

Студентке Ивахно Анне Владимировне

Группа КИ19-03-6М, Направление (специальность) 27.04.03 «Системный анализ и управление» (27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»).

Тема выпускной квалификационной работы: «Методика комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты».

Утверждена приказом по университету № 18364/с от 24.10.2019 г.

Руководитель ВКР: доцент, профессор МБК ПФиКТ, д-р техн.наук, Чеботарев Виктор Евдокимович.

Исходные данные для ВКР

Создание сервисных космических аппаратов требует финансовых и временных затрат, а вопрос целесообразности работы над таким проектом не отражён ни в одном открытом исследовании. Методика комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты необходима для определения целесообразности разработки такого проекта и установления проектных ограничений на раннем этапе проектирования сервисного космического аппарата.

Перечень разделов ВКР:

- 1 Космический мусор, и методы его удаления с геостационарной орбиты.
- 2 Разработка методики комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного КА для удаления космического мусора с геостационарной орбиты.
- 3 Графический анализ методики комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты.

Перечень графического материала: слайды презентации в количестве 15 штук.

Руководитель ВКР

подпись

В.Е. Чеботарев

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

А.В. Ивахно..

инициалы и фамилия

« ____ » _____ 2021 г.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему: «Методика комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты» содержит 57 страниц текстового документа, 20 использованных источников, 17 рисунков, 8 таблиц.

СЕРВИСНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ГЕОСТАЦИОНАРНАЯ ОРБИТА, КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР, МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ, СРОК АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ.

Объект исследования – сервисный космический аппарат удаления космического мусора с геостационарной орбиты.

Цели работы:

- разработать методику комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты;
- провести анализ разработанной методики.

В данной работе была изучена актуальность выбранной темы, произведен анализ основных технико-экономических показателей эффективности космического аппарата связи и сервисного космического аппарата.

В результате исследования была разработана методика комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата, в которой показана зависимость между экономическими и техническими показателями.

Полученная система уравнений и неравенств позволяет определить область эффективного применения сервисного космического аппарата и сформулировать требования к системе коррекции и надёжности сервисного космического аппарата, исходя из ограничений по затратам на опытно-конструкторские работы по его созданию.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Космический мусор, и методы его удаления с геостационарной орбиты	8
1.1 Понятие космического мусора.....	8
1.2 Основные принципы предупреждения образования космического мусора.....	10
1.3 Основные концепции управляемого удаления объектов космического мусора с геостационарной орбиты.....	12
2 Разработка методики комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты	30
2.1 Экономическая модель создания и эксплуатации космического аппарата связи.....	30
2.2 Экономическая модель создания и эксплуатации сервисного космического аппарата.....	33
2.3 Методика комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты.....	41
3 Графический анализ методики комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты.....	45
3.1 Графический анализ методики.....	45
3.2 Пример применения методики.....	59
Заключение.....	61
Список сокращений.....	63
Список использованных источников.....	64

ВВЕДЕНИЕ

Геостационарная орбита по своим характеристикам является привлекательной для размещения космических аппаратов. Между государствами распределены точки стояния геостационарных космических аппаратов (КА), а также определены требования по точности удержания КА в этих точках. Отработавшие КА уводятся на значительное расстояние от рабочей геостационарной орбиты с тем, чтобы они не создавали помех и ограничений для работающих КА.

В случае повреждения КА в результате природных аномалий, либо в результате отказа одной или нескольких систем КА, управление аппаратом может быть нарушено. Это делает невозможным увод КА на орбиту для отработавших КА. При этом аппарат не только занимает системную точку на геостационарной орбите, но и может создавать угрозу для активных КА, снижать экономическую эффективность их использования. Такие КА переходят в разряд космического мусора (КМ) техногенного характера.

Не вызывает сомнения актуальность необходимости решения проблемы КМ на околоземных орбитах. Современные КА обладают высокой степенью надежности систем, что способствует уменьшению риска потери управления с ним, однако одновременное увеличение количества элементов аппаратуры КА и их усложнение не позволяет говорить о достижении 100% надёжности функционирования КА. Следовательно, прирост КМ будет представлять проблему при эксплуатации КА на околоземных орбитах, особенно на высоких, к которым относится геостационарная орбита (ГСО) и с которых практически невозможен увод КА за счёт внешних возмущений его орбиты. Снизить количество уже нефункционирующих КА, представляющих собой КМ, на ГСО возможно только при помощи сервисного КА, осуществляющего принудительный увод таких КА на орбиты захоронения.

Реализация любого проекта по созданию КА требует тщательной проработки, в том числе и расчета технико-экономических показателей.

Необходимо четко понимать целесообразность создания сервисного КА, а также представлять срок окупаемости такого проекта и все риски (в том числе финансовые), которые будут сопутствовать такому проекту.

Для определения целесообразности проектирования сервисного КА, а также сокращения времени на предпроектные работы, должна быть проведена оценка технико-экономической эффективности проекта по созданию сервисного КА, которая позволит на начальном этапе проектирования определить ряд обобщённых показателей эффективности (например, срок окупаемости проекта, индекс доходности и т.д.), чтобы в дальнейшем использовать их в качестве проектных ограничений при формировании проектного облика КА.

1 Космический мусор и методы его удаления с геостационарной орбиты

1.1 Понятие космического мусора

Космический мусор – это неиспользуемые искусственные объекты в околоземном космическом пространстве. К объектам космического мусора можно отнести вышедшие из строя космические аппараты, отработавшие ступени ракет, а также объекты, образующиеся при их распаде и столкновениях. Космический мусор опасен прежде всего угрозой столкновения с рабочими космическими аппаратами, в последствии чего космические аппараты могут выйти из строя. В странах, осуществляющих исследование космического пространства, разработаны и приняты руководящие принципы, направленные на минимизацию образования КМ:

1) стандарт безопасности НАСА (National Aeronautics and Space Administration (NASA)) (1995 год) (NASA Safety Standard – Guidelines and Assessment Procedures for Limiting Orbital Debris. NSS 1740.14);

2) стандарт NASDA (National Space Development Agency of Japan) по предупреждению образования КМ (1996 год) (Space Debris Mitigation Standard. NASDA-STD-18);

3) требования по безопасности CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) (космический мусор) (2000 год) (CNES Exigence de Sécurité – Débris Spatiaux: Méthode et Procédure. CNES, MPM-51-00 -12, issue 1, rev. 0);

4) изделия космической техники. Общие требования по к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства (ГОСТ Р 52925-2008);

5) европейский стандарт безопасности по космическому мусора (2001 год) (European Space Debris Safety and Mitigation Standard – Draft. issue 1, rev. 3) [1].

1.2 Основные принципы предупреждения образования космического мусора

Основные руководящие принципы предупреждения образования КМ носят рекомендательный характер и представляют собой документы, определяющие «кодекс поведения» в космическом пространстве.

Все руководящие принципы и стандарты по предупреждению засорения космического пространства определяют области околоземных орбит, являющихся охраняемыми зонами, и пределов которых все отработавшие КА должны быть удалены в конце срока активного существования (САС).

Защищаемая зона ГСО определяется следующими параметрами:

- высота орбиты $35\,786 \pm 200$ км;
- наклонение орбиты: $0 \dots 15^\circ$;
- период обращения: $1425,6 \dots 1446,7$ минут.

В конце САС, для уменьшения вероятности столкновений с новыми КА и освобождения места на ГСО, старый КА переводится на орбиту захоронения, что представлено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Условная схема вывода КА на орбиту захоронения

В таблице 1 представлены рекомендации для защиты ГСО, принятые в различных странах [2].

Таблица 1 – Рекомендации по параметрам орбиты захоронения для КА на ГСО

Страна, организация	Рекомендации для КА в конце САС на ГСО
США, NASA (National Aeronautics and Space Administration)	Переход на орбиту выше ГСО на $300 \text{ км} + 1000 \frac{A}{m}$
Европейский союз, CNES и EDMS (European Space Debris Safety and Mitigation Standard)	Переход на орбиту выше ГСО на $235 \text{ км} + 1000 \frac{C_R A}{m}$
Япония, JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) (NASDA)	Переход на орбиту выше ГСО на $200 \text{ км} + 0.022 \frac{a C_R A}{m}$
Российская федерация, Роскосмос	Переход на орбиту выше ГСО на 200 км
Примечание:	
1	C_R - коэффициент давления солнечного излучения (обычно между 1,2 и 1,5)
2	$\frac{A}{m}$ - отношение площади миделевого сечения КА к его сухой массе ($\text{м}^2/\text{кг}$)
3	a - большая полуось КА (м)

Однако последние годы наметилась тенденция приведения требований по защите околоземных орбит, прописанных в национальных стандартах, к единому виду в соответствии с международными договорённостями. В частности, в ГОСТ Р 52925-2018 для увода КА на орбиту захоронения рекомендовано изменение высоты орбиты на величину $235 \text{ км} + 1000 \frac{C_R A}{m}$.

Как следует из национальных и международных стандартов, для очистки ГСО от объектов КМ требуется реализация мероприятий, направленных на управляемое (активное или пассивное) изменение высоты орбиты КА, причём увеличение высоты орбиты с точки зрения безопасности дальнейшей эксплуатации ГСО предпочтительнее, чем уменьшение. Кроме того, учитывая относительно низкую скорость движения КА на ГСО (3,07 км/с), вкуче с высокой стоимостью запуска аппаратов на эту орбиту и сложностью отслеживания объектов КМ малого размера на такой высоте, целесообразным следует признать удаление с ГСО только КМ, представляющих собой не функционирующие КА.

1.3 Основные концепции управляемого удаления объектов космического мусора с геостационарной орбиты

За последние несколько лет было предложено и реализовано несколько различных концепций управляемого удаления КМ. На сегодняшний день существует целый ряд реализованных и находящихся на стадии разработки проектов, направленных на борьбу с космическим мусором.

Такие разработки проводились рядом организаций:

1) американское агентство DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency).

2) NASA Marshall Space flight Center;

3) немецкое космическое агентства (DLR);

4) EADS Astrium;

5) канадская компания «MacDonald Dettwiler and Associates»;

6) National Space Development Agency of Japan (NASDA) теперь JAXA;

7) швейцарский космический центр (Swiss Space Center) совместно с политехнической школой в Лозанне (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne) и т.д.

Французский Национальный центр космических исследований CNES в 2013 г. провел анализ существующих и перспективных технологий удаления КМ и результаты анализа свел в блок-схему, представленную на рисунке 2 [3].



Рисунок 2 – Блок-схема существующих и перспективных технологий очистки орбит от объектов КМ (по материалам CNES)

Рассмотрим основные существующие на сегодняшний день варианты удаления таких элементов космического мусора, как отработавшие неуправляемые КА.

1 Захват космического мусора механическим путем (проект CleanSpace, Швейцария) представлен на рисунке 3.

По замыслу создателей, после запуска спутник-мусорщик начнет маневрировать, выходя на траекторию сближения с целью: для этого на борту предусмотрен ультракомпактный ионный двигатель. Сблизившись с объектом, он осторожно его захватит и стабилизирует полет, притормозив его вращение. Затем, надежно удерживая захваченный груз, он направится к Земле, чтобы вместе с ним сгореть в плотных слоях атмосферы.

Гибель ждет лишь первый испытательный спутник CleanSpace One. В будущем, по замыслу авторов, он станет основой для создания целой серии космических «мусорщиков», адаптированных для удаления с орбиты объектов разного размера и формы. Они могут стать и многоразовыми, отправляя вниз, к Земле, лишь свой груз, а сами продолжают работу.

