипов	Описание процессов и явлений, протекающих в технических системах (ТС) различной физической природы. Синтез технических решений. Просмотр и обновление информации в базе данных. Генерация вариантов физического принципа действия (ФПД) системы. Выбор конструктивных реализаций всех элементов ФПД. Реализация энергоинформационной модели цепей (ЭИМЦ) и метода структурных параметрических схем	Высокая степень формализации и унификации информации. Использование высокоэффективных алгоритмов для моделирования работы ТС. Многоаспектное задание на синтез. Использование графической информации для повышения наглядности	Исключение из рассмотрения объекта воздействия. Наличие ограничения на линейную зависимость между величинами в ЭИМЦ. Громоздкий аппарат причинно-следственных связей. Сложность формирования задания на синтез и сложность интерпретации результатов
«Эдисон», «Новатор», В. Н. Глазунов	Создание концептуально новых устройств и технологий. Задание на синтез новых решений с учетом целевой функции и необходимого уровня сложности проектируемой системы. Синтез нескольких альтернативных принципов действия. Описание синтезированных принципов представляется в виде модели, содержащей количественные характеристики принципа действия, текстовое и графическое описание. База знаний «Эдисона» содержит текстовые, графические и математические описания, свыше 600 различных физических и химических эффектов	Рассмотрение неоднородных условий реализации физических эффектов (ФЭ). Учет объекта воздействия при описании ФЭ. Процедура проверки реализуемости структур ФПД. Увеличение количества реализуемых структур ФПД за счет использования логических правил	Неоднородность массива ФЭ и структур ФПД из-за введения логических правил как эффектов. Возможны некорректные варианты стыковки по объекту. Неоднозначности при описании эффектов. Нарушение унификации при описании ФЭ. Модель описания ФЭ позволяет строить только линейные структуры ФПД. Искусственные конструкции языка описания эффектов резко снижают наглядность представления информации
TriSolver, TriSolver Consulting (Германия)	Концептуальная разработка новой техники. Обучение ТРИЗ. Комплексный поиск новых решений по идентификации отказов и устранению неисправностей новых и существующих систем. Базируется на 40 изобретательских принципах ТРИЗ, включает 12 инновационных принципов, поддерживает матрицу противоречий, содержит 76 типовых решений ТРИЗ	Большая база физических, химических, биологических эффектов и примеры их реализации. Возможность функционального и причинно-следственного анализа ТС. Прогноз развития ТС. Отображение информации в наглядной графической форме. Выявление формальных противоречий. Семантическая обработка текстов на естественном языке	Синтез большого числа однотипных и нереализуемых решений. Пополнение информационного фонда ТРИЗ только за счет анализа авторских свидетельств и патентов без использования результатов исследований, не вошедших в них. Сложность интерпретации некоторых конструктивных схем

Т а б л и ц а 3. Окончание

Название, разработчик	Назначение	Достоинства	Недостатки
«САПФИТ» (Система автоматизированного поиска физического принципа действия изделий и технологий), кафедра САПР и ПК ВолгГТУ	Синтез всех возможных ФПД на основе технического задания. Анализ ФПД на предмет совместимости ФЭ в цепочках. Разработка принципиальной схемы будущей системы на основе полученного принципа действия ТС. Основан на использовании структурированной физической информации в форме физических эффектов для синтеза ФПД проектируемой системы	Многоаспектное задание на поиск. Сокращено множество физически нереализуемых решений. Объект учитывается в структуре ФЭ. База знаний содержит подробное описание ФЭ	Недостаточно реализован синтез сетевых структур ФПД. Недостаточно полное задание на синтез. Ряд проблем с использованием количественных описаний при синтезе. Недостаточно проработанный механизм проверки реализуемости синтезированных решений
Goldfire Innovator, IHS (Великобритания)	Функциональный анализ технических систем и технологических процессов. Причинно-следственный анализ и анализ возможных дефектов. Компьютерная поддержка исследовательской деятельности на основе базы знаний, обновляемой при обработке 17 млн патентов ведущих патентных офисов (США, Европы, Японии и др.), 9 тыс. научных эффектов и доступа к более чем 3 тыс. научно-технических баз знаний в Интернете. Межязыковая обработка запросов	Повышение качества получаемых решений. Оперативный анализ трендов развития технологий. Сокращение сроков получения новых технических решений и разработки изделий. Повышение надежности и снижение стоимости изделий и технологических процессов. Эффективное использование собственных знаний и «know-how» компаний	Перекося в область анализа при практически полном отсутствии синтеза

математиков, проектировщиков электрических, механических, гидравлических систем и др.), что обеспечивает прозрачность разработки и, как следствие, соблюдение одних и тех же требований всей кооперацией разработчиков.

