

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 629.78

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИХ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Д. А. Бондаренко, В. Я. Геча, В. В. Каверин,  
С. Ю. Маринин, А. М. Сидоров, А. А. Ходов

*Рассмотрены предпосылки создания отечественной орбитальной группировки космических аппаратов с возможностью их обслуживания. Проведен анализ действующих орбитальных группировок и возможности применения существующего задела по разработке составных частей, предложен состав и структура взаимодействия перспективной группировки космических аппаратов с учетом пилотируемого сегмента орбитальной станции. Рассмотрены цели, задачи и состав космического и наземного сегмента. Описан вариант стандартизации и унификации группировки малых космических аппаратов, включающий описание блочных космических аппаратов, орбитальной станции для ремонта и обслуживания, транспортно-доставочного модуля, станции хранения и ожидания и заправочно-зарядную станцию.*

*Ключевые слова:* орбитальная группировка, космический аппарат, космическая система, техническое обслуживание, ремонт.

### Введение

Наступило время, когда использования одноразовых, космических аппаратов (КА) становится нецелесообразным. Создание и запуск подобных аппаратов становится экономически невыгодным, а ограниченный срок их службы приводит к засорению околоземного пространства и ограничению реализации возможных целевых задач.

В настоящее время наблюдается тенденция перехода от управления каждым отдельным спутником к управлению орбитальными группировками космических аппаратов (ОГ КА).

Следует отметить, что работы по элементам описанной перспективной орбитальной группировки были начаты еще при СССР и частично продолжены в Новой России.

Одним из ключевых направлений современной мировой космонавтики является разработка космических систем различного назначения, состоящих из большого количества действующих космических аппаратов с возможностью ее пополнения путем замещения одного КА, утратившего функциональность, на другой работоспособный КА или перевод на ограниченное функционирование.

На сегодняшний день начались определенные этапы в разработке новых подходов формирования ОГ КА, меняющих принципиальное представление о жизненном цикле КА и включающих в себя новые подходы в функционировании, ремонте и замене узлов, а не самих аппаратов.

### 1. Жизненный цикл изделий космической техники

Жизненный цикл изделия – это совокупность явлений и процессов, повторяющихся с периодичностью, определяемой временем существования ти-

повой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации [1]. Жизненный цикл изделия включает в себя следующие стадии [2]:

- создание научно-технического задела;
- формирование концепции образца техники;
- разработка;
- производство;
- эксплуатация;
- капитальный ремонт (при необходимости);
- утилизация.

Рассмотренные подходы к описанию жизненного цикла изделия базируются на общей широкой методологии управления проектами. В то же время для космического проекта, как самостоятельной категории, разработана специальная методология и предложено несколько специфических вариантов жизненного цикла [3].

Наиболее полно жизненный цикл космического проекта рассматривается в рамках методик управления космическими проектами [4 – 6], но остановимся на технической составляющей при формировании группировки КА.

Общепринятого деления жизненного цикла на фазы или стадии не сформировалось, но существуют различные подходы:

- Министерство обороны США выделяет четыре фазы: исследования и разработки, инвестиций, эксплуатации и обслуживания, утилизации [7];
- Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) США разделяет жизненный цикл на семь фаз: передовых исследований (Pre-phase A), определения технического облика системы и необходимых тех-

нологий (Phase A), разработки предварительной конструкторской документации и макетов (Phase B), разработки финальной конструкторской документации и подготовки к производству (Phase C), производства, сборки, тестирования (Phase D), эксплуатации (Phase E), завершения (Phase F) [7];

– Европейское космическое агентство (ESA) выделяет следующие циклы: анализа миссии и определения потребностей, оценки осуществимости, предварительного описания, детального описания, подготовки и производства, использования, утилизации [5];

– Канадское космическое агентство выделяет следующие циклы: формулирования потребностей и концептуальных исследований, определения концепции и предварительного проектирования, детального проектирования и функционального тестирования, изготовления, эксплуатации [5].

В отечественной практике жизненный цикл принято укрупненно разделять на фазы [7]:

– аванпроект (с предварительной опциональной фазой – Технические предложения);

– эскизный проект;

– технический проект;

– разработка рабочей документации и наземная экспериментальная обработка;

– приемочные и летные испытания;

– серийное производство;

– эксплуатация;

– утилизация.

Как видно, ремонт и техническое обслуживание как ОГ КА, так и отдельных КА не являются ключевыми этапами цикла изделия, тем не менее успешные попытки ремонта в процессе эксплуатации были.

Жизненный цикл изделий требует перехода на новый уровень развития построения группировок КА, включающий цикл, обеспечивающий ремонт как КА, так и системы КА в целом.

## 2. Схема развертывания орбитальных группировок космических аппаратов

Порядок развертки орбитальной группировки будет существенно отличаться от развертки отдельного КА и включать в себя принципиально новые этапы.

Первый этап развертывания ОГ КА начинается с запуска одного или группы КА в составе ракеты-носителя (РН) на опорную орбиту (как правило, круговую) с заданным наклоном и высотой 160 ... 200 км. Дальнейшее довыведение КА на рабочую орбиту производится двигательной установкой космической платформы или разгонным блоком. Основными параметрами, определяющими выбор РН, являются: масса полезного груза, выводимая на опорную орбиту, и итоговое наклонение орбиты [7].

Последующая коррекция наклона орбиты является одним из самых энергоемких маневров. Для реализации ОГ КА расположение космодрома и азимут запуска следует выбирать так, чтобы сразу обеспечить групповой вывод КА на орбиту с заданным наклоном, после чего потребуется только подъем высоты и разведение КА в рабочие позиции [7].

Основные факторы, влияющие на выбор тех или иных орбит для ОГ КА на начальном этапе проектирования системы, связаны как с действием возмущающих сил (атмосфера, аномальное гравитационное поле Земли), так и с влиянием радиационных поясов Земли [7].

Эффективное решение указанных выше проблем сопряжено с использованием негеостационарных орбит для размещения КА связи, создаваемых на основе высокопроизводительных и энергетически обеспеченных космических платформ.

Использование низколетящих КА является единственным способом снижения запаздывания сигналов при распространении в космических радиолониях. Однако техническая реализация таких проектов сопряжена с многочисленными проблемами. Анализ проблем и поиск решения начинаются на этапе проектирования системы. Требуется глубокий комплексный анализ, основанный на многих факторах, в том числе связанных с развертыванием орбитальной группировки, поддержанием ее в работоспособном состоянии и последующим захоронением КА. Даже само разнообразие негеостационарных орбит является проблемой при принятии решений. А достоинства, кажущиеся на первый взгляд очевидными, могут повлечь за собой серьезные препятствия при практической реализации новой системы.