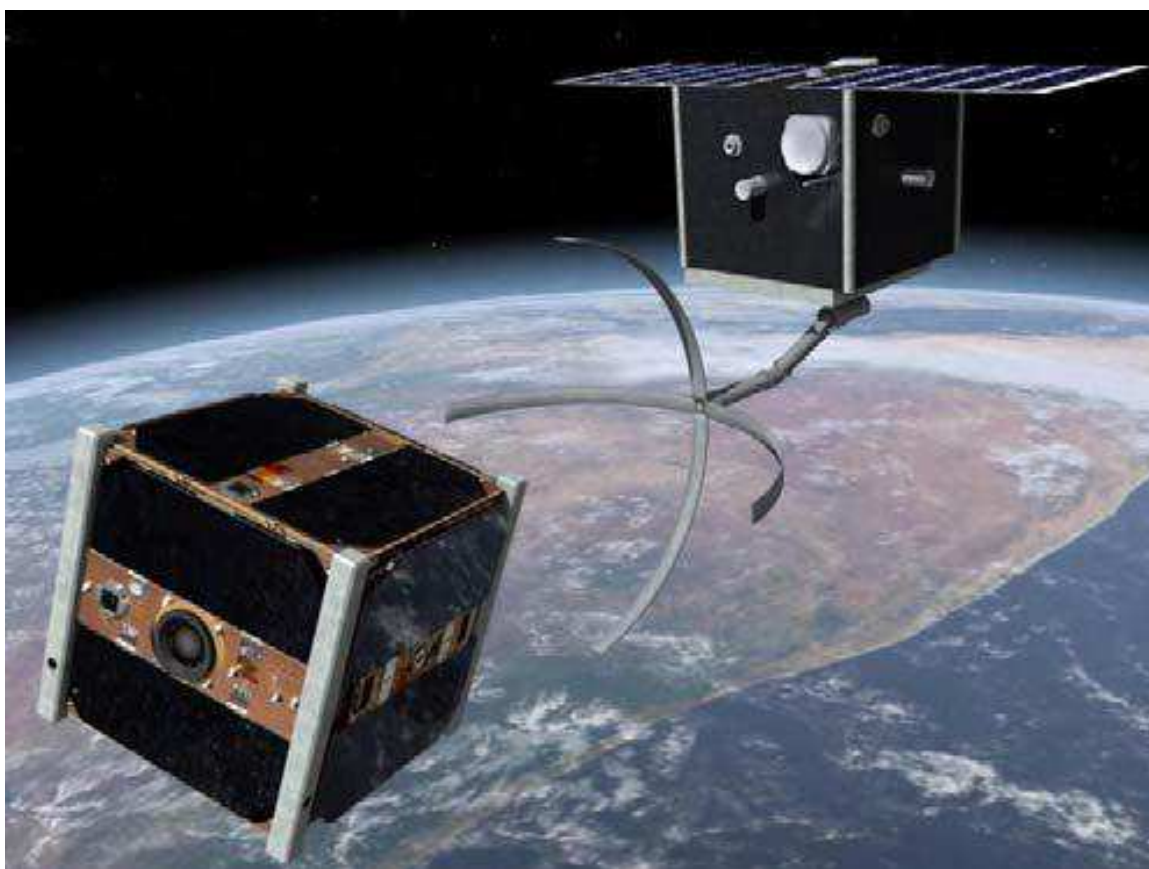


Рисунок 3 - Проект CleanSpace (Swiss Space Center)

2 Захват объектов космического мусора при помощи телескопической штанги с гарпуном в ее окончании, показанной на рисунке 4 (Harpoon (Astrium UK)).



Рисунок 4 - Концепция Harpoon (Astrium UK)

Гарпун, предложенный фирмой Astrium, признан наиболее подходящей технологией захвата космического мусора из всех технологий, исследованных Astrium за последние несколько лет. Его преимуществами являются: совместимость с различными типами космического мусора (последние ступени РН или космические аппараты); простота наземной отработки и сравнительная нечувствительность к скорости вращения объекта космического мусора или расположению точки ускорения. Система состоит из собственно гарпуна, пускового устройства и троса. Гарпун состоит из шипованного наконечника для обеспечения зацепления за объект космического мусора, разрушающегося пояса для контроля глубины проникновения наконечника, древка для взаимодействия с пусковой установкой и стабилизатора для наземных

испытаний. Пусковая установка гарпуна работает на сжатом азоте и может быть использована для запуска нескольких гарпунов, установленных на сервисном космическом аппарате. Сервисный КА после прицеливания и выстрела остаётся связанным с объектом космического мусора посредством гарпуна и троса Дунеета, который хранится на СКА, намотанным на катушку. Трос рассчитан на предельную нагрузку 1,6 кН.

Основные характеристики системы представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные характеристики гарпуна Astrium

Характеристика	Значение
Масса объекта КМ, кг	≤ 9000
Габариты системы, мм	585×400
Потребляемая мощность, Вт	20
Допустимая относительная скорость движения объекта КМ, м/с	0,01
Точность нацеливания, мм, на дистанции 10 м	50
Дальность стрельбы, м	≥ 10
Масса гарпуна, кг	1,3
Общая масса системы, кг	8 (для двух гарпунов)

Отдельно от собственно систем захвата разрабатывается система видеонаблюдения, используемая для точного автоматического нацеливания. В среднем, любая из рассмотренных систем будет иметь массу не более 30 кг.

3 С целью обслуживания на орбите для последующего перемещения объекта космического мусора на орбиту захоронения предполагается использовать роботизированную руку (Robotic arm).

Этот вид активного воздействия на объекты космического мусора заключается в создании жёсткой связи между сервисным КА и КМ с помощью манипулятора или автоматического зажима. К преимуществам данной схемы относится простота дальнейшего управления движением объекта космического мусора, а к недостаткам – необходимость компоновки и развёртывания достаточно длинной штанги в случае, если объектом космического мусора является КА с протяжёнными панелями солнечных батарей. Кроме того, задача образования связи СКА-КМ является труднореализуемой технической задачей

в связи с вращением фрагментов КМ. Примером подобного проекта может служить миссия DEOS, представленная на рисунке 5, немецкого центра авиации и космонавтики.

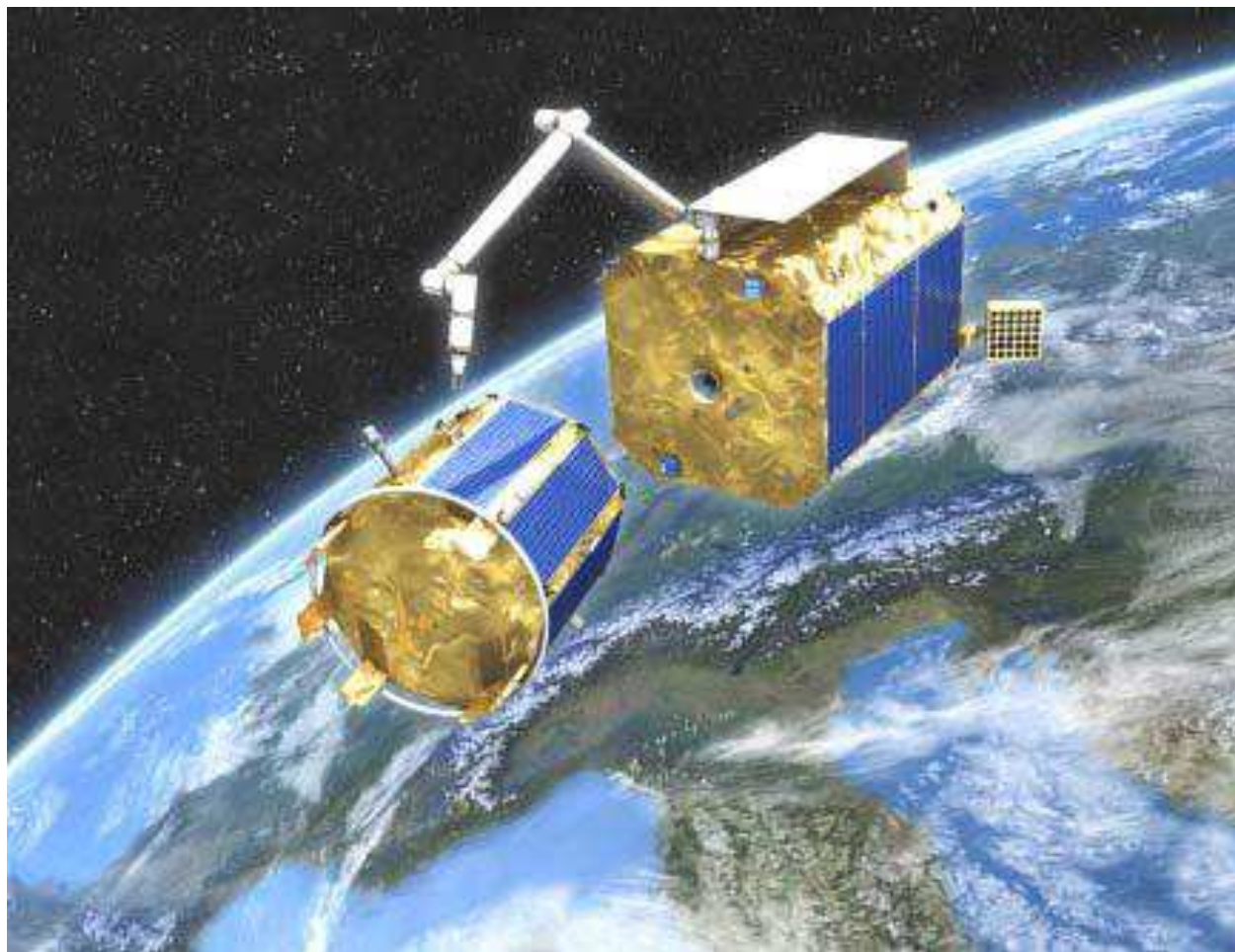


Рисунок 5 – Стыковка с помощью манипулятора (проект DEOS)

4 Проект Солнечный парус. Предполагает размещение на спутнике паруса, изображенного на рисунке 6, который будет раскрываться в случае выхода спутника из строя. Под давлением солнечного света парус выведет неисправный КА в атмосферу земли, где он сгорит.

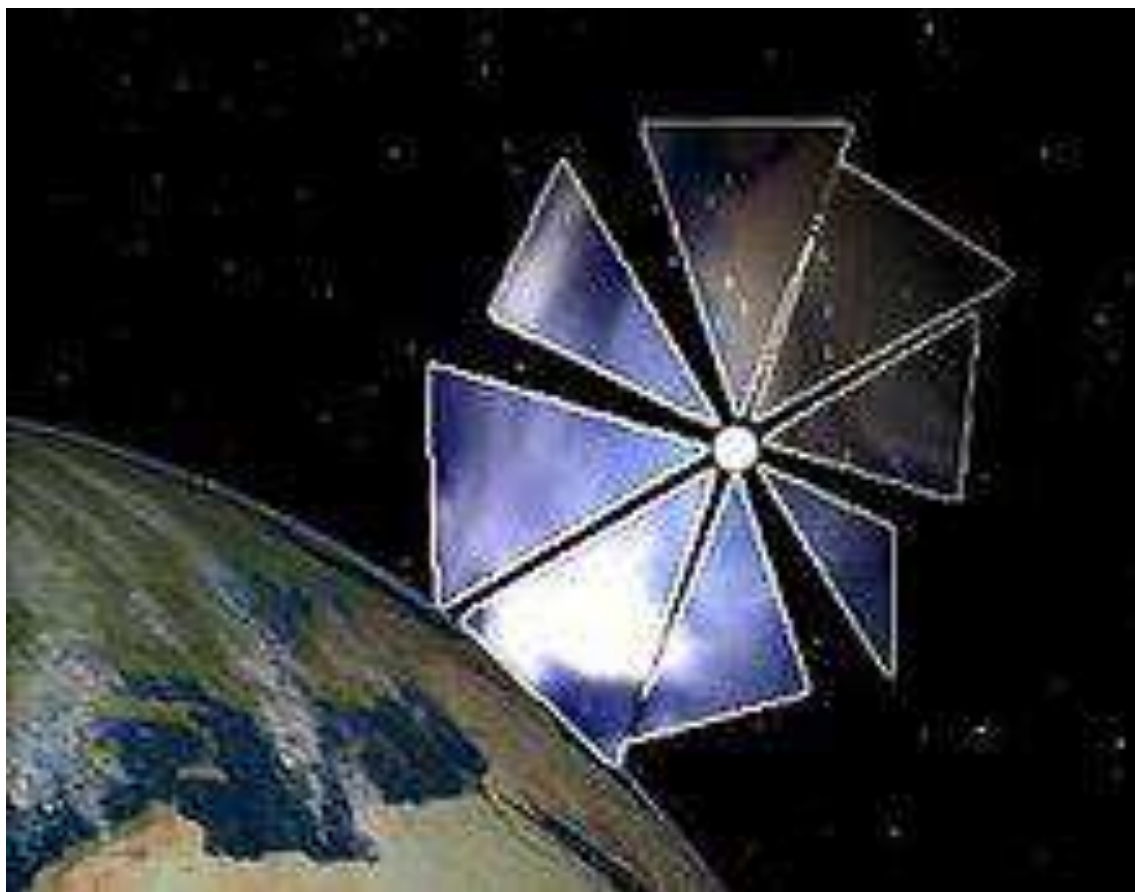


Рисунок 6 - Солнечный парус

Солнечный парус является пассивным средством увода объекта КМ, при этом не требуется расходовать рабочий объем топлива.