Модельно-ориентированное проектирование космических систем в настоящее время успешно используется в так называемых центрах параллельного инжиниринга (CDF-центрах¹ [23]) в космических агентствах NASA, ЕКА, JAXA, а также в исследовательских центрах при университетах.

CDF — это интегрированная проектная среда, используемая для ускоренной реализации всех кос-

мических программ и проектов космических миссий на этапах разработки — от предварительных системных концептуальных исследований до начала рабочего проектирования (рис. 2). При этом широко используются методы мозгового штурма и знания экспертов.

Обобщенная модель процесса концептуального параллельного Leap-проектирования подчеркивает тот факт, что характеристики составных частей космической системы должны быть взаимно увязаны, поскольку изменение конструкции или характеристик любого элемента оказывает влияние на другие компоненты космической системы и на систему в целом. Комплексная оценка последствий принимаемых проектно-конструкторских решений и их взаимная увязка на этапе концептуального

¹CDF — Concurrent Design Facility — параллельное проектирование стратегических инженерных решений.

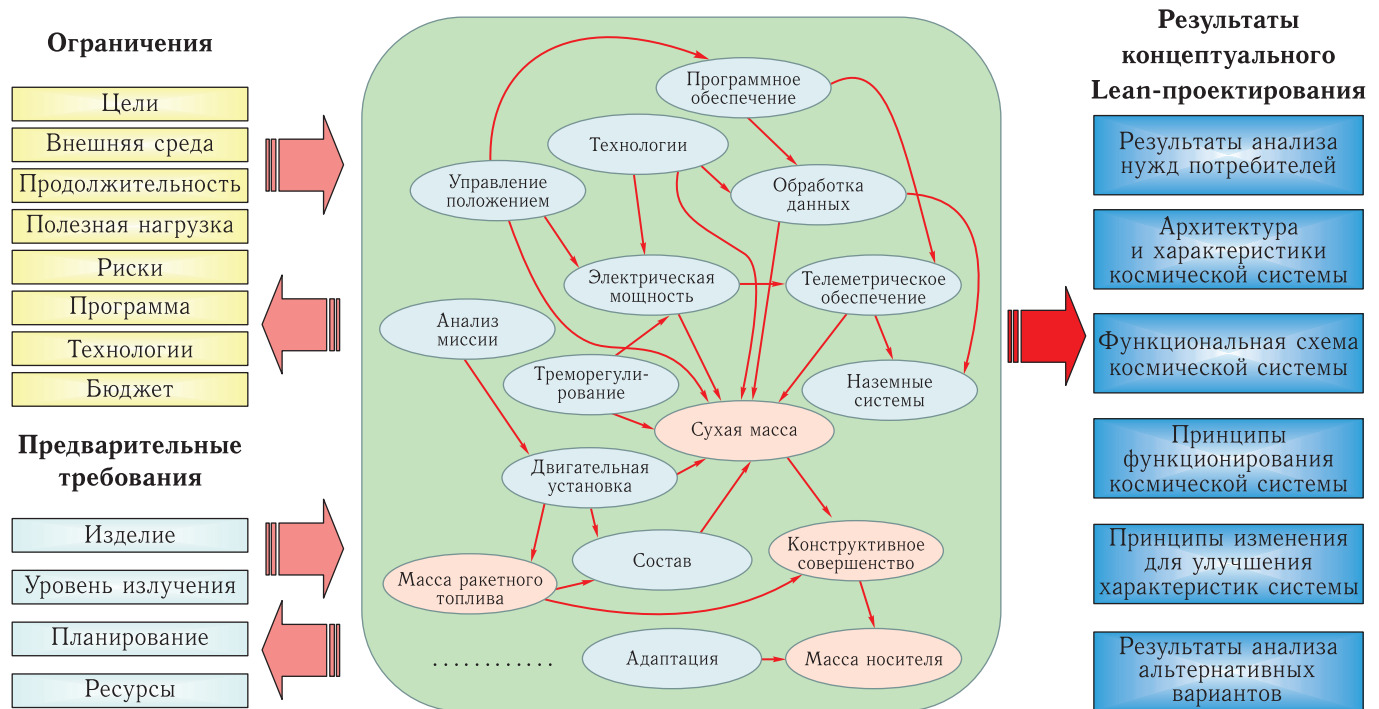


Рис. 2. Обобщенная модель процесса концептуального параллельного Lean-проектирования космической системы

Lean-проектирования космической системы позволяет **оптимизировать конструкцию и целевую эффективность космической системы с тем, чтобы уменьшить необходимые ресурсные и временные затраты при приемлемом риске.**

Среди наиболее известных и широко применяемых в практике параллельного инжиниринга космических систем следует выделить три основных программных продукта, которые могут быть использованы для концептуального Lean-проектирования: STK (System Tool Kit, изначально — Satellite Tool Kit), GMAT (General Mission Analysis Tool) и FreeFlyer. Кроме того, для моделирования КС достаточно часто используются и ПКИМ общего целевого назначения, такие, например, как Simulink и Anylogic [24].