Рассмотрим основные ограничения, которые необходимо учитывать при выборе того или иного типа орбит:

1) масса КА;

2) потребляемая мощность;

3) целевое назначение;

4) время существования.

В космической технике потребность в реализации новых технологий и возможностей привела к появлению нового класса космических систем (КС) – систем на базе КА, размещенных на низких и средних орбитах (LEO/MEO) [8].

К ним относятся КС мобильной связи и радионавигации, а также мониторинга Земли, атмосферы и околоземного космического пространства. Кроме того, с помощью КА обрабатываются новые элементы космической техники и реализуются программы по космическому образованию [8].

Создание КС есть результат реализации технологий системного проектирования. Вместе с тем, их практическая реализация определяется спецификой создаваемой системы, всесторонним учетом всех обстоятельств, что предполагает системный подход к созданию КС на базе КА. В условиях ограниченности ресурсов, низкого уровня возможностей реализации инновационных проектов в космической отрасли, выход очевиден – это «всесторонний учет всех обстоятельств», рассмотрение объекта проектирования в качестве системы [8].

Направлением развития КА, помимо дальнейшей миниатюризации, является построение из отдельных аппаратов орбитальных структур и, в частности, группировок. Объединение в группировку позволяет существенно расширить функциональные возможности КА, повысить их надежность и живучесть. Под группировкой следует понимать совокупность однотипных КА или малых КА различного целевого назначения, совместно решающих общую задачу и воспринимаемых потребителем космических услуг как единое целое.

Орбитальные группировки полноразмерных и малых КА, решающие общую задачу, как правило, нельзя назвать полноценной группировкой, поскольку в них отсутствует непосредственная связь между КА или эту связь обеспечивает наземный центр управления либо специальный комплекс. Любая система обладает свойством целостности, то есть наличием у системы свойств, не присущих ее компонентам в отдельности, заключающимся в несводимости свойств системы к свойствам элементов, из которых она состоит. В группировке КА целостность проявляется особенно ярко. Исходя из полученных теоретических и практических результатов, в области построения спутниковых систем можно выделить следующие типы группировок КА [9]:

1) распределенный КА – система КА на орбите, в которой целевая функция равномерно распределена между множеством однотипных КА;

2) фрагментированный КА – система КА на орбите, в которой каждый КА имеет свое узкое функциональное назначение.

Идея распределенного КА предполагает распределение целевой функции между отдельными КА и ее последующий синтез. Очевидно, что для этого КА в группировке должны функционировать в высшей степени согласованно. Группировка типа «распределенный КА» должна обладать следующими признаками [9]:

1) должна состоять из множества однотипных КА одинаковой размерности («фемто», «пико» или

«нано») и, например, из двух – трех специализированных аппаратов большей, по сравнению с остальными, размерности (в частности, такая группировка может быть использована для сбора и увода на Землю космического мусора);

2) множество КА должно образовывать распределенную беспроводную вычислительную систему/сеть с возможностью «облачных» вычислений;

3) каждый КА должен выполнять заданную часть целевой функции, соответствующую типовым задачам полноразмерных КА (прием и передача данных, дистанционное зондирование Земли и космоса в различных спектральных диапазонах и т. д.);

4) группировка должна обладать способностью динамически поддерживать и менять свою пространственную структуру за счет управляемого движения отдельных КА;

5) части целевой функции отказавшего КА должны перераспределяться между работоспособными КА;

6) неисправные КА и их фрагменты (космический мусор) должны собираться специализированными КА для последующего увода в плотные слои атмосферы или уводятся за счет использования собственных возможностей.

Чем больше в структуре элементов (КА) и чем меньше их размерность (не в ущерб функциональности), тем выше надежность и живучесть распределенного КА, проще и дешевле изготовление и запуск КА. Современный уровень развития микроэлектроники и микроэлектромеханических систем (МЭМС) обеспечивает реальные предпосылки для создания распределенного КА [9].

Также в работе [10] рассматривается задача построения двухъярусных спутниковых систем в околоземном космическом пространстве.

### 3. Стандартизация космических аппаратов

В настоящее время быстрым темпом идет технологическое развитие. Каждые 1 – 2 года совершается значимое для космической отрасли открытие. При этом разработка и производство КА обычно проходит за 4 – 5-летний период. Так что к моменту выхода на орбиту, аппарат успевает устареть. Одним из способов решения данной проблемы может стать стандартизация КА, которая включала бы в себя:

- сокращение срока разработки КА;
- использование готовых элементов конструкции;
- модульность аппарата – возможность замены комплектующих без вмешательства в остальные элементы конструкции.

Перечисленные пути стандартизации открывают возможность проведения обслуживания КА на орбите.

Можно выделить две основные задачи обслуживания:

1) утилизации – состоит в полном выведении из целевой орбиты КА, неспособного самостоятельно увести себя на орбиту захоронения. Экономический эффект от утилизации состоит, во-первых, в освобождении ценной «орбитальной позиции», и, во-вторых, в устранении угроз, связанных с техногенным засорением пространства;

2) технического обслуживания и ремонта (ТОиР) – состоит в изменении состава бортового оборудования КА. Экономический эффект от ТОиР состоит, во-первых, в уменьшении массы полезного груза, который необходимо доставить к обслуживаемому аппарату (при условии, что масса утилизируемого при ТОиР неисправного элемента меньше массы КА в целом), и во-вторых, в модернизации бортового оборудования, позволяющей увеличить прибыль от эксплуатации «орбитальной позиции».

Переход к стандартизации космических аппаратов, которые предполагается использовать в будущей ОГ, позволит существенно сократить время создания и развёртывания группировки, а также уменьшить затраты на запуск и обслуживание ОГ КА.

#### 4. Структура орбитальной группировки космических аппаратов

Для корректной работы орбитальной группировки КА необходимо систематизировать их вза-

имодействие между собой. В связи с чем предложена структура, состоящая из следующих сегментов:

1) наземный сегмент, включающий в себя наземный специальный комплекс (НСК) и стартовый комплекс (СК);

2) космический сегмент:

а) сегмент пилотируемой орбиты, состоящий из орбитальной станции для ремонта и обслуживания КА (ТОиР), с запасными инструментами и принадлежностями (ЗИП);

б) заправочно-зарядный сегмент (ЗЗС), состоящий из космического аппарата, с размещёнными на нем средствами хранения и заправки рабочим телом и энергоустановкой для осуществления «подзарядки» КА;

в) сегмент хранения и ожидания запуска КА (СХО);

г) транспортно-доставочный сегмент (ТДС), представляющий собой космический аппарат (буксир), осуществляющий транспортировку КА между орбитами;

д) сегмент модульных КА, представляющий собой совокупность всех КА, выполняющих целевую задачу. На рис. 1 представлена система ОГ КА.