Проект солнечного паруса, был разработан в компаниях ATK Space Systems of Goleta (Калифорния, США) и L'Garde Inc., of Tustin (Калифорния, США). Испытания двадцатиметрового солнечного паруса были проведены в наземных условиях в 2004 г.

Использование солнечного паруса для увода объекта КМ с ГСО на орбиту захоронения теоретически возможно. Солнечный парус может находиться, как в составе уводимого КА так и доставляться с помощью сервисного КА, но в процессе увода необходимо обеспечивать программу ориентации солнечного паруса и процесс увода занимает длительное время. При массе КА 2000 кг и площади солнечного паруса 100 м^2 , максимальное ускорение равно 0,000456

мм/с², а время увода КА с ГСО на орбиту захоронения составит примерно один год и при этом необходимо управлять уводимым с ГСО объектом КМ.

5 Проект ConeXpress (European Space Agency). КА фотографирует объект КМ для более точного определения его габаритов и определения позиции. Затем пристыковывается к объекту КМ (отработанного КА), как показано на рисунке 7, и уводит его на орбиту захоронения. Затем возвращается на ГСО для стыковки и увода следующего объекта КМ.

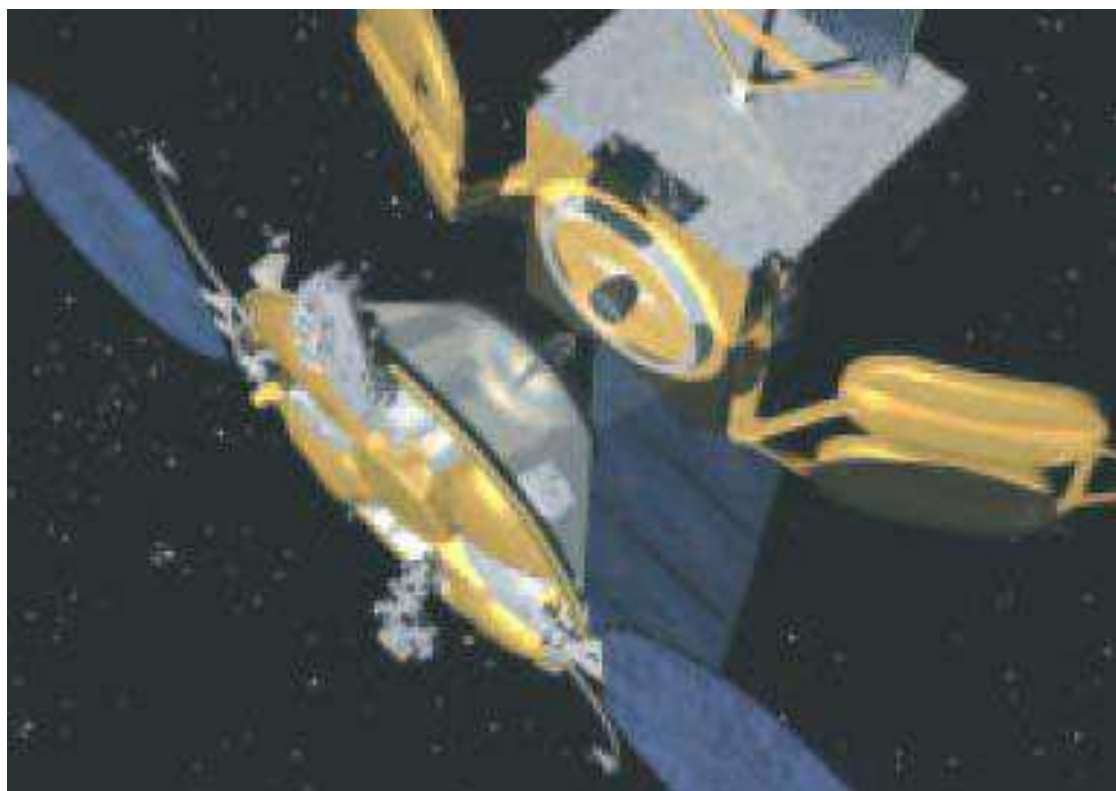


Рисунок 7 - Стыковка ConeXpress (слева) с клиентским спутником

Также одной из миссий проекта является продление срока службы телекоммуникационных спутников на высоких орбитах, включая ГСО. ConeXpress в транспортном положении располагается в конической части головного обтекателя, над основным спутником. Для ConeXpress планируется использовать стандартный конический адаптер как основу для всей

конструкции. Такое решение позволит вывести сервисный КА на геосинхронную орбиту стоимостью всего 35 млн. евро.

КА CX-OLEV (ConeXpress Orbital Life Extension Vehicle) представляет собой орбитальный буксир со стартовой массой 1400 кг (масса при стыковке 1200 кг), оснащенный солнечными батареями и электрореактивными двигательными установками, которые были использованы ЕКА для миссии на Луну SMART-1.

СКА после стыковки берет на себя управление положением и поддержанием орбиты связки обоих КА. Предусмотрена возможность расстыковки, для осуществления нескольких миссий.

Описанный метод уже используется для перемещения ОКМ аппаратами MEV (Mission Extension Vehicle) -1 и MEV (Mission Extension Vehicle) -2, запущенными на орбиту 09.10.2019 и 15.08.2020 соответственно.

КА может работать на геосинхронной орбите, первоначально специализируясь на обеспечении маневрирования спутников с малым запасом топлива. Последующие версии MEV будут включать усовершенствованную робототехнику, способную ремонтировать и, возможно, добавлять новые элементы к спутникам. MEV имеют возможность пристыковываться к соплу апогейного двигателя обслуживаемого спутника, как представлено на рисунке 8. После этого аппарат берет на себя функции по обеспечению поддержания орбиты и ориентации спутника.

Также миссия MEV подразумевает увод обслуживаемого КА на орбиту захоронения. 25.02.2020 г была осуществлена стыковка MEV-1 с условно нерабочим КА.



Рисунок 8 – Симулятор маневра стыковки КА MEV (справа) с обслуживаемым КА

6 Увод объектов КМ на орбиту захоронения при помощи ионного пучка изображен на рисунке 9.

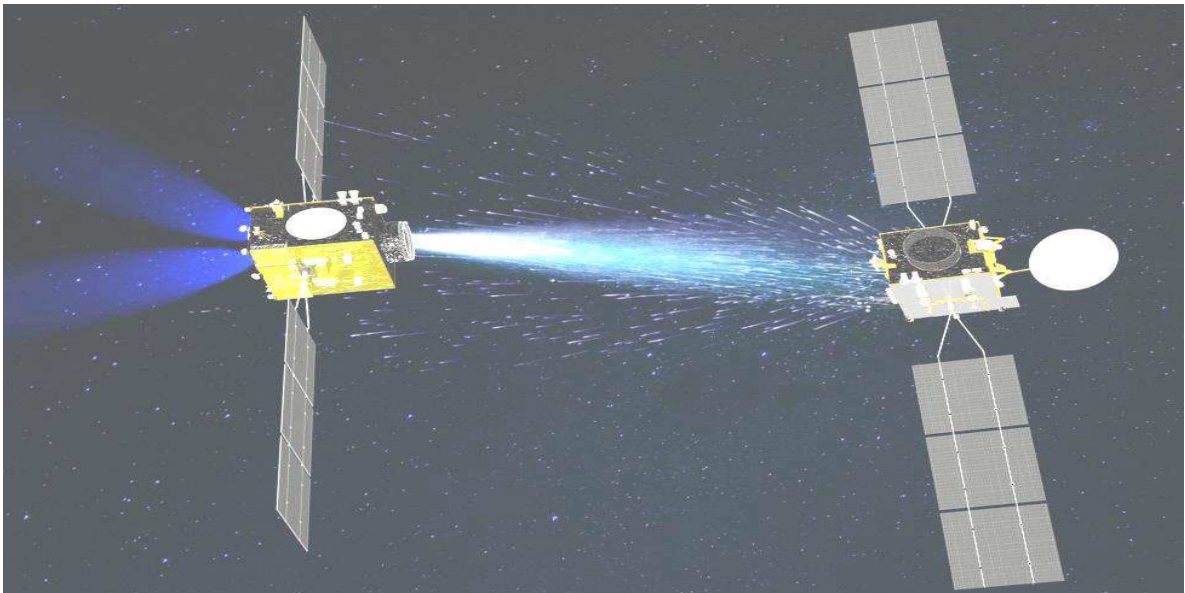


Рисунок 9 - Увод неуправляемого КА на орбиту захоронения при помощи ионного пучка

Воздействие ионного пучка может быть использовано для увода фрагментов КМ или КА в зону захоронения. Особенностью данного увода ОКМ является его многократность. Принципиальная схема воздействия ионного пучка для увода отработавших КА (КА-цели) приведена на рисунке 10.

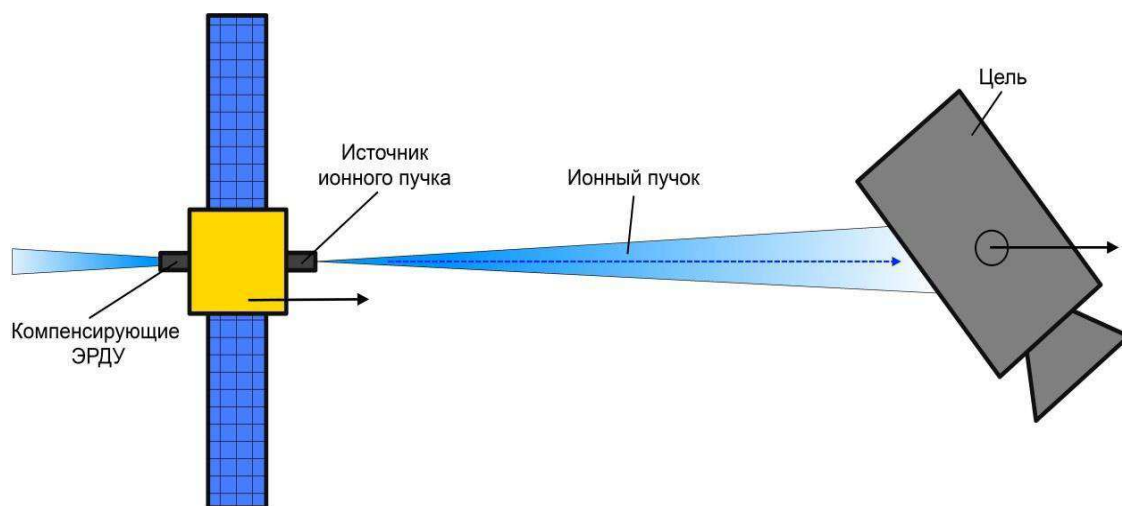


Рисунок 10 – Принципиальная схема использования ионного пучка для увода отработавших КА

Для обеспечения увода ОКМ в состав СКА входит высокочастотный источник ионного пучка и электроракетная двигательная установка (ЭРДУ) для компенсации тяги источника ионного пучка. Также ЭРДУ обеспечивают выполнение маневра возврата СКА с орбиты захоронения на ГСО. Схема функционирования СКА включает многократное повторение циклов, включающих манёвр сближения СКА с ОКМ на ГСО, перелет связки «СКА-ОКМ» по спиральной траектории с использованием трансверсальной тяги на орбиту захоронения и возвращение СКА обратно в зону ГСО к следующему ОКМ, подлежащему удалению на орбиту захоронения.