В табл. 4 дана краткая характеристика упомянутых выше основных программных продуктов.

В настоящее время STK является наиболее функциональным и продвинутым программным продуктом в части реализации современных технологий компьютерного моделирования и модельно-ориентированного проектирования космических систем.

Однако в существующем виде программные средства параллельного инжиниринга не могут быть использованы в целях концептуального Lean-проектирования в отечественной ракетно-космической отрасли по следующим причинам:

- ограничительные санкции, не позволяющие официально приобретать продукты уровня STK и получать соответствующую программную и методическую поддержку в процессе их эксплуатации;
- отсутствие блока оптимизации характеристик создаваемого концептуального проекта по критерию идеальности (при ограничениях на допустимый риск), составляющего сущность Lean-проектирования.

С целью снижения зависимости от зарубежных разработок и адаптации программного продукта к задачам Lean-проектирования было бы целесообразно создать ряд систем автоматизированной поддержки концептуального Lean-проектирования на базе единой среды управления инженерным программным обеспечением и интегрированной инженерной программной платформы

Таблица 4. Основные программные продукты, применяемые в практике параллельного инжиниринга космических систем

Программный комплекс, разработчик	Функциональные возможности	Интерфейс
STK (System Tool Kit), Analytical Graphics Inc. (США)	Выбор и анализ основных характеристик КС, оценка потребных ресурсов и стоимости. Проектирование и анализ миссий к Луне и в дальний космос. Моделирование бортовых навигационных измерений, в том числе с применением GPS. Баллистическое проектирование и моделирование активных орбитальных маневров КА с учетом действующих возмущений. Моделирование и планирование функционирования целевой аппаратуры с учетом возмущений и помех. Анализ безопасности орбитального полета. Выбор и анализ окон запуска. Моделирование топологии размещения и диаграмм направленности бортовых антенн	Стандартный графический с настраиваемыми панелями инструментов, закрепляемыми окнами и 3D-видовыми экранами
GMAT (General Mission Analysis Tool), группа космических корпораций при участии NASA	Анализ, оптимизация и моделирование траекторий движения КА. Программа находится в открытом доступе (http://gmtcentral.org/displayGWGMAT) и с открытыми исходными кодами	Стандартный графический интерфейс с настраиваемыми панелями инструментов, закрепляемыми окнами и 3D-видовыми экранами
FreeFlyer, AI Solution (США)	Моделирование функционирования служебной и целевой аппаратуры КА различного назначения. Решение задач динамики полета КА, включая моделирование различных маневров КА. Планирование и анализ целевого функционирования КА различного назначения. Решение задач, связанных с предотвращением орбитальных столкновений. Оптимизация и анализ космических миссий	2D- и 3D-визуализация моделируемых процессов. Возможность реализации соединения с внешними серверами и базами данных. API-интерфейс для доступа к ПК FreeFlyer в других пользовательских приложениях, написанных на языках C, C++, Java, Matlab и Python

(проект «Гербарий», АО «Приборостроительная корпорация» государственной корпорации «Ростех») [25].

Заключение

Обобщенный алгоритм решения задач концептуального Lean-проектирования космической системы, отражающий оба аспекта концептуального проектирования [6] как процесса синтеза новых технических решений (создания инновационного НТЗ) и как начальной стадии общего процес-

са проектирования, может быть представлен в виде схемы на рис. 3.

В левой части схемы алгоритма показана обобщенная последовательность создания инновационного научно-технического задела — получение принципиально новых технических решений.

Полученные таким образом элементы инновационного НТЗ можно интерпретировать как своего рода «кирпичики» для концептуального Lean-проектирования на начальной стадии создания космической системы (правая часть рис. 3).