Предложенная структура позволяет оценить количество составных частей и трудозатраты на развёртывания полномасштабной ОГ КА.

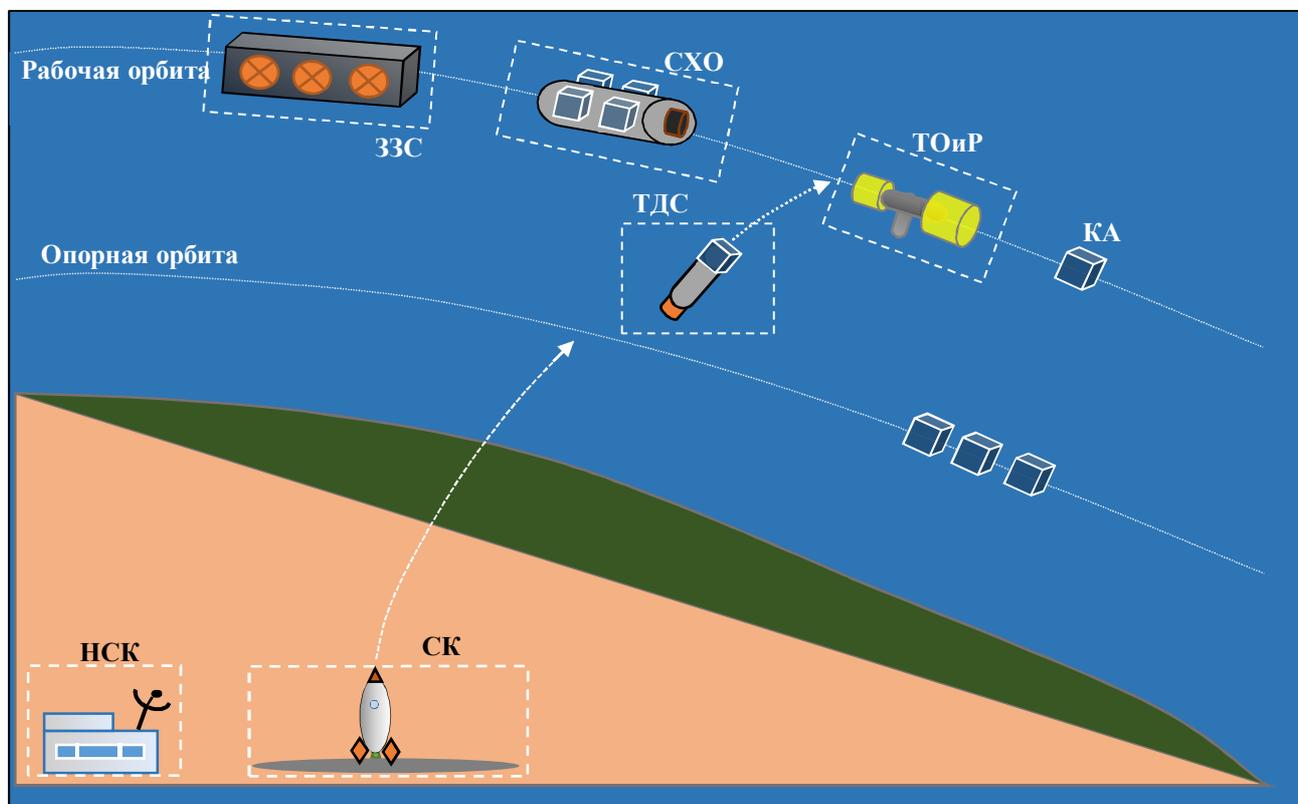


Рис. 1. Система орбитальной группировки космических аппаратов

### 5. Структура наземного сегмента

Наземный сегмент включает в себя НСК и СК.

НСК – комплекс систем, размещающийся на Земле в стационарных сооружениях или на подвижных средствах, основная цель которого – прием, передача, обработка и анализ информации, полученной с космического аппарата. Основными задачами НСК являются:

- 1) планирование работы бортовой установки КА и наземных средств приема и передачи информации;
- 2) разработка программы работы КА;
- 3) контроль работы КА за определенный цикл.

Состав и характеристики НСК зависят от целевого назначения КА (или группы КА), объема получаемой и принимаемой информации, орбиты КА и цикла его работы.

СК – комплекс сооружений, объектов и систем, представляющий собой совокупность средств подготовки, транспортировки, проверки, заправки, запуска и доставки космических аппаратов на опорную орбиту.

Существующие наземные комплексы управления (НКУ) при незначительном расширении их функциональных возможностей в части приема-передающих каналов отвечают требованиям по управлению орбитальными группировками КА. В перспективе, конечно, потребуются дополнительные НКУ с целью обеспечения работы с КА в круглосуточном режиме.

В настоящее время для обеспечения связи через приемо-передающие каналы пилотируемых и эксплуатируемых в автоматическом режиме КА, используя существующие НКУ в составе наземного сегмента для управления ОГ КА, требуется объединение центров управления полетами (ЦУП) в единую сеть.

### 6. Структура сегмента пилотируемой орбиты

Станция ТОиР представляет собой отдельный модуль, назначение которого ремонт и техническое обслуживание КА, утративших целевые характеристики функционирования в процессе эксплуатации.

Предполагаются две конфигурации станции: с персоналом на борту и с роботом-манипулятором. Последняя позволяет уменьшить массогабаритные характеристики модуля и отсечь затраты на транспортировку человека к станции и на Землю. Однако, наличие персонала позволяет производить более тонкую и точную работу над космическим аппаратом, диагностику, техническое обслуживание и ремонт в то время, как робот сможет лишь произвести замену вышедшей из строя составной части КА.

Основная цель станции ТОиР – это предупреждение, своевременное выявление и устранение отказов и повреждений следующими методами:

1) контроля технического состояния с определенной периодичностью;

2) плановой замены элементов по достижении определенной наработки или календарного срока активного существования;

3) планового и непланового ремонта для устранения отказов, предотказных состояний и повреждений.

Возможны разные способы планирования работ по ТОиР:

1) по событию – например, при отказе, что эффективно, если себестоимость ремонта относительно невысока, а последствия отказа не влияют на выполнение обязательств перед заказчиками;

2) регламентное обслуживание – выполняется по заранее составленному плану (регламенту обслуживания), позволяющему поддерживать работоспособность оборудования, такой вид обслуживания дает самый высокий процент готовности оборудования, но и является наиболее дорогим, поскольку фактическое состояние оборудования в определенный регламент момент времени может и не требовать работ по обслуживанию или ремонту;

3) по состоянию – выполняется по результатам экспертной оценки или измерения параметров фактического технического состояния оборудования, для данного случая себестоимость обслуживания меньше, а готовность оборудования к применению достаточно высока.