В момент нахождения КА в непосредственной близости от объекта КМ на борту генерируется высокоскоростной ионный пучок. Пучок ускоренной квазинейтральной плазмы, попадая на поверхность КА-цели, воздействует на него с некоторой силой, величина которой существенно зависит от угла

расходимости ионного пучка, распыления атомов на поверхности КА-цели, отклонения оси пучка от центра тяжести КА-цели и т.д.. Максимальное расстояние между КА и объектом космического мусора зависит от величины расходимости пучка и возможные его отклонения.

Количество удаляемых ОКМ из защищаемой области в окрестности ГСО будет зависеть, в основном, от располагаемой массы рабочего тела для ЭРДУ и источника ионного пучка, ресурса бортовых систем СКА; а также массы, орбитальных и динамических характеристик ОКМ, используемых алгоритмов управления СКА для сближения с ОКМ, транспортировки ОКМ и при выполнении межорбитальных перелетов возвращения в защищаемую область.

Известно, что для перевода объекта с геостационарной орбиты на орбиту захоронения ему необходимо сообщить приращение скорости около 11 м/с. Это приращение включает, для двухимпульсного манёвра, сначала подъём апогея текущей орбиты объекта, а затем подъём перигея обнуления эксцентриситета. Учитывая крайне низкий уровень тяг электрореактивных двигателей, двухимпульсный манёвр с их помощью невозможен, однако этот факт является одновременно преимуществом данной схемы очистки орбиты, поскольку позволяет использовать спиральную переходную траекторию. При движении сервисного космического аппарата по спиральной траектории, его маршевый ионный двигатель работает непрерывно, обеспечивая, одновременно, компенсацию тяги, генерируемой «толкающим» ионным двигателем. Оценка использования различных комбинаций толкающего и маршевого двигателей для удаления объектов космического мусора различной массы приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Основные характеристики манёвра удаления космического мусора различной массы различными комбинациями ионных двигателей.

Масса КМ, кг	Тяга, сообщаемая КМ, мН	Ускорение КМ, 10^{-5} м/с^2	Тяга ионного двигателя «А», мН	Тяга ионного двигателя «В», мН	Время увода КМ на орбиту захоронения, сутки	Время возврата СКА на ГСО, ч	Масса рабочего тела, кг
2000	10	0,5	40	45	25,2	75,6	66,2
	20	1	80	90	12,6	37,8	66,2
1000	10	1	40	50	12,6	75,6	36,7
	20	2	80	100	6,3	37,8	36,7

Однако, для успешной реализации подобной схемы необходимо выполнение нескольких ключевых требований:

- при транспортировке объектов КМ различной массы и при изменении массы СКА за счет расхода рабочего тела, требуется регулировка тяги компенсирующей ЭРДУ. Регулирование тяги компенсирующей ЭРДУ может осуществляться изменением массового расхода (с соответствующим изменением потребляемой электрической мощности). Для этого необходима разработка модуля газораспределения обеспечивающего плавную регулировку расхода рабочего тела в некотором диапазоне;

- при воздействии ионного пучка на КМ техногенной природы кроме силы в трансверсальном радиус-вектору орбиты направлении возникают силы в плоскости, ортогональной трансверсали, приводящие к смещению ОКМ в ионном пучке. Как результат, имеет место снижение коэффициента использования пучка;

- необходим малый угол расходимости ионного пучка – для эффективного использования рабочего тела необходимо, чтобы как можно большее его количество тратилось на выработку тяги для КМ;

– обеспечение минимального расстояния между объектом космического мусора и сервисным космическим аппаратом – поскольку создание нерасходящегося ионного пучка при существующих для СКА ограничениях по массе и энергетике является задачей технически неразрешимой, необходимо обеспечить минимизацию потерь за счёт максимального сближения КМ и СКА; например, для угла расходимости ионного пучка в три градуса на дистанции в 20 метров диаметр пятна воздействия ионного пучка на КМ составляет два метра, что соизмеримо с габаритами корпусов большинства работающих сейчас на ГСО космических аппаратов. Для обеспечения необходимого расстояния между сервисным КА и КМ необходима подсистема измерений и оптическая система на борту сервисного КА;

– отражённый от объекта космического мусора поток ионов должен оказывать минимальное воздействие на СКА. Это может достигаться, например, путём использования защитных экранов или исключением из зоны вероятного попадания отражённых ионов оптических поверхностей, а также панелей солнечных батарей.

В общем случае способы очистки орбиты от нефункционирующих КА можно разделить на две группы:

– использование встроенных устройств аварийного увода КА на орбиту захоронения;

– увод на орбиту захоронения при помощи специального КА.

Первая группа способов характеризуется необходимостью усложнять (и утяжелять) исходный КА при одновременном отсутствии гарантии срабатывания устройства аварийного увода КА в случае аварийного прекращения генерации электрической энергии на борту КА или, наоборот, наличием вероятности срабатывания устройства аварийного увода в момент, когда КА функционирование КА ещё можно восстановить.

Вторая группа требует создания особого класса КА – сервисных КА, – целевой задачей которых будет увод нефункционирующих КА на орбиты

захоронения. Несмотря на то, что создание такого класса КА требует затрат, как финансовых, так и временных (причём затрат не только на создание КА, а, в большей степени, на разработку новых технологий, необходимых такому КА для функционирования), универсальность такого подхода, позволяющая уводить на орбиту захоронения несколько КА (одновременно или по очереди), позволяет рассматривать его как основной при решении задачи очистки околоземных орбит от космического мусора.

Сервисный КА, решая задачу увода объекта КМ на орбиту захоронения, реализует алгоритм работы, состоящий в общем случае из 5 этапов.

1 Этап пассивного функционирования на орбите ожидания, во время которого сервисный КА находится в дежурном режиме, с ним поддерживается периодическая связь для сбора телеметрии, никаких целевых функций КА не выполняет. Этап необходим для определения (в Центре управления полётом – ЦУП) подходящих объектов для увода на орбиту захоронения. При работе на этом этапе сервисный КА находится на орбите, отличающейся по значению большой полуоси от орбит потенциальных объектов увода – для того, чтобы дрейф, обусловленный этим отличием, позволил сэкономить топливо для манёвра сближения сервисного КА с объектом КМ.

2 Этап сближения и осмотра объекта КМ. Характеризуется тем, что расстояние между сервисным КА и объектом КМ после сближения составляет не менее нескольких сотен метров, управление движением сервисного КА осуществляется по программе, заложенной из центра управления полетом, а целью этого этапа является получение информации о конструктивной целостности, ориентации в пространстве и параметрах вращательного движения объекта КМ.

3 Этап стыковки сервисного КА с объектом КМ. Заключается в окончательном сближении сервисного КА с объектом КА на расстояние от нескольких десятков метров до нескольких сантиметров и стыковки с ним.

Из активных способов стыковки с КМ предпочтение отдают следующим:

- с помощью робота - манипулятора, установленного на сервисном КА, происходит жесткий захват объекта КМ, после чего объект космического мусора на жесткой сцепке с сервисным космическим аппаратом подвергается управляемой буксировке на орбиту захоронения;
- захват объектов космического мусора при помощи телескопической штанги с гарпуном в ее окончании или выпущенной с сервисного космического аппарата сетью - ловушкой, после чего объект космического мусора на гибкой сцепке с сервисным космическим аппаратом подвергается управляемой буксировке на орбиту захоронения;
- бесконтактный способ заключается в выдаче необходимого импульса в направлении центра - масс вдоль вектора скорости объекта космического мусора путем воздействия на него струей потока частиц штаного или специального двигателя сервисного КА и последующий не управляемый полет КМ на орбиту захоронения.

4 Этап увода объекта космического мусора на орбиту захоронения. На данном этапе основной задачей является поддерживать стыковку сервисного космического аппарата с объектом космического мусора и не допустить возникновения возмущающих моментов со стороны объекта КМ, которые могут повлиять на точность осуществления коррекций увода и увеличить расход топлива системы коррекции сервисного КА.

5 Этап расстыковки, на котором требуется обеспечить безударную расстыковку сервисного КА с объектом КМ.

В процессе эксплуатации сервисного КА по удалению космического мусора с ГСО, как и в процессе эксплуатации любого другого КА, может возникнуть отказ одной или нескольких служебных систем, что может привести к нарушению управления аппаратом, и он сам может стать объектом космического мусора [4].

В связи с этим существует необходимость понимания целесообразности создания и запуска данного сервисного КА на орбиту. Для этих целей

необходимо разработать методику комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты.

При разработке методики необходимо учитывать следующие показатели:

- 1) стоимость аренды точки стояния на ГСО;
- 2) убытки от непредоставления услуг потребителям;
- 3) упущенная выгода от простоя точки ГСО;
- 4) стоимость эксплуатации сервисного КА;
- 5) стоимость эксплуатации нового КА на освобождаемой точке на ГСО;
- 6) сокращение времени запрета на использование точки стояния на ГСО по целевому назначению.

Исходя из приведенной в данной главе информации можно сказать, что не вызывает сомнения актуальность необходимости решения проблемы КМ на околоземных орбитах. Современные КА обладают высокой степенью надежности систем, что способствует уменьшению риска потери управления с ним, однако одновременное увеличение количества элементов аппаратуры КА и их усложнение не позволяет говорить о достижении 100% надёжности функционирования КА. Следовательно, прирост КМ будет представлять проблему при эксплуатации КА на околоземных орбитах, особенно на высоких, к которым относится ГСО и с которых практически невозможен увод КА за счёт внешних возмущений его орбиты. Снизить количество уже не функционирующих КА, представляющих собой КМ, на ГСО возможно только при помощи сервисного КА, осуществляющего принудительный увод таких КА на орбиты захоронения.

Реализация любого проекта по созданию КА требует тщательной проработки, в том числе и расчета технико-экономических показателей. Необходимо четко понимать целесообразность создания сервисного КА, а также представлять срок окупаемости такого проекта и все риски (в том числе финансовые), которые будут сопутствовать такому проекту.

С целью усовершенствования проектирования сервисного КА предлагается разработать методику оценки технико-экономической эффективности проекта по созданию сервисного КА, которая позволит на начальном этапе проектирования определить ряд обобщённых показателей эффективности (например, срок окупаемости проекта, индекс доходности и т.д.), чтобы в дальнейшем использовать их в технико-экономическом обосновании проекта или, возможно, для корректировки проектного облика КА.

2 Разработка методики комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного КА для удаления космического мусора с геостационарной орбиты

2.1 Экономическая модель создания и эксплуатации космического аппарата связи.

Жизненный цикл КА включает в себя следующие укрупненные этапы [4]:

- проведение опытно-конструкторских работ (ОКР);
- эксплуатация космического аппарата в течение времени $t_Э$ в пределах гарантированного срока $t_{ГС}$ ($t_Э \leq t_{ГС}$);
- вывод из эксплуатации.

Этап ОКР охватывает период времени от принятия решения о начале работ (выпуск технического задания, заключение контракта) до завершения ввода КА в целевое использование после выведения КА на орбиту в рабочую точку с предъявлением его Заказчику по результатам положительных предварительных проверок и связан с большими разовыми затратами. На этапе эксплуатации КА за счет целевого использования (информационное обеспечение) возникает доход, суммарная величина которого, для получения Заказчиком прибыли от эксплуатации КА, должна превысить в конце срока $t_{ГС}$ затраты на ОКР.

Базовые затраты на проведение опытно-конструкторских работ включают в себя затраты на разработку, изготовление спутника и его составных частей, подготовку и запуск КА на рабочую орбиту.