Концептуальное Lean-проектирование космической системы представляет собой циклический

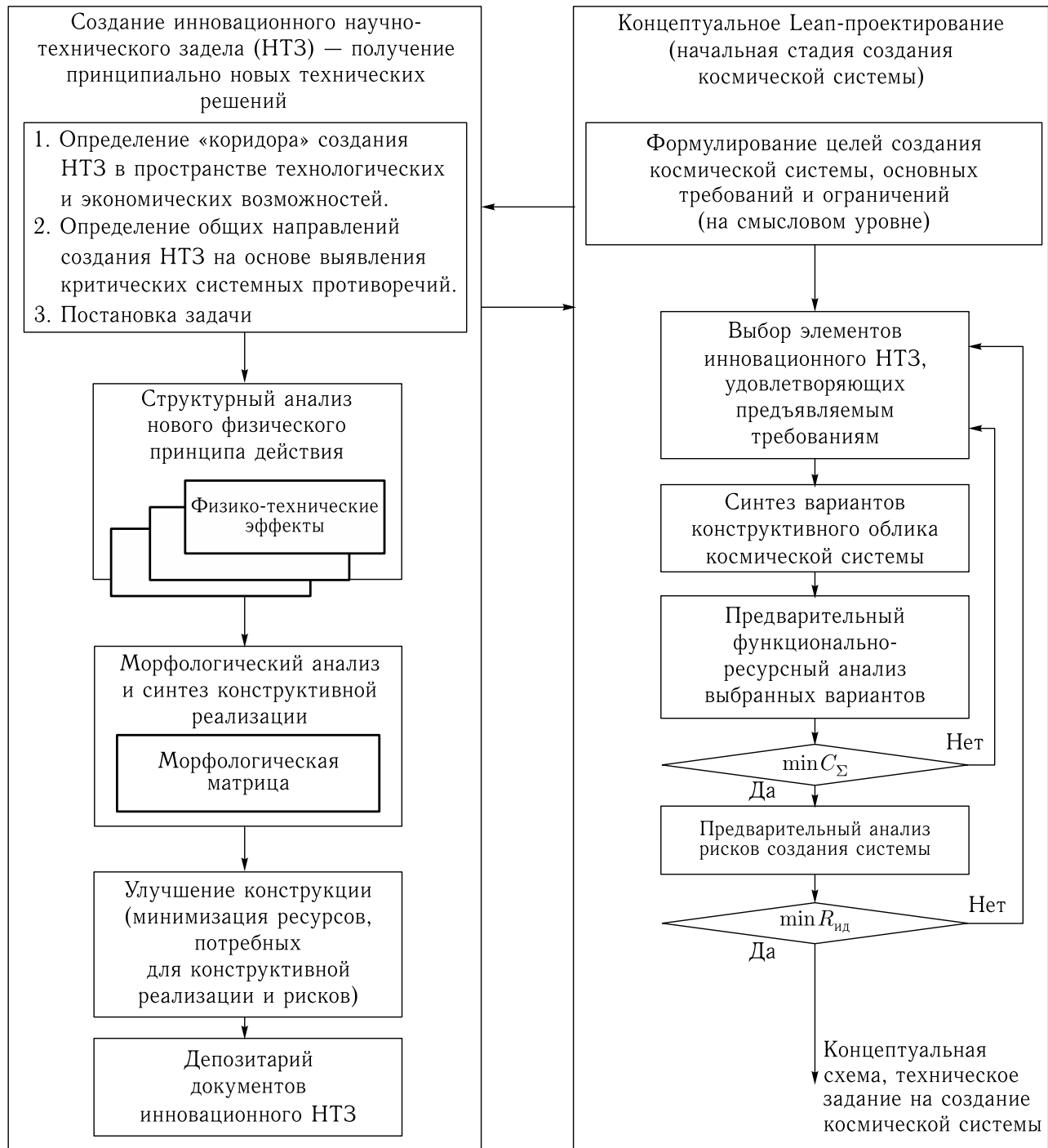


Рис. 3. Обобщенный алгоритм концептуального Lean-проектирования

процесс, состоящий из нескольких итераций, в котором на основе анализа нужд потребителей, наработанного НТЗ, технологических возможностей, требуемых ресурсных затрат и результатов анализа рисков определяются принцип действия, архитек-

тура, состав, функциональная схема, особенности конструкции, используемые материалы, оптимальное соотношение параметров составных частей системы и другие существенные признаки для ряда альтернативных вариантов космической системы.

В результате таких итераций выявляют принципы, указывающие, что и как необходимо изменить (материалы, конструкцию, режимы работы и взаимодействие космической системы или ее составных частей с окружающей средой и т. п.), чтобы достичь максимальной идеальности космической системы.

Основные положения разработанной методологии концептуального Lean-проектирования космических систем целесообразно отразить в нормативно-методических документах отрасли. Предложенная методология может быть положена в основу новой научно-производственной системы ракетно-космической отрасли. Реализация разработанных предложений позволит существенно повысить конкурентоспособность отечественной ракетно-космической техники.