На рис. 2 представлена схема орбитальной космической станции ТОиР КА, подразумевающая работу персонала на борту. Конструкция станции предполагает проведение работ в специальном ремонтном модуле, ограничивающем рабочее пространство для безопасного проведения необходимых работ. Такая схема позволит внедрить цельный модуль станции обслуживания к уже существующей космической станции.

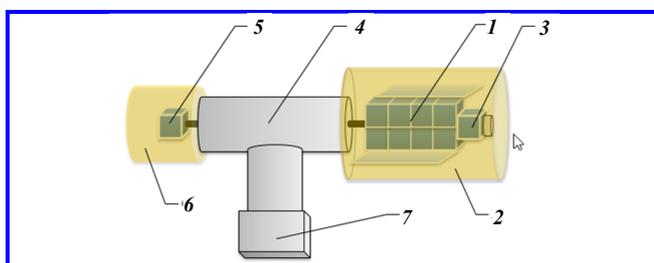


Рис. 2. Схема станции по техническому обслуживанию и ремонту: 1 – блочный КА; 2 – ремонтный модуль; 3 – транспортировочный буксир; 4 – космическая станция; 5 – малый транспортировочный буксир; 6 – малый ремонтный модуль; 7 – стыковочный узел

Порядок доставки и проведения обслуживания космического аппарата:

1) обнаружение неисправного КА и расчет оптимальной траектории его перехвата на орбите;

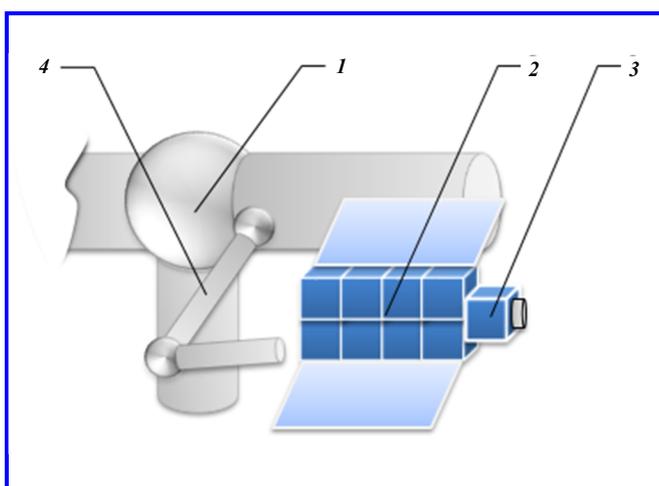
2) транспортировочный буксир (3) выходит на орбиту неисправного КА (2 или б), производит его перехват, транспортировку и стыковку к станции обслуживания;

3) станция обслуживания посредством собственной двигательной установки транспортируется и стыкуется к космической станции;

4) специалисты космической станции переходят в надувной модуль станции обслуживания и проводят необходимые работы с космическим аппаратом;

5) после завершения работ транспортировочный буксир (3) выводит блочный космический аппарат (1) на рабочую орбиту, отстыковывается от него и возвращается к станции.

Недостатком такой системы является необходимость в дополнительном оперативном персонале, который необходимо содержать на станции, транспортировать на орбиту и обратно на Землю. Однако наличие человека на борту для выполнения таких работ является достаточно весомым преимуществом, так как человек может отремонтировать элементы отдельного блока и выполнить гораздо более тонкую работу в достаточно сжатом объеме, нежели робот-манипулятор. Также человек может продиагностировать неисправность, выполненные работы, общее функционирование систем на месте без необходимости постоянной передачи информации на Землю.



**Рис. 3. Схема космической станции обслуживания:**  
**1 – космическая станция; 2 – блочный космический аппарат; 3 – транспортировочный буксир;**  
**4 – робот-манипулятор**

На рис. 3 представлена схема космической станции, работающей в автоматическом режиме. При использовании автоматической схемы отпадает необходимость в обеспечении станции дополнительными специалистами, которые будут проводить работы по обслуживанию блочных космических аппаратов. В то же время робот-манипулятор можно использовать также в ручном режиме.

Недостатком такой схемы является то, что робот-манипулятор может только заменять отдельные блоки космического аппарата без возможности дальнейшего ремонта.

После проведения обслуживания по такой схеме остается необходимость в утилизации неисправного или отработавшего свой ресурс блока. Для таких целей на станции должен быть предусмотрен какой-либо модуль-контейнер, который в дальнейшем будет утилизироваться путем сжигания в атмосфере, либо возвращаться на Землю для дальнейшего изучения и ремонта.

### 7. Заправочно-зарядный сегмент

Модуль ЗЗС представляет собой КА, снабженный баками с одним или несколькими рабочими телами (ксенон, гидразин и др.). Главная задача ЗЗС – дозаправка КА орбитальной группировки рабочим телом. Такое решение позволит не утилизировать космический аппарат, а продлить его срок активного существования без последствий для выполнения целевой задачи.

Конструкция станции представляет собой силовую раму с закрепленными на ней заправочными баками, накопителем электроэнергии и служебными системами. Предполагается, что станция будет некой подвижной «заправкой», которая будет подлетать к космическим аппаратам, срок службы которых подходит к концу ввиду исчерпанного запаса рабочего тела, стыковаться с ними и осуществлять заправку рабочего тела через заправочную горловину.

Стоит отметить, что подобные проекты имели место быть. Так, например, в 2007 году по программе Orbital Express на орбиту были запущены два специально созданных спутника – ASTRO и NEXTSat. На орбите ASTRO сблизился и состыковался с NEXTSat. Затем он осуществил перемещение топлива (гидразина) в NEXTSat и заменил специальный модуль ORU, который символизировал аккумуляторы спутника. Миссия прошла успешно, подобные технологии предлагалось использовать для военных спутников, но информации об их использовании с тех пор нет [11].

Также была предложена технология дозаправки с использованием роботизированных манипуляторов:

в 2011 году последним рейсом шаттла на Международную космическую станцию (МКС) был доставлен экспериментальный стенд *Robotic Refueling Mission*, на котором должны были отрабатываться технологии обслуживания и дозаправки спутников, не созданных специально для такой дозаправки. Поэтому на стенде были специальные инструменты для срезания фиксирующей заправочные горловины проволоки и откручивания крышек с уплотнителями. В январе 2013 года стенд был успешно испытан на МКС. Стандартные одноразовые заправочные горловины, через которые спутники заправляли на Земле, были вскрыты, и с ними успешно соединился заправочный манипулятор. В августе того же года на МКС доставили дополнительное оборудование – новые блоки со спутниковыми клапанами и горловинами, а также бороскоп для наблюдения за «ремонт спутника изнутри». Но это оборудование до сих пор не испытано [11].