Текущий чистый доход ($C_{тчд}$) – это сумма потока платежей, приведённых к сегодняшнему дню. Представляет собой разницу между всеми денежными поступлениями и затратами, приведёнными к текущему моменту времени (моменту оценки инвестиционного проекта). Он показывает величину денежных средств, которую инвестор ожидает получить от проекта, после того,

как денежные поступления окупят его первоначальные инвестиции и периодические денежные затраты, связанные с осуществлением проекта.

Общая модель получения текущего чистого дохода от проекта (КА) по аналогии с инвестиционным проектом определяется уравнением

$$C_{\text{тчд}} = (C_{\text{уд}} - C_{\text{ур}}) \cdot t_{\text{э}} - C_{\text{ОКРб}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{уд}}$ – удельные доходы от эксплуатации КА;

$C_{\text{ур}}$ – удельные расходы на эксплуатацию КА;

$C_{\text{ОКРб}}$ – базовые затраты на проведение ОКР (изготовление КА и запуск его на орбиту).

Слагаемые в уравнении (1) принимаются, в первом приближении, не зависящими от гарантированного срока эксплуатации ($t_{\text{ГС}}$).

Приведенная функциональная зависимость текущего чистого дохода от времени является знакопеременной: на начальном этапе создания спутника она отрицательная, а с появлением дохода она со временем становится положительной и в конце эксплуатации ($t_{\text{э}} = t_{\text{ГС}}$) превращается в суммарный чистый доход $C_{\text{счд}}$, определяемый по формуле

$$C_{\text{счд}} = (C_{\text{уд}} - C_{\text{ур}}) \cdot t_{\text{ГС}} - C_{\text{ОКРб}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{уд}}$ – удельные доходы от эксплуатации КА;

$C_{\text{ур}}$ – удельные расходы на эксплуатацию КА;

$C_{\text{ОКРб}}$ – базовые затраты на проведение ОКР (изготовление КА и запуск его на орбиту);

$t_{\text{ГС}}$ – гарантированный срок эксплуатации.

Важным показателем экономической эффективности проекта, определяющим коммерческую целесообразность, является срок окупаемости проекта. Срок окупаемости – период времени, необходимый для того, чтобы доходы, генерируемые инвестициями, покрыли инвестиции. Этот показатель

определяют последовательным расчётом чистого дохода для каждого этапа проекта. Временная точка, в которой чистый доход примет положительное значение, будет являться точкой окупаемости [5].

Из общей модели получения текущего чистого дохода от проекта, представленной в уравнении (1) можно определить срок окупаемости базовых затрат $t_{об}$ на проведение ОКР, полагая $C_{т.ч.д.} = 0$, уравнением

$$t_{об} = \frac{C_{ОКРб}}{C_{уд} - C_{ур}}, \quad (3)$$

где $C_{уд}$ – удельные доходы от эксплуатации КА;

$C_{ур}$ – удельные расходы на эксплуатацию КА;

$C_{ОКРб}$ – базовые затраты на проведение ОКР (изготовление КА и запуск его на орбиту).

Чтобы избавиться в расчёте суммарного чистого дохода от величин $C_{уд}$ и $C_{ур}$, являющихся функциями времени, выразим из уравнения (3) $(C_{уд} - C_{ур})$ и подставим полученное выражение в уравнение суммарного чистого дохода от эксплуатации спутника $C_{счд}$, представленном в уравнении (2).

$$C_{счд} = C_{ОКРб} \cdot \left(\frac{t_{ГС}}{t_{об}} - 1 \right), \quad t_{об} \leq t_{ГС}, \quad (4)$$

где $t_{об}$ – срок окупаемости базовых затрат;

$C_{ОКРб}$ – базовые затраты на проведение ОКР (изготовление КА и запуск его на орбиту);

$t_{ГС}$ – гарантированный срок эксплуатации.

Для сравнительного анализа проектов различных КА будем использовать относительный безразмерный показатель экономической эффективности проекта – индекс доходности. Индексом доходности инвестиций принято считать отношение дохода от проекта к объёму инвестиций. Если значение индекса доходности инвестиций меньше единицы, это означает, что проект не

окупится; равно единице – проект окупится, но не принесёт прибыли; больше единицы – проект принесёт прибыль. На основании формулы (4) определим выражение (5) для расчета индекса доходности ($K_{ид}$) проекта [6]:

$$K_{ид} = \frac{C_{счд}}{C_{ОКР6}} = \frac{t_{ГС}}{t_{об}} - 1, \quad (5)$$

где $t_{об}$ – срок окупаемости базовых затрат;

$C_{ОКР6}$ – базовые затраты на проведение ОКР (изготовление КА и запуск его на орбиту);

$t_{ГС}$ – гарантированный срок эксплуатации;

$C_{счд}$ – суммарный чистый доход.

Исходя из условия $K_{ид} \geq 1$ (гарантированный возврат затрат на ОКР), находим по формуле (5) верхнюю границу срока окупаемости базовых затрат:

$$t_{об} \leq 0,5t_{ГС}, \quad (6)$$

где $t_{ГС}$ – гарантированный срок эксплуатации;

2.2 Экономическая модель создания и эксплуатации сервисного космического аппарата.

Основной целью для СКА являются объекты космического мусора, представляющие собой КА информационного обеспечения на ГСО, управление которыми нарушено в результате каких-либо аномалий природного (повреждение КА метеороидным потоком или воздействие высокоомощного импульса электромагнитного излучения) или техногенного (отказ одной или нескольких систем КА в результате нарушения технологии изготовления или эксплуатации за пределами расчётных режимов) характера.

Жизненный цикл сервисного КА подобен жизненному циклу КА связи и характеризуется наличием следующих укрупненных этапов:

- проведение опытно-конструкторских работ (ОКР);
- эксплуатация в течение времени $t_{\text{э}}$ в пределах гарантированного срока $t_{\text{ГС}}$ ($t_{\text{э}} \leq t_{\text{ГС}}$);
- вывод из эксплуатации.

Этап ОКР охватывает период времени от принятия решения о начале работ (выпуск технического задания, заключение контракта) до завершения ввода КА в целевое использование, после выведения СКА на орбиту с высотой на 300 км больше высоты ГСО.

Эксплуатация СКА заключается в многократной реализации сближения с объектами КМ и увода объектов КМ с рабочей орбиты (ГСО) на орбиту захоронения. Максимальное число объектов, транспортируемых одним СКА за срок его активного существования $t_{\text{ГС.СКА}}$, определяется уравнением

$$n_{\text{ТО}} = \frac{t_{\text{ГС.СКА}}}{t_{\text{ув}}} \leq n_{\text{ТС}}, \quad n_{\text{ТС}} = \frac{2\pi}{\Delta\alpha}, \quad (7)$$

где $t_{\text{ув}}$ – длительность увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения, алгоритм увода описан в Главе 1;

$n_{\text{ТО}}$ – число транспортируемых объектов;

$n_{\text{ТС}}$ – общее число точек стояния на ГСО;

$t_{\text{ГС.СКА}}$ – гарантированный срок эксплуатации сервисного космического аппарата;

$\Delta\alpha$ – диапазон по долготе, выделенный под точку стояния (точность удержания геостационарного КА в точке стояния).

Если КА на ГСО выходит из строя, он некоторое время остаётся в своей точке стояния, а затем начинает дрейфовать вдоль ГСО. То есть сначала негативный эффект наличия неисправного КА на ГСО заключается в невозможности замены этого КА новым, рабочим КА (если у оператора такой

есть на орбите или в состоянии стартовой готовности на Земле), а затем – в возникновении риска столкновения с другими КА на ГСО. Таким образом, убытки, вызванные аварийной потерей управления КА на ГСО, можно разделить на четыре категории:

- 1) расходы, связанные с изготовлением (при отсутствии резервного КА) и запуском на орбиту спутника для замены аварийного КА;
- 2) убытки от невозможности эксплуатировать рабочую точку на ГСО;
- 3) снижение доходности работоспособных КА в других рабочих точках на ГСО вследствие сокращения времени их активного функционирования из-за необходимости дополнительного маневрирования;
- 4) повышение страховой премии на действующий КА при возникновении неуправляемого КА, угрожающего уже находящимся на орбите эксплуатируемым и вновь запускаемым КА.

Первая категория убытков может отсутствовать, если у оператора спутника связи не предусмотрена замена аварийного КА, или если вышедший из строя аппарат заменяется другим КА этого оператора путём перевода действующего КА в рабочую точку аварийного КА.

Вторая категория убытков связана как с потерей абонентской платы клиентов, которым не может быть предоставлена услуга, так и с необходимостью арендовать рабочую точку на ГСО (кроме случая, когда оператор является компанией в собственности государства с закреплённым на международном уровне перечнем рабочих точек в собственности).

Третья категория убытков образуется в результате дополнительного расхода рабочего тела активных КА, вынужденных совершать манёвры уклонения от столкновения с ОКМ. Поскольку необходимый запас рабочего тела является определяющим фактором для продления эксплуатации КА за пределами гарантийного срока активного существования, дополнительное маневрирование снижает возможный доход оператора спутниковой связи, что в данной ситуации можно отнести к потенциальным убыткам. В случае, если дополнительное маневрирование в будущем гарантированно приведёт к

нехватке рабочего тела системы коррекции КА для удержания в рабочей точке на ГСО в течение всего срока активного существования, необходимость такого маневрирования будет являться прямыми убытками для спутникового оператора.

Четвертая категория убытков снижает доходность работоспособных КА в других рабочих точках на ГСО вследствие увеличения страховой премии. Появление в непосредственной близости от действующего КА объекта КМ значительно увеличивает риск его повреждения и выхода из строя раньше окончания САС. Страховые компании учитывают этот риск, изменяя при этом страховую премию в сторону увеличения.

Каждая из вышеперечисленных категорий убытков имеет свой вес при расчете рентабельности проекта по созданию сервисного космического аппарата для удаления объектов космического мусора с геостационарной орбиты. В предлагаемой методике технико-экономического обоснования эффективности использования сервисного космического аппарата предлагается учитывать эти убытки путем применения понижающего коэффициента убыточности (K_y).

Доход от эксплуатации СКА заключается в сокращении времени запрета t_3 на использование точки стояния на ГСО по целевому назначению (отсутствие информационного обеспечения), которое соответствует времени, необходимому для запуска резервного КА на орбиту (и, при необходимости, изготовления этого резервного КА) или времени, затрачиваемому сервисным КА на сближение с отказавшим КА и увод его на безопасное расстояние:

$$t_3 = \begin{cases} t_{\text{пер}} - \text{нет СКА} \\ t_{\text{ув}} - \text{есть СКА} \end{cases}, \quad (8)$$

где $t_{\text{пер}}$ – максимальное время перерыва в замене отказавшего КА;

$t_{\text{ув}}$ – длительность увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения.

Полагаем, что при сокращении времени запрета на использование точки стояния за счёт применения СКА получим дополнительный доход $C_{\text{доп}}$ от целевого использования КА в этой точке, который, с учётом выражения (3), будет определяться уравнением:

$$C_{\text{доп}} = (C_{\text{уд}} - C_{\text{ур}}) \cdot (t_{\text{пер}} - t_{\text{ув}}) \cdot K_y = C_{\text{ОКР.КА}} \cdot K_y \cdot \frac{t_{\text{пер}} - t_{\text{ув}}}{t_{\text{об}}}, \quad (9)$$

где $C_{\text{ОКР.КА}}$ – затраты на ОКР связного КА;

$t_{\text{пер}}$ – максимальное время перерыва в предоставлении услуг связи, вызванное необходимостью замены отказавшего КА;

$t_{\text{ув}}$ – длительность увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения;

$t_{\text{об}}$ – срок окупаемости базовых затрат;

$C_{\text{уд}}$ – удельные доходы от эксплуатации КА;

$C_{\text{ур}}$ – удельные расходы на эксплуатацию КА;

K_y – коэффициента убыточности.