Список литературы

1. Левинсон У., Рерик Р. Бережливое производство. Синергетический подход к сокращению потерь. М.: Изд-во «Центр Оргпром», 2007. 270 с.
2. Graziani F., Cho M. Lean Satellite Concept // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, Mission Lessons, SSC16-P2-09. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3509&context=smallsat> (Дата обращения: 25.02.2017).
3. Романов А.А. Перспективы применения группировок наноспутников при мониторинге чрезвычайных ситуаций // Космонавтика и ракетостроение, 2018, № 5(104). С. 112–118.
4. Сибиряков В.Г., Лекомцева Е.Б. ЛИН по-русски — это ТРИЗ. <http://www.metodolog.ru/01123/01123.html> (Дата обращения: 13.01.2017).
5. Альтишуллер Г.С., Злотин Б.Л., Филатов В.И., Зусман А.В. Поиск новых идей: от озарения к технологии. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1989. 381 с.
6. Ключников В.Ю., Романов А.А., Тюлин А.Е. Методология создания инновационного научно-технического задела в ракетно-космической отрасли // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 2. С. 53–64.
7. Mengui Cho and Hirokazu Masui. Best practices for successful lean satellite projects // 7th Nano-satellite Symposium, Kitakyushu, Japan, 2018. http://uniseconglobal.org/pdf/uniglo4/day1/05_cho.pdf (Дата обращения: 16.02.2019).
8. Schnitt A. Minimum Cost Design for Space Operations. Foyle Publishing, 1998. 98 p.
9. Ключников В.Ю. Lean-носитель — основа системы транспортного обеспечения начального этапа индустриализации космоса // Воздушно-космическая сфера, 2018, № 3(96). С. 38–51.
10. The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2017. Federal Aviation Administration. January 2017. 239 p.
11. Лиманская Т.В., Сергеев А.С. Однопунктное управление группировкой малоразмерных космических аппаратов // Успехи современной радиоэлектроники, 2013, № 1. С. 78–82.
12. Орлов М.А. Основы классической ТРИЗ. Практическое руководство для изобретательного мышления. М.: СОЛОН-ПРЕСС. 2006. 432 с.
13. Зарипов М.Ф., Зайнуллин Н.Р., Петрова И.Ю. Энергоинформационный метод научно-технического творчества. М.: ВНИИПИ, 1988. 124 с.
14. Ключников В.Ю., Кузнецов И.И., Медведев А.А., Осадченко А.С. Концепция космической Lean-системы // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2018, № 3. С. 65–75.
15. Friedlander D. COTS EEE parts in space applications: evolution overview. https://www.linkedin.com/in/danfriedlander-63620092?trk=nav_responsive_tab_profile (Дата обращения: 11.12.2018).
16. Кольский Н. Инициатива COTS: «коробочный»? «с полки»? // Современная электроника, 2011, № 7. С. 16–21.
17. Использование COTS-технологий в космосе. <https://habr.com/post/403217/> (Дата обращения: 15.02.2019).
18. Dubrova E. Fault-Tolerant Design. Springer, 2013. 147 p.
19. Белов Ю.В., Шиханов С.В. Интегрированная система управления космического аппарата дистанционного зондирования земли на основе многофункционального использования бортовой аппаратуры // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2012, № 4(35). С. 38–43.
20. Мельников В.Н. Управление ориентацией космического аппарата (обзор). М., 2011. 49 с.

21. *Зарипова В.М., Петрова И.Ю., Цырульников Е.С.* Классификация автоматизированных систем поддержки инновационных процессов на предприятии (COMPUTER AIDED INNOVATION — CAI) // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2012, № 2. С. 26–35.
22. *Кобликов И.А., Фоменков С.А., Коробкин Д.М.* Автоматизированные системы поддержки этапа концептуального проектирования // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, г. Вологда, 25 ноября 2015 г.: в 3 ч. Ч. 1. Вологда: ООО «Маркер», 2015. С. 30–33.
23. Space engineering. Engineering design model data exchange (CDF). ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands. 31 p.
24. *Балухто А.Н., Твердохлебова Е.М.* Аналитический обзор текущего состояния и перспектив развития в области технологий и программных средств имитационного моделирования космических систем // Космонавтика и ракетостроение. 2019. № 2(107). С. 118–133.
25. Проект «Гербарий». <http://www.tflex.ru/about/publications/detail/index.php?ID=3846> (Дата обращения: 05.06.2019).