Очевидно, что идеи о космической дозаправке являются актуальными и перспективными на сегодняшний день, как с экономической точки зрения, так и с технической. Создание и применение такого аппарата позволит экономить миллиарды рублей ежегодно, а также позволит расширять количество целевых КА без опасений об их дальнейшей работе.

На рис. 4 показано схематичное изображение заправочно-зарядной станции.

#### 8. Сегмент хранения и ожидания космических аппаратов

Станция (модуль) для хранения и ожидания представляет собой силовую раму с местами для крепления еще не задействованных для поставленной задачи КА. При выведении на орбиту КА сразу приступают к своей работе. Такой подход осложняет процесс запуска самих аппаратов в космическое пространство, поскольку выгоднее всего производить запуск нескольких единиц или даже десятков аппаратов сразу, не по одному. Такое решение влияет на время и сроки отправки аппаратов, вынуждая сдвигать сроки сдачи КА к срокам запуска РН с аналогичными КА.

Станция хранения и ожидания позволит запускать КА и смещать сроки их запуска по необходимости, что, теоретически, позволит ускорить производство КА и не хранить их длительное время на Земле.

Помимо этого, станция позволит производить замену КА на другой – аналогичный – не останавливая выполнение целевой задачи. Предполагается размещение модуля хранения на будущей Российской орбитальной служебной станции (РОСС). На рис. 5 показан предложенный вид модуля хранения КА.

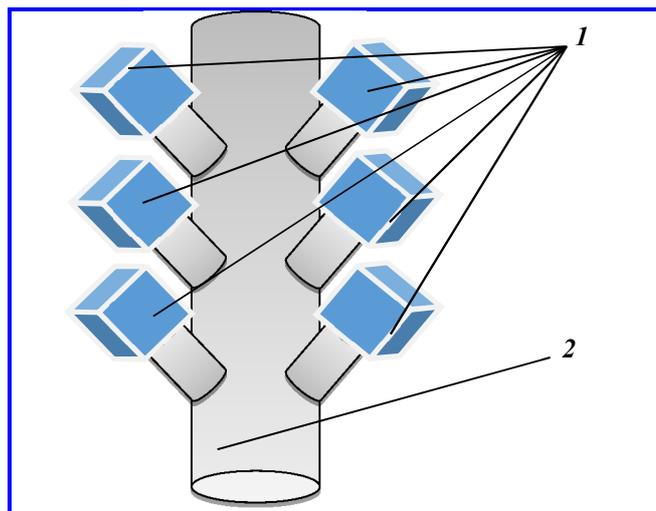


Рис. 4. Заправочная космическая станция:  
1 – модули хранения рабочего вещества;  
2 – бак с рабочим веществом

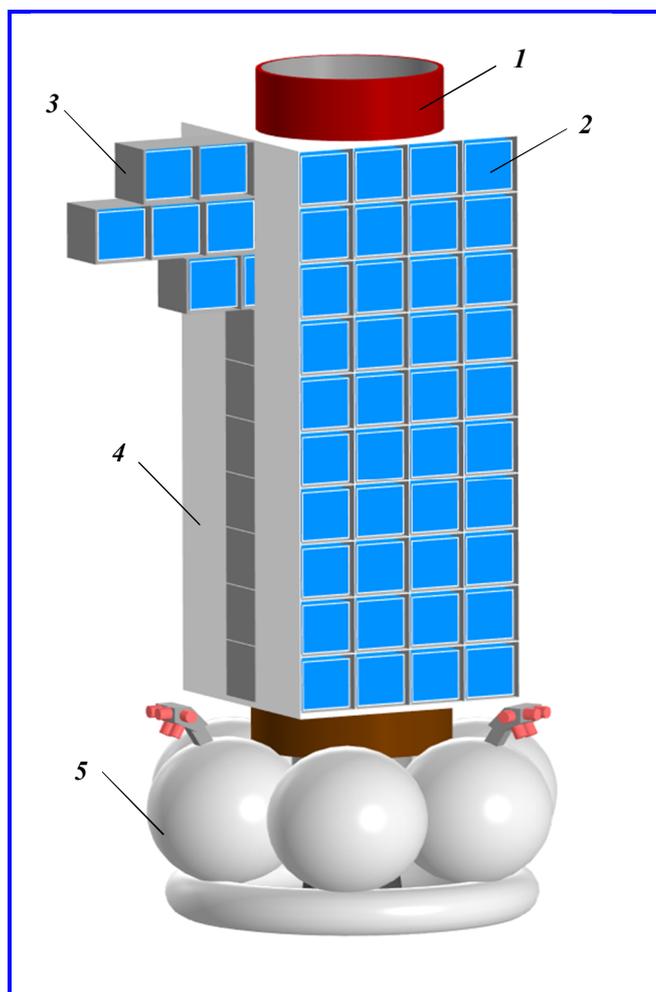


Рис. 5. Внешний вид модуля хранения:  
1 – стыковочный модуль; 2 – запасные космические аппараты; 3 – выдвижной механизм; 4 – силовой каркас; 5 – двигательный блок

### 9. Транспортно-доставочный сегмент

Модуль транспортировки и доставки предполагает использование многоразового межорбитального буксира с использованием электроракетного двигателя в составе комплексной двигательной установки. Целевой задачей буксира будет транспортировка КА на рабочую орбиту и, в случае, задействования персонала, доставлять их с рабочей орбиты на опорную для дальнейшей доставки на Землю.

Фактически буксир будет являться многоразовым аналогом РБ «Фрегат» и выполнять роль доставщика грузов, полезной нагрузки, ЗИП и аппаратуры.

Подобная идея также возникла при рассмотрении миссии для полета на Луну, что указано в [12]. На рис. 6 показан внешний вид блочного (модульного) КА.

### 10. Целесообразность ремонта на орбите

Создание космической орбитальной группировки является важной необходимостью для развития ракетно-космической отрасли страны. Однако, некоторые предложенные технические решения, предложенные в статье, могут показаться экономически неэффективными и убыточными, например, станция технического обслуживания и ремонта. Попробуем проанализировать, что эффективнее: создать и запустить новый КА или починить его в космосе?

По данным [13], стоимость постройки и запуска одного спутника для геостационарной орбиты стоит 190 ... 230 млн. долларов. Поскольку целевая орбита и размеры наших КА существенно меньше размеров геостационарных спутников, за стоимость изготовления и запуска возьмем 50 млн. долларов за один КА.

Попробуем определить стоимость ремонта в космосе. Для починки аппарата будут необходимы запасные части, которые должны быть доставлены в космос. Поэтому необходимо определить стоимость одного пуска пилотируемого КА, на борту которого и будут доставляться запчасти.