В результате суммарный чистый доход от применения СКА может быть представлен в следующем виде

$$C_{\text{СКА}} = C_{\text{доп}} \cdot n_{\text{ТО}} \cdot K_{\text{заг}} - C_{\text{ОКР.СКА}}, \quad (10)$$

где $K_{\text{заг}}$ – коэффициент загрузки СКА по обслуживанию ГСО, то есть доля функционирования СКА по целевому назначению от всего времени активного существования СКА;

$C_{\text{доп}}$ – дополнительный доход;

$C_{\text{ОКР.СКА}}$ – затраты на ОКР сервисного КА;

$n_{\text{ТО}}$ – число транспортируемых объектов.

Для повышения дохода от эксплуатации СКА необходимо стремиться к тому, чтобы коэффициент загрузки был максимальным, то есть новая цель для увода на орбиту захоронения должна быть известна ещё до окончания этапа увода предыдущей цели.

На основании формул (9) (10) определим выражение для расчета относительного безразмерного показателя экономической эффективности создаваемого проекта, т. н. индекс доходности проекта по созданию СКА:

$$K_{\text{ид.СКА}} = \frac{C_{\text{СКА}}}{C_{\text{ОКР.СКА}}} = n_{\text{ТО}} \cdot K_{\text{заг}} \cdot K_{\text{у}} \cdot \frac{t_{\text{пер}} - t_{\text{ув}}}{t_{\text{об.КА}}} \cdot \frac{C_{\text{ОКР.КА}}}{C_{\text{ОКР.СКА}}} - 1, \quad (11)$$

где $C_{\text{ОКР.СКА}}$ – затраты на ОКР сервисного КА;

$C_{\text{ОКР.КА}}$ – затраты на ОКР связного КА;

$t_{\text{пер}}$ – максимальное время перерыва в предоставлении услуг связи, вызванное необходимостью замены отказавшего КА;

$t_{\text{ув}}$ – длительность увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения;

$t_{\text{об.КА}}$ – срок окупаемости базовых затрат КА связи;

$C_{\text{СКА}}$ – суммарный чистый доход от применения СКА;

$K_{\text{у}}$ – коэффициента убыточности;

$n_{\text{ТО}}$ – число транспортируемых объектов;

$K_{\text{заг}}$ – коэффициент загрузки СКА по обслуживанию ГСО.

Из выражения (11) видно, что индекс доходности проекта по созданию СКА, в отличие от индекса доходности создания КА связи, зависит не только от времени эксплуатации СКА, но и от затрат на изготовление КА связи для замены нефункционирующего КА.

В том случае, если у оператора нет возможности или необходимости выводить резервный КА на орбиту, доходом от проекта может считаться

возможный доход от сдачи в аренду освобожденной точки на ГСО другим пользователям.

Исходя из условия $K_{ид} \geq 1$ (гарантированный возврат затрат на ОКР) находим по формуле (10) верхнюю границу окупаемости базовых затрат

$$K_{ид.СКА} \geq 1, \quad \frac{C_{ОКР.СКА}}{C_{ОКР.КА}} \leq 0,5 \cdot n_{ТО} \cdot K_{заг} \cdot K_y \cdot \frac{t_{пер} - t_{ув}}{t_{об.КА}}, \quad (12)$$

где $C_{ОКР.СКА}$ – затраты на ОКР сервисного КА;

$C_{ОКР.КА}$ – затраты на ОКР связного КА;

$t_{пер}$ – максимальное время перерыва в предоставлении услуг связи, вызванное необходимостью замены отказавшего КА;

$t_{ув}$ – длительность увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения;

$t_{об.КА}$ – срок окупаемости базовых затрат КА связи;

$n_{ТО}$ – число транспортируемых объектов;

$K_{заг}$ – коэффициент загрузки СКА по обслуживанию ГСО;

K_y – коэффициента убыточности.

Полагая, в соответствии с выражением (6), $t_{об.КА} = 0,5t_{ГС.КА}$ и подставляя это уравнение совместно с выражением (7) для $n_{ТО}$ в формулу (12), получим

$$\frac{C_{ОКР.СКА}}{C_{ОКР.КА}} \leq \left(\frac{t_{пер}}{t_{ув}} - 1 \right) \cdot \frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}} \cdot K_y \cdot K_{заг}, \quad (13)$$

где $C_{ОКР.СКА}$ – затраты на ОКР сервисного КА;

$C_{ОКР.КА}$ – затраты на ОКР связного КА;

$t_{пер}$ – максимальное время перерыва в предоставлении услуг связи, вызванное необходимостью замены отказавшего КА;

$t_{ув}$ – длительность увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения;

$t_{ГС.КА}$ – гарантированный срок эксплуатации связного КА;

$t_{ГС.СКА}$ – гарантированный срок эксплуатации сервисного КА;

$K_{заг}$ – коэффициент загрузки СКА по обслуживанию ГСО;

K_y – коэффициента убыточности.

Исходя из того, что для каждого отдельного случая структура и содержание каждой из описанных выше категорий убытков уникальна, на данном этапе невозможно прогнозировать их вес при расчетах. В связи с этим при разработке методики вводим допущение $K_y = 1$.

Анализ неравенства (13) позволяет выявить следующие закономерности:

- если время перерыва на замещение КА на орбите другим КА меньше времени увода КА на безопасное расстояние при помощи СКА, отношение $C_{ОКР.СКА}/C_{ОКР.КА}$ становится меньше нуля, и применение СКА нецелесообразно;

- если время перерыва на замещение КА на орбите равно времени увода СКА имеет смысл использовать только в случае равенства нулю $C_{ОКР.СКА}$ – то есть привлекать СКА уже находящийся на орбите, например с целью повышения значения его $K_{заг}$;

- в случае когда время перерыва на замещение КА больше времени увода, допустимая величина $C_{ОКР.СКА}$ зависит от конкретных значений $\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$, $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$ и $K_{заг}$ и должна быть оценена для каждого конкретного случая отдельно.

Также рентабельность проекта по созданию СКА можно увеличить следующими способами:

1) увеличением коэффициента загрузки СКА до значения, максимально близкого к единице;

2) сдачей СКА в аренду другим операторам для очистки закреплённых за ними точек стояния на ГСО.

2.3 Методика комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты

Основой методики комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты является неравенство (13):

$$\frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} \leq \left(\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} - 1 \right) \cdot \frac{t_{\text{ГС.СКА}}}{t_{\text{ГС.КА}}} \cdot K_{\text{заг}} \quad (13)$$

Данное неравенство дает возможность определить максимальную стоимость проекта на создание сервисного космического аппарата, при которой проект может считаться рентабельным, с учетом заданных условий по сроку активного существования сервисного космического аппарата и длительности увода сервисным КА неисправного КА связи на орбиту захоронения.

При преобразовании неравенства (13) можно получить выражения для определения максимальной длительности увода КА на орбиту захоронения:

$$\begin{aligned} \left(\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} - 1 \right) &\geq \frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} \cdot \frac{t_{\text{ГС.КА}}}{t_{\text{ГС.СКА}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{заг}}} \\ \frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} &\geq \frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} \cdot \frac{t_{\text{ГС.КА}}}{t_{\text{ГС.СКА}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{заг}}} + 1 \\ t_{\text{ув}} &\leq \frac{C_{\text{ОКР.КА}} \cdot t_{\text{ГС.СКА}} \cdot K_{\text{заг}}}{(C_{\text{ОКР.СКА}} \cdot t_{\text{ГС.КА}} + C_{\text{ОКР.КА}} \cdot t_{\text{ГС.СКА}} \cdot K_{\text{заг}})} \cdot t_{\text{пер}}, \end{aligned} \quad (14)$$

и для минимального гарантированного срока активного существования:

$$\begin{aligned} \frac{t_{\text{ГС.СКА}}}{t_{\text{ГС.КА}}} &\geq \frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} - 1 \right)} \cdot \frac{1}{K_{\text{заг}}}, \\ t_{\text{ГС.СКА}} &\geq \frac{C_{\text{ОКР.СКА}} \cdot t_{\text{ГС.КА}}}{\left(\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} - 1 \right) \cdot C_{\text{ОКР.КА}} \cdot K_{\text{заг}}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $C_{\text{ОКР.СКА}}$ – затраты на ОКР сервисного КА;

$C_{\text{ОКР.КА}}$ – затраты на ОКР связного КА;

$t_{\text{пер}}$ – максимальное время перерыва в предоставлении услуг связи, вызванное необходимостью замены отказавшего КА;

$t_{\text{ув}}$ – длительность увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения;

$t_{\text{ГС.КА}}$ – гарантированный срок эксплуатации связного КА;

$t_{\text{ГС.СКА}}$ – гарантированный срок эксплуатации сервисного КА;

$K_{\text{заг}}$ – коэффициент загрузки СКА по обслуживанию ГСО.

Полученная система неравенств позволяет определить область эффективного применения СКА при наличии разного рода исходных данных:

1) при наличии ограничения по гарантийному сроку активного существования сервисного космического аппарата и ограничения по времени увода неуправляемого КА связи на орбиту захоронения можно определить максимальную стоимость проекта по созданию СКА;

2) при наличии ограничения по затратам на ОКР по созданию СКА и ограничения по гарантийному сроку активного существования сервисного космического аппарата, (например, исходя из предельной массы рабочего тела) можно определить максимальный период времени увода неуправляемого КА связи на орбиту захоронения, то есть сформулировать требования к системе коррекции;

3) при наличии ограничения по затратам на ОКР по созданию СКА и ограничения по времени увода неуправляемого КА связи на орбиту захоронения (например, исходя из технических характеристик двигательных установок) можно определить минимальный гарантийный срок активного существования сервисного космического аппарата, то есть сформулировать требования к надёжности СКА.

Исходя из предполагаемых возможностей технических систем КА, например, двигательных установок, и параметров КА, например массы рабочего тела, можно сформулировать ограничения по техническим характеристикам аппарата, рассчитать предполагаемую стоимость изготовления и сделать вывод о целесообразности проекта.

Также, для увеличения доходности СКА предлагается не исключать возможность для сдачи СКА в аренду иным держателям точек ГСО для их очистки в случае потребности.

Сдача в аренду другим операторам СКА целесообразна в случае, если арендная плата за пользование СКА будет превышать суммарный чистый доход от применения СКА. Расчет арендной платы будет производиться согласно уравнению

$$AP = t_{ув} \cdot (C_{уд} - C_{ур}), \quad (16)$$

где $C_{уд}$ – удельные доходы от эксплуатации КА;

$C_{ур}$ – удельные расходы на эксплуатацию КА;

$t_{ув}$ – длительность увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения.

В случае, когда предполагается исключительно сдавать СКА в аренду, на основании выражений (10) и (16) можно рассчитать суммарный чистый доход от применения СКА по формуле

$$C_{СКА} = t_{ув} \cdot (C_{уд} - C_{ур}) \cdot n_{ТО} \cdot K_{заг} - C_{ОКР.СКА}, \quad (17)$$

где $K_{заг}$ – коэффициент загрузки СКА по обслуживанию ГСО;

$C_{ОКР.СКА}$ – затраты на ОКР сервисного КА;

$n_{ТО}$ – число транспортируемых объектов;

$C_{уд}$ – удельные доходы от эксплуатации КА;

$C_{ур}$ – удельные расходы на эксплуатацию КА;

$t_{ув}$ – длительность увода КА из рабочей зоны ГСО на орбиту захоронения.

В случае исключительной сдачи СКА в аренду, так же как и в случае применения СКА для увода объектов КМ на орбиту захоронения, необходимо обеспечить максимальный уровень $K_{зар}$. Для обеспечения необходимого уровня коэффициента загрузки необходимо на стадии проекта изучить степень востребованности СКА и определить потенциальных заказчиков услуги аренды СКА.

Если при расчетах суммарный чистый доход от сдачи исключительно в аренду будет равен, либо будет превосходить суммарный чистый доход от применения СКА для увода объектов КМ на орбиту захоронения, то целесообразней сдать его в аренду на весь срок активного существования.