Согласно статье [14], в которой проводился анализ контрактов через Единую информационную систему в сфере закупок, стоимость запуска «Союз МС-17» обойдется в 2,5 млрд. рублей (32,5 млн. долларов). Если учитывать, что масса «Союз МС-17» 7220 кг, то запуск одного килограмма обойдется в 4493 долларов. Отсюда следует, что даже учитывая стоимость работ, ремонт КА в космосе существенно экономичнее, чем создание и выведение нового КА.

### 11. Возможности запуска космической группировки

Для внедрения полноценной крупномасштабной орбитальной космической группировки необходимы не только большие денежные средства, но и суще-

ственные технические средства, такие как, например, ракеты-носители, необходимые для доставки аппаратов группировки в космическое пространство. Таким образом, для запуска большой группировки аппаратов, потребуется с десятков РН разного класса.

На рис. 7 представлена диаграмма запусков ракет-носителей РФ с 2018 по 2021 гг. Также на диаграмме показано запланированное число запусков на 2022 год.

Из диаграммы видно, что с каждым годом число запусков увеличивается. На 2021 год было выполнено 24 запуска, из которых: 22 запуска на РН «Союз-2.1а» и «Союз-2.1б», относящиеся к среднему классу носителей, и 2 запуска тяжелых РН «Протон-М».

На 2022 год запланировано 30 запусков, из которых: 23 запуска РН «Союз-2.1а» и «Союз-2.1б», 3 запуска «Ангара-1.2», 2 запуска «Протон-М», 2 запуска «Ангара-А5». Тем не менее за последние 10 лет доля космических запусков Госкорпорации «Роскосмос» снизилась с 60 до 10 % ввиду появления конкурентов: ESA и SpaceX.

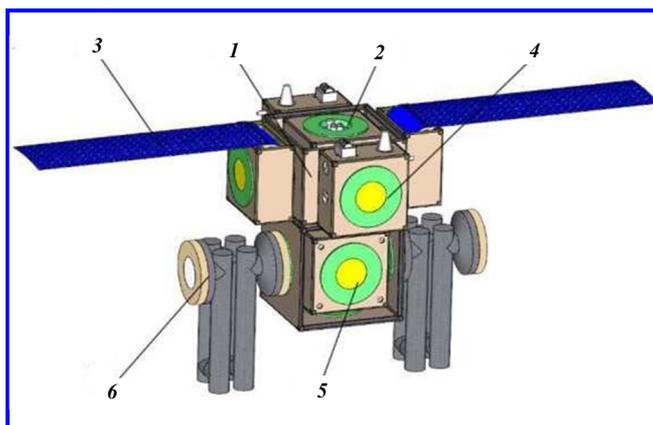


Рис. 6. Внешний вид блочного (модульного) космического аппарата (сменный модуль не показан): 1 – силовой модуль; 2 – двигательный модуль; 3 – энергетический модуль; 4 – приборный модуль; 5 – модуль управления движением; 6 – монтажный модуль (манипулятор)

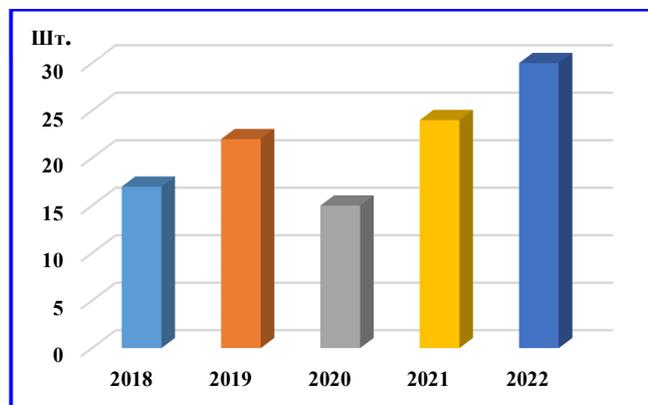


Рис. 7. Диаграмма запусков ракет-носителей Российской Федерации

На рис. 8 представлена диаграмма, показывающая количество зарубежных и отечественных КА, запущенных отечественными ракетами-носителями.

Как видно из диаграммы на рис. 8, большая доля запущенных КА за последние пять лет – аппараты зарубежных стран и компаний. И если учитывать тенденцию ежегодного роста числа запусков (рис. 7), то можно задействовать часть из них для отечественных КА взамен зарубежных. Таким образом, потенциальная возможность запуска отечественной орбитальной группировки в разы возрастает.

Таким образом, возможности отечественного производства по обеспечению развертывания ОГ КА путем запуска РН различного класса и вывода на целевые орбиты позволяют реализовать предлагаемую концепцию быстро и в короткие сроки.

## 12. Целевое назначение космических аппаратов орбитальной группировки

Целевое назначение КА заключается в выполнении широкого спектра различного рода задач, таких как:

1) информационное обеспечение: связь, телевидение, ретрансляция, навигация и геодезия, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ);

2) научно-исследовательские: медико-биологические, исследование околоземного и околосолнечного пространства, исследование небесных тел;

3) специального применения: для боевого назначения, демонстрационные КА, студенческие КА.

Космический аппарат, выполняющий любую из этих задач, обладает возможностью использования его как спутника двойного назначения.

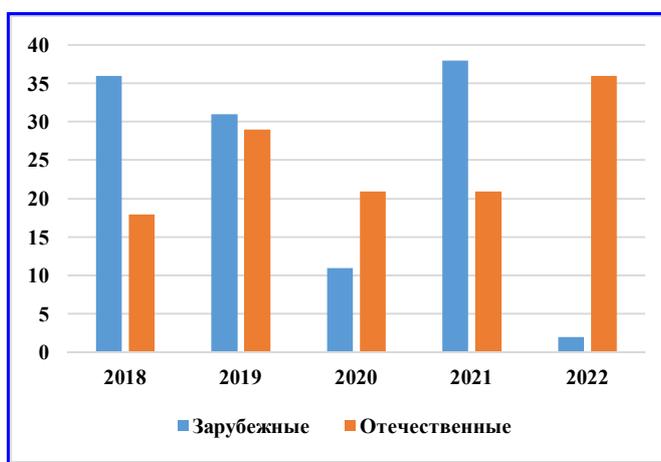


Рис. 8. Количество запущенных зарубежных и отечественных космических аппаратов

В качестве примера можно рассмотреть компанию Capella Space со своей спутниковой группировкой из 36-ти спутников, оснащенных радиолокационной станцией с синтезированной апертурой. Целевое назначение аппаратов – получение радиолокационных изображений земной поверхности с высоким разрешением [15]. Тем не менее, компания заключила договор на предоставление картографической информации с государственными структурами США, например, в 2019 году был заключен договор с Национальным управлением военно-космической разведки США (NRO) об интеграции коммерческих радиолокационных изображений, полученных спутниками Capella Space, с государственными спутниками наблюдения NRO.

Также компания заключила в ноябре 2019 года контракт с военно-воздушными силами США на включение изображений компании в программное обеспечение виртуальной реальности.

Стоит отметить, что сама компания состоит из 100 человек, а суммарно планируется запустить 36 спутников, причем выведение их на орбиту будет происходить массово, несколько штук (десятков штук) за раз.

Другим примером является компания ICEYE, предлагающая услуги по получению коммерческих радиолокационных изображений с высоким разрешением. На 2019 год было запущено пять спутников, в планах компании было выведение по несколько спутников ежегодно. Данных о предоставлении своих услуг военным ведомствам каких-либо стран нет, тем не менее нельзя исключить, что услуга предоставляется или будет предоставляться в будущем.

Более масштабную группировку, способную выполнять задачи по оперативному слежению и передаче целевой информации, запустила компания Planet Labs. Разработанные микроспутники Dove оснащены оптическими средствами разведки для съемки различных участков Земли. В 2015 году компания суммарно вывела около 500 спутников [15].

Исходя из возможностей использования зарубежных ОГ иностранными заказчиками, например, министерством обороны США, создание собственной ОГ КА становится приоритетным направлением для повышения обороноспособности страны.

## Заключение

Появление орбитальных группировок с возможностью обслуживания космических аппаратов – закономерное развитие космических систем. Реализация проектов такого масштаба ставит перед кос-

мической отраслью принципиально новые задачи. Это приведет к прогрессу в комплексном проектировании и испытаниях космической техники нового поколения.

В случае нахождения баланса между целями группировки, затратами на ее производство и эксплуатацию и приемлемой конечной стоимостью для потребителя, космические системы будут успешными с экономической точки зрения. Так, например, ремонт и обслуживание КА в космическом пространстве дешевле и эффективнее, нежели разработка и запуск нового аппарата.

Рассмотренные в настоящей статье проблемные вопросы системного проектирования орбитальных группировок на базе КА позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработка и реализация проектов орбитальных группировок на базе КА требуют как широкой кооперации участников, так и их координации, нового методологического обеспечения, основанного на системном подходе и технологиях параллельного проектирования.

2. Целесообразно сместить акцент от разработки отдельных КА к разработке облика перспективных космических систем на их основе, а также от управления отдельными КА к управлению целевыми системами.

3. Требуется проведение работ по стандартизации и унификации механических и электрических интерфейсов.

4. Ускорение сроков разработки космических систем при международном сотрудничестве с надежными партнерами способствует развитию космической отрасли.

### Литература

1. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 сентября 2014 г. № 1156-ст : введен впервые : дата введения 2015-09-01 / разработан ОАО НИЦ «Прикладная Логистика» и ОАО ЛИИ им. М.М. Громова. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 11 [1] с.
2. ГОСТ Р 56135-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 сентября 2014 г. № 1155-ст : введен впервые : дата введения 2015-09-01 / разработан

ОАО НИЦ «Прикладная Логистика» и ОАО ЛИИ им. М. М. Громова. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 13 [1] с.

3. Беляков Г. П. Космические проекты в контексте жизненного цикла / Г. П. Беляков, Ю. А. Анищенко, М. В. Сафронов // Менеджмент социальных и экономических систем. – 2016. – № 1. – С. 4 – 8.

4. Романов А. А. Смена парадигмы разработки инновационной продукции: от разрозненных НИОКР к цифровым проектам полного жизненного цикла / А. А. Романов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Том 4. – Вып. 2. – С. 68 – 84.

5. Ткаченко И. С. Анализ ключевых технологий создания многоспутниковых орбитальных группировок малых космических аппаратов / И. С. Ткаченко // Онтология проектирования. – 2021. – Т. 11. – № 4 – С. 478 – 499. – DOI : 10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499.

- 6.Bloshenko A. Планировать по уму / А. Bloshenko, С. Борисов // Роскосмос : [сайт]. – 2021. – 16 мая. – URL : <https://www.roscosmos.ru/31063/>.

7. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи / А. А. Степанов, А. Акимов, А. Гриценко [и др.] // Технологии и средства связи [сайт]. – 2016. – URL : <http://lib.tssonline.ru/articles2/sputnik/osobennosti-postroeniya-i-ekspluatatsii-orbitalnyh-gruppirovok-sistem-sputnikovoy-svyazi>.

8. Проблемные вопросы создания многоспутниковых орбитальных группировок на базе малоразмерных космических аппаратов / В. В. Бетанов, С. А. Волков, Н. С. Данилин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6. – Вып. 3. – С. 57 – 65.

9. Ключников В. Ю. Построение кластеров малых космических аппаратов / В. Ю. Ключников // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59. – № 6. – С. 423 – 427.

10. Нгуен Нам Куи. Методика оптимизации орбитального построения двухъярусных спутниковых систем непрерывного обзора сферического слоя околоземного космического пространства : специальность 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нгуен Нам Куи. – Москва, 2018. – 142 с.

11. Космические заправщики / Филипп Терехов // Хабр : [сайт]. – 2016. – 22 авг. – URL : <https://habr.com/ru/post/396881/>.

12. Межорбитальный многоразовый буксир на основе электроракетной двигательной установки // Unnatural [сайт]. – 2015. – 7 Апр. – URL : <http://unnatural.ru/mmbs>.

13. Сколько стоит спутник // PROSPUTNIK.ru. – URL : <http://prosputnik.ru/skolko-stoit-sputnik>.

14. Сколько стоит запуск «Союза»? // Пикабу : [сайт]. – URL : [https://pikabu.ru/story/skolko\\_stoit\\_zapusk\\_soyuza\\_8000030](https://pikabu.ru/story/skolko_stoit_zapusk_soyuza_8000030).

15. Митрофанов А. «Всевидящее око» компании Capella Space: предвестник революции в спутниковой разведке / Андрей Митрофанов // Военное обозрение : [сайт]. – 2020. – 24 декабря. – URL : <https://topwar.ru/178436-vsevidjaschee-okom-kompanii-capella-space-predvestnik-revoljucii-v-sputnikovoj-razvedke.html>.