Сравнивая выражения (10) и (17) получаем следующий результат: в случае, когда $t_{ув} > 0,5 \cdot t_{пер}$, доход от сдачи в аренду будет превышать доход от использования СКА для увода неисправного сервисного аппарата на орбиту захоронения, следовательно, целесообразнее сдать СКА в аренду.

Разработанная методика комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты дает возможность установить зависимость между экономическими и техническими показателями проекта создания СКА, и определить на стадии разработки проекта требуемые технические характеристики аппарата, обосновать расчеты основных показателей ликвидности проекта и обозначить условия, при которых проект может быть рентабелен.

3 Графический анализ методики комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты

3.1 Графический анализ методики

Для анализа технико-экономической эффективности использования сервисного КА для удаления космического мусора с орбиты используем неравенство (13).

Графический анализ проводится путём построения зависимости величин, входящих в неравенство (13), друг от друга, с учетом следующего допущения: поскольку САС КА определяется, в первую очередь, ресурсом бортовой аппаратуры, а бортовая аппаратура СКА в большей части предполагается идентичной бортовой аппаратуре КА, максимальное значение отношения $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$ принимаем равным 1 (то есть $t_{ГС.СКА} = t_{ГС.КА} = 15$ лет).

В процессе анализа графиков решается задача определения зависимости значений отношения $\frac{C_{ОКР.СКА}}{C_{ОКР.КА}}$ от ограничений на длительность увода неработоспособного КА на орбиту захоронения, а также минимального гарантированного срока активного существования КА при различных планируемых коэффициентах загрузки $K_{заг}$.

Зависимости значений отношения $\frac{C_{ОКР.СКА}}{C_{ОКР.КА}}$ от значений отношений $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$ и $\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ при различных значениях коэффициента загрузки $K_{заг}$ представлены в таблицах 4 - 8; графическое отображение этой зависимости – на рисунках 11 - 15.

Таблица 4 – Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значений

отношений $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$ и $\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ при $K_{зар} = 1$

$\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ \ $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
2,5	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	1,05	1,2	1,35	1,5
3	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
3,5	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
4	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3
4,5	0,35	0,7	1,05	1,4	1,75	2,1	2,45	2,8	3,15	3,5
5	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
5,5	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6	4,05	4,5
6	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
6,5	0,55	1,1	1,65	2,2	2,75	3,3	3,85	4,4	4,95	5,5
7	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6
7,5	0,65	1,3	1,95	2,6	3,25	3,9	4,55	5,2	5,85	6,5
8	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7
8,5	0,75	1,5	2,25	3	3,75	4,5	5,25	6	6,75	7,5
9	0,8	1,6	2,4	3,2	4	4,8	5,6	6,4	7,2	8
9,5	0,85	1,7	2,55	3,4	4,25	5,1	5,95	6,8	7,65	8,5
10	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	6,3	7,2	8,1	9

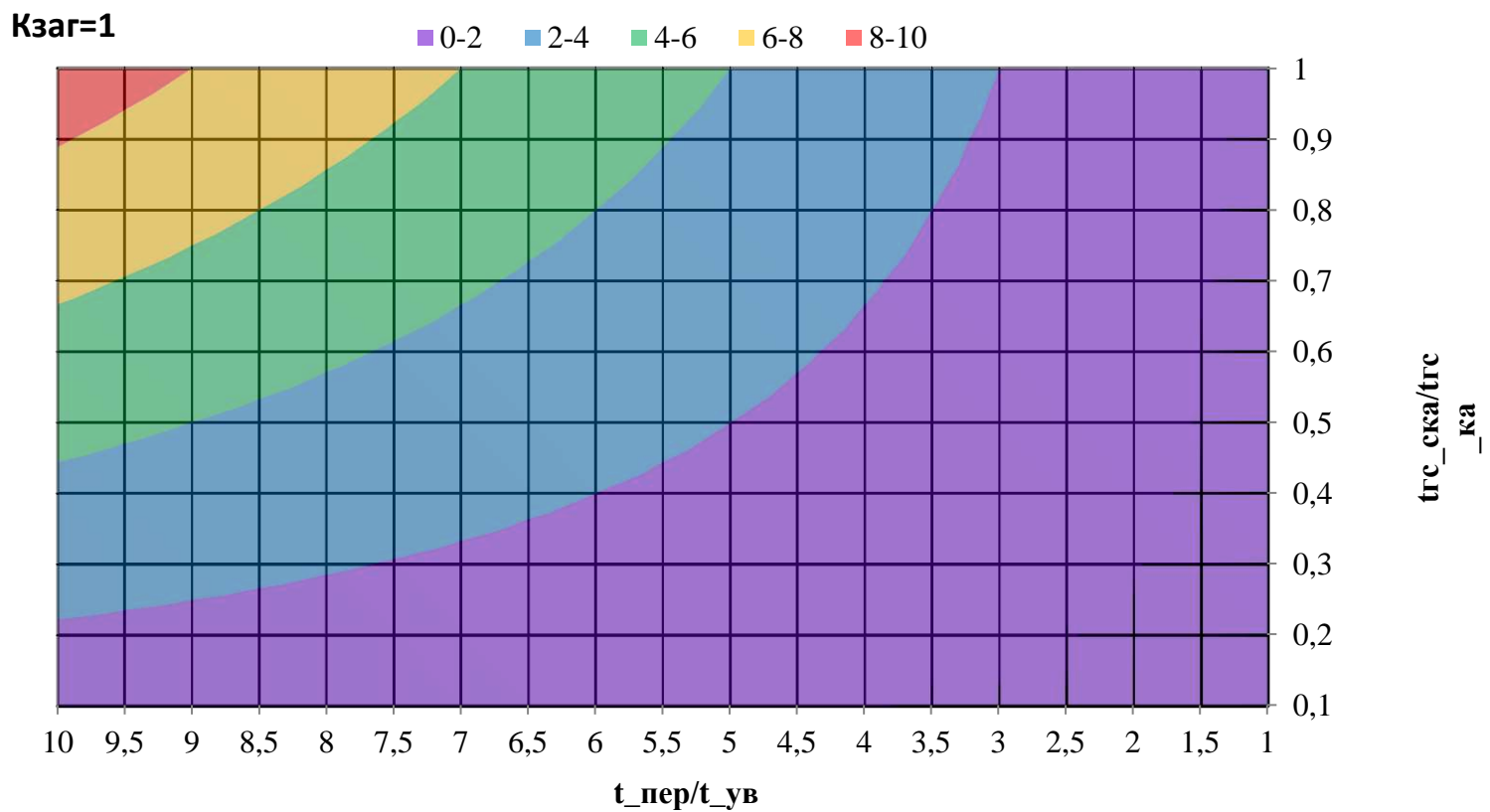


Рисунок 11 - Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значений отношений $\frac{t_{гс.ска}}{t_{гс.ка}}$ и $\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ при $K_{заг} = 1$

Таблица 5 – Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значений

отношений $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$ и $\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ при $K_{заг} = 0,75$

$\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ \ $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0,0375	0,075	0,1125	0,15	0,1875	0,225	0,2625	0,3	0,3375	0,375
2	0,075	0,15	0,225	0,3	0,375	0,45	0,525	0,6	0,675	0,75
2,5	0,1125	0,225	0,3375	0,45	0,5625	0,675	0,7875	0,9	1,0125	1,125
3	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	1,05	1,2	1,35	1,5
3,5	0,1875	0,375	0,5625	0,75	0,9375	1,125	1,3125	1,5	1,6875	1,875
4	0,225	0,45	0,675	0,9	1,125	1,35	1,575	1,8	2,025	2,25
4,5	0,2625	0,525	0,7875	1,05	1,3125	1,575	1,8375	2,1	2,3625	2,625
5	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3
5,5	0,3375	0,675	1,0125	1,35	1,6875	2,025	2,3625	2,7	3,0375	3,375
6	0,375	0,75	1,125	1,5	1,875	2,25	2,625	3	3,375	3,75
6,5	0,4125	0,825	1,2375	1,65	2,0625	2,475	2,8875	3,3	3,7125	4,125
7	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6	4,05	4,5
7,5	0,4875	0,975	1,4625	1,95	2,4375	2,925	3,4125	3,9	4,3875	4,875
8	0,525	1,05	1,575	2,1	2,625	3,15	3,675	4,2	4,725	5,25
8,5	0,5625	1,125	1,6875	2,25	2,8125	3,375	3,9375	4,5	5,0625	5,625
9	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6
9,5	0,6375	1,275	1,9125	2,55	3,1875	3,825	4,4625	5,1	5,7375	6,375
10	0,675	1,35	2,025	2,7	3,375	4,05	4,725	5,4	6,075	6,75

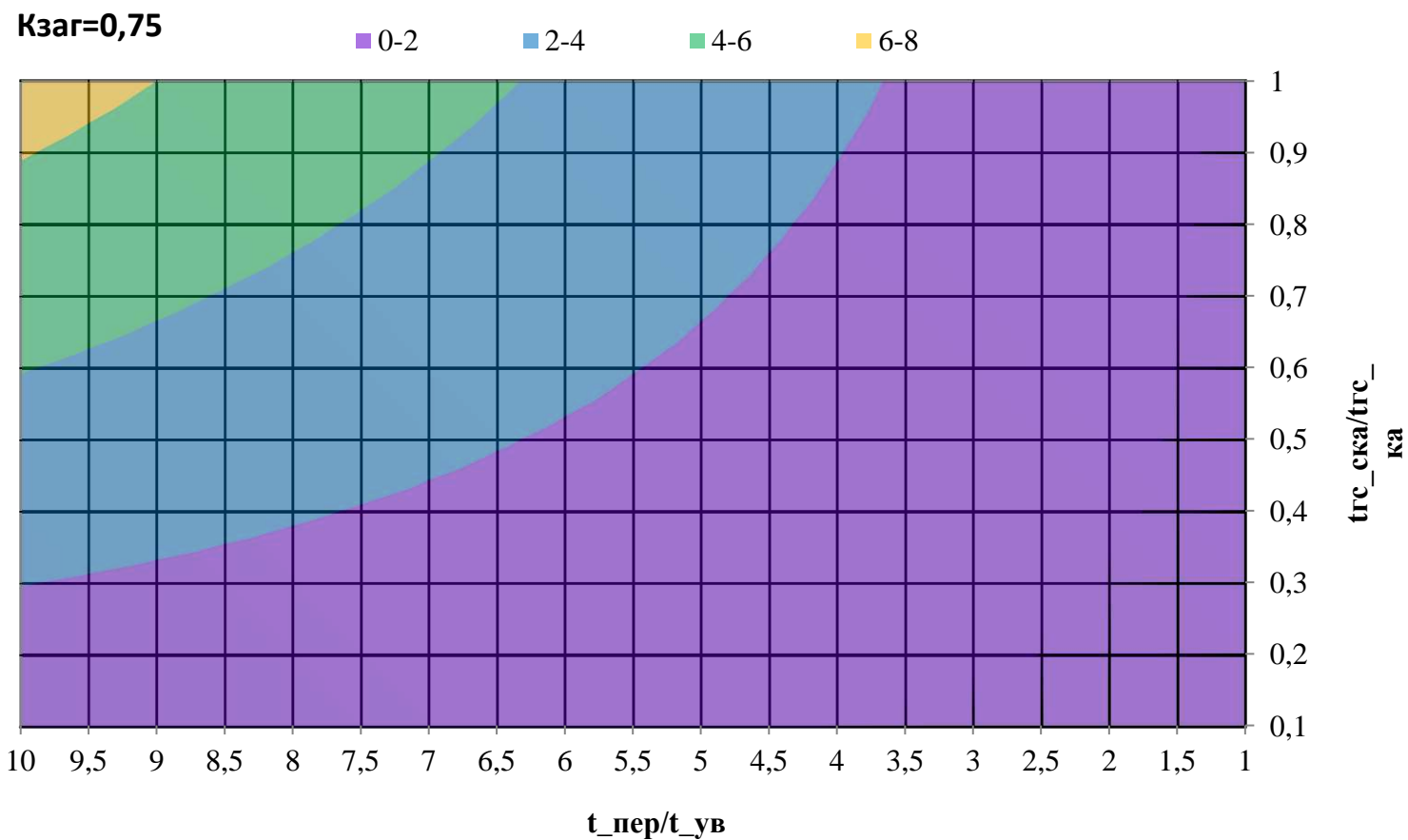


Рисунок 12 - Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значения отношения $\frac{t_{гс.ска}}{t_{гс.ка}}$ при $K_{заг} = 0,75$