Поступила в редакцию 22.09.2022

*Дмитрий Алексеевич Бондаренко, инженер 2-й категории, т. 8 (915) 239-81-11, e-mail: i@dbondarenko.ru.*  
*Владимир Яковлевич Геча, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, т. 8 (985) 177-78-58, e-mail: vgecha@hq.vniiem.ru.*  
*Владимир Викторович Каверин, кандидат технических наук, начальник отдела, т. 8 (926) 225-33-21, e-mail: kaverin@mcc.vniiem.ru.*  
*Сергей Юрьевич Маринин, начальник сектора, т. 8 (915) 383-86-83, e-mail: otel34@mcc.vniiem.ru.*  
*Алексей Максимович Сидоров, ведущий инженер, т. 8 (915) 361-91-99, e-mail: asidorov@mcc.vniiem.ru.*  
*Александр Андреевич Ходов, техник, т. 8 (915) 400-58-78, e-mail: sashakhodov@mail.ru.*  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF ORBITAL SATELLITE CONSTELLATIONS WITH THE POSSIBILITY OF THEIR MAINTENANCE

**D. A. Bondarenko, V. Ia. Gecha, V. V. Kaverin,  
S. Iu. Marinin, A. M. Sidorov, A. A. Khodov**

*The prerequisites for creation of Russian orbital satellite constellation with the possibility of its maintenance are considered. The analysis of the existing orbital constellations and the possibility of using the previous experience in design of components is performed; the composition and structure of interaction of the prospective satellite constellation, taking into account the manned segment of the orbital station, are proposed. The purposes, tasks and composition of the ground segment are considered. The options for standardization and unification of small satellites constellation are described, including a description of modular satellites, orbital station for repair and maintenance, transport and delivery module, storage and rest station, and refuelling and charging station.*

**Key words:** orbital constellation, satellite, space system, maintenance, repair.

### References

1. GOST R 56136-2014. Life cycle management for military products. Terms and definitions: national standard of the Russian Federation : official edition : approved and brought into force by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1156-ср of September 19, 2014 : introduced for the first time : effective as of September 01, 2015 / prepared by JSC Research and Development Center 'Applied Logistics' and JSC Gromov Flight Research Institute. – Moscow : Standartinform, 2015. – 11 [1] p.
2. GOST R 56135-2014. Life cycle management for military products. General provisions: national standard of the Russian Federation : official edition : approved and brought into force by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1155-ср of September 19, 2014 : introduced for the first time : effective as of September 01, 2015 / prepared by JSC Research and Development Center 'Applied Logistics' and JSC Gromov Flight Research Institute. – Moscow : Standartinform, 2015. – 13 [1] p.
3. Beliakov G. P. Space projects in the context of life cycle / G. P. Beliakov, Iu. A. Anischenko, M. V. Safronov // Management of social and economic systems. – 2016. – No. 1. – Pp. 4 – 8.
4. Romanov A. A. Paradigm shift in the development of innovative products: from disparate R&D to full life cycle digital projects / A. A. Romanov // Rocket-and-space instrument engineering and information systems – 2017. – Vol. 4. – Issue 2. – Pp. 68 – 84.
5. Tkachenko I. S. Analysis of key technologies for creation of orbital installations consisting of multiple small satellites / I.S. Tkachenko // Ontology of designing. – 2021. – Vol. 11. – No. 4 – Pp. 478 – 499. – DOI : 10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499.
6. Bloshenko A. Smart planning / A. Bloshenko, S. Borisov // Roscosmos : [website]. – 2021. – May 16. – URL : <https://www.roscosmos.ru/31063/>.
7. Features of construction and operation of the orbital constellations of satellite communication systems / A. A. Stepanov, A. Akimov, A. Gritsenko [et al.] // Communication technologies and facilities [website]. – 2016. – URL : <http://lib.tsonline.ru/articles2/sputnik/osobennosti-postroeniya-i-ekspluatatsii-orbitalnyh-gruppirovok-sistem-sputnikovoy-svyazi>.
8. Problem areas in creation of multi-satellite orbital constellations based on small satellites/ V.V. Betanov, S.A. Volkov, N.S. Danilin [et al.] // Rocket-and-space instrument engineering and information systems. – 2019. – Vol. 6. – Issue 3. – Pp. 57 – 65.
9. Kliushnikov V.Iu. Construction of small satellites clusters / V.Iu. Kliushnikov // Journal of Instrument Engineering. 2016. – Vol. 59. – No. 6. – Pp. 423 – 427.
10. Nguyen Nam Qui. Methods for optimization of orbital construction of two-tier satellite systems for near-earth space spherical layer continuous coverage: speciality 05.07.09 'Dynamics, ballistics, movement control of flying vehicles' : Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Nguyen Nam Qui. – Moscow, 2018. – 142 p.
11. Space refuellers / Philipp Terekhov // Habr : [website]. – 2016. – August 22. – URL : <https://habr.com/ru/post/396881/>.
12. Interorbital reusable space tug based on electric propulsion system // Unnatural [website]. – 2015. – April 7. –

URL : <http://unnatural.ru/mmbs>.

13. How much does a satellite cost // PROSPUTNIK.ru. – URL: <http://prosputnik.ru/skolko-stoit-sputnik>.

14. How much does the launch of Soyuz cost? // Pikabu : [website]. – URL: [https://pikabu.ru/story/skolko\\_stoit\\_zapusk\\_soyuza\\_8000030](https://pikabu.ru/story/skolko_stoit_zapusk_soyuza_8000030).

15. Mitrofanov A. Capella Space's all-seeing eye: harbinger of the satellite intelligence revolution / Andrey Mitrofanov // Military review : [website]. – 2020. – December 24. – URL: <https://topwar.ru/178436-vsevidjashee-oko-kompanii-capella-space-predvestnik-revoljucii-v-sputnikovoj-razvedke.html>.

**Dmitrii Alekseevich Bondarenko**, 2nd category Engineer, tel.: +7 (915) 239-81-11, e-mail: [i@dbondarenko.ru](mailto:i@dbondarenko.ru).

**Vladimir Iakovlevich Gecha**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Deputy Director General for Research Activities, tel.: +7 (985) 177-78-58, e-mail: [vgecha@hq.vniiem.ru](mailto:vgecha@hq.vniiem.ru).

**Vladimir Viktorovich Kaverin**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Department, tel.: +7 (926) 225-33-21, e-mail: [kaverin@mcc.vniiem.ru](mailto:kaverin@mcc.vniiem.ru).

**Sergei Iurevich Marinin**, Head of Sector, tel.: +7 (915) 383-86-83, e-mail: [otdel34@mcc.vniiem.ru](mailto:otdel34@mcc.vniiem.ru).

**Alexei Maksimovich Sidorov**, Leading Engineer, tel.: +7 (915) 361-91-99, e-mail: [asidorov@mcc.vniiem.ru](mailto:asidorov@mcc.vniiem.ru).

**Aleksandr Andreevich Khodov**, Technician, tel.: +7 (915) 400-58-78, e-mail: [sashakhodov@mail.ru](mailto:sashakhodov@mail.ru).  
(JC «VNIEM Corporation»).