Таблица 6 – Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значений

отношений $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$ и $\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ при $K_{заг} = 0,5$

$\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ \ $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
2	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
2,5	0,075	0,15	0,225	0,3	0,375	0,45	0,525	0,6	0,675	0,75
3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
3,5	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1	1,125	1,25
4	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	1,05	1,2	1,35	1,5
4,5	0,175	0,35	0,525	0,7	0,875	1,05	1,225	1,4	1,575	1,75
5	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
5,5	0,225	0,45	0,675	0,9	1,125	1,35	1,575	1,8	2,025	2,25
6	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
6,5	0,275	0,55	0,825	1,1	1,375	1,65	1,925	2,2	2,475	2,75
7	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3
7,5	0,325	0,65	0,975	1,3	1,625	1,95	2,275	2,6	2,925	3,25
8	0,35	0,7	1,05	1,4	1,75	2,1	2,45	2,8	3,15	3,5
8,5	0,375	0,75	1,125	1,5	1,875	2,25	2,625	3	3,375	3,75
9	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
9,5	0,425	0,85	1,275	1,7	2,125	2,55	2,975	3,4	3,825	4,25
10	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6	4,05	4,5

$K_{заг}=0,5$

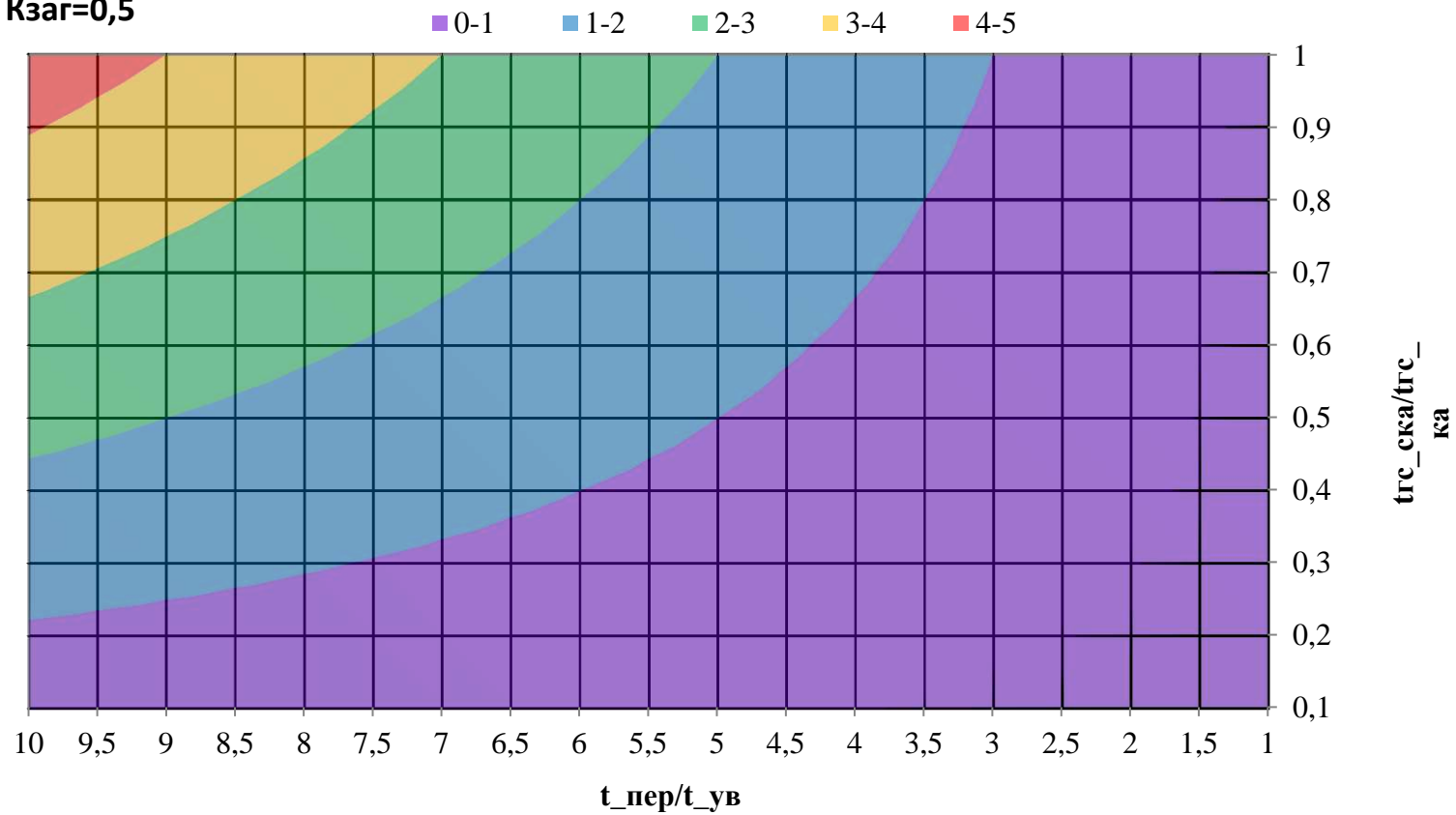


Рисунок 13 - Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значения отношения $\frac{t_{рс.ска}}{t_{рс.ка}}$ при $K_{заг} = 0,5$

Таблица 7 – Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значений

отношений $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$ и $\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ при $K_{зар} = 0,25$

$\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ \ $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0,0125	0,025	0,0375	0,05	0,0625	0,075	0,0875	0,1	0,1125	0,125
2	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
2,5	0,0375	0,075	0,1125	0,15	0,1875	0,225	0,2625	0,3	0,3375	0,375
3	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
3,5	0,0625	0,125	0,1875	0,25	0,3125	0,375	0,4375	0,5	0,5625	0,625
4	0,075	0,15	0,225	0,3	0,375	0,45	0,525	0,6	0,675	0,75
4,5	0,0875	0,175	0,2625	0,35	0,4375	0,525	0,6125	0,7	0,7875	0,875
5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
5,5	0,1125	0,225	0,3375	0,45	0,5625	0,675	0,7875	0,9	1,0125	1,125
6	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1	1,125	1,25
6,5	0,1375	0,275	0,4125	0,55	0,6875	0,825	0,9625	1,1	1,2375	1,375
7	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	1,05	1,2	1,35	1,5
7,5	0,1625	0,325	0,4875	0,65	0,8125	0,975	1,1375	1,3	1,4625	1,625
8	0,175	0,35	0,525	0,7	0,875	1,05	1,225	1,4	1,575	1,75
8,5	0,1875	0,375	0,5625	0,75	0,9375	1,125	1,3125	1,5	1,6875	1,875
9	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
9,5	0,2125	0,425	0,6375	0,85	1,0625	1,275	1,4875	1,7	1,9125	2,125
10	0,225	0,45	0,675	0,9	1,125	1,35	1,575	1,8	2,025	2,25

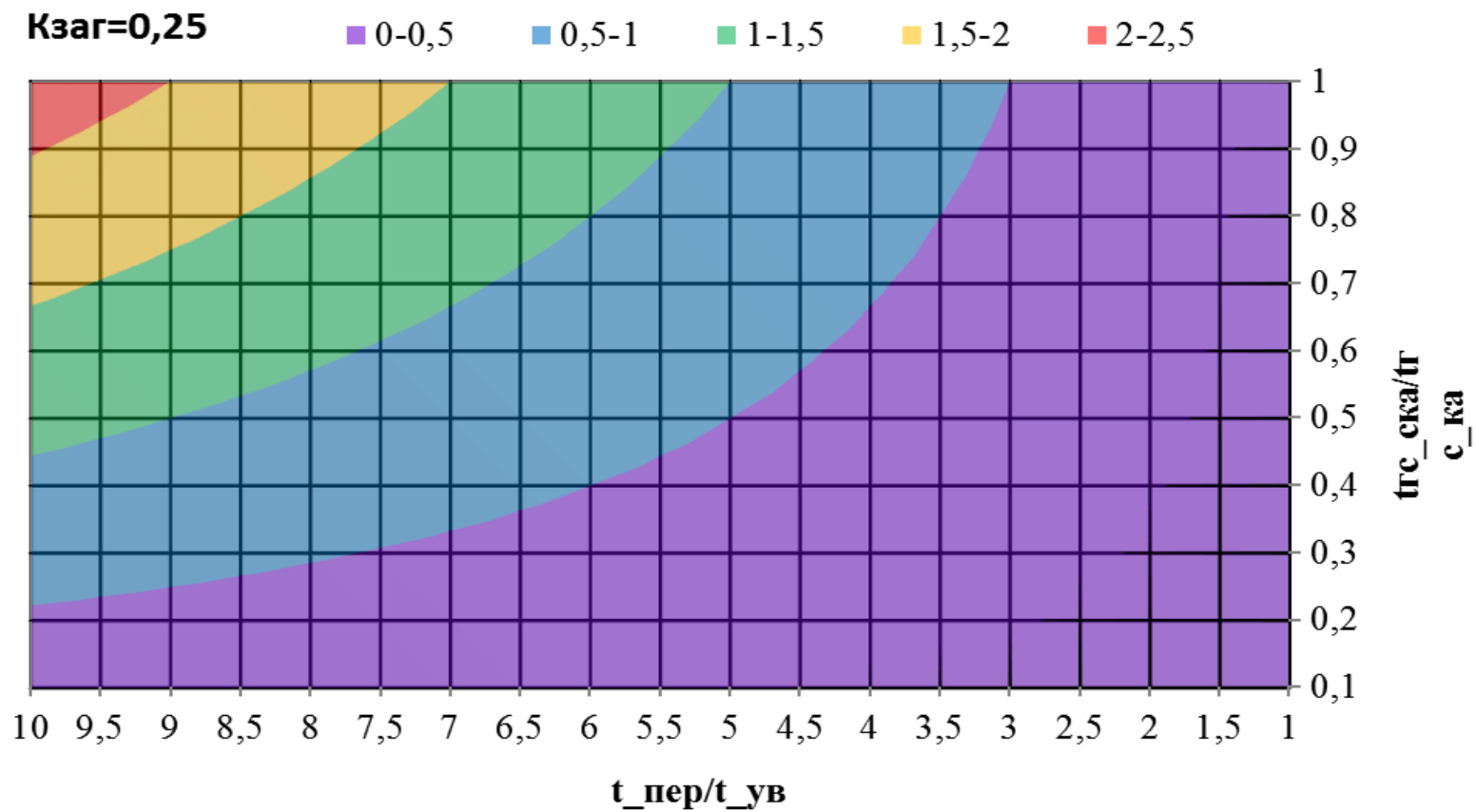


Рисунок 14 - Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значения отношения $\frac{t_{гс.ска}}{t_{гс.ка}}$ при $K_{зар} = 0,25$

Таблица 8 – Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значений

отношений $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$ и $\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ при $K_{заг} = 0,1$

$\frac{t_{пер}}{t_{ув}}$ \ $\frac{t_{ГС.СКА}}{t_{ГС.КА}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05
2	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
2,5	0,015	0,03	0,045	0,06	0,075	0,09	0,105	0,12	0,135	0,15
3	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
3,5	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
4	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,3
4,5	0,035	0,07	0,105	0,14	0,175	0,21	0,245	0,28	0,315	0,35
5	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4
5,5	0,045	0,09	0,135	0,18	0,225	0,27	0,315	0,36	0,405	0,45
6	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
6,5	0,055	0,11	0,165	0,22	0,275	0,33	0,385	0,44	0,495	0,55
7	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	0,36	0,42	0,48	0,54	0,6
7,5	0,065	0,13	0,195	0,26	0,325	0,39	0,455	0,52	0,585	0,65
8	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35	0,42	0,49	0,56	0,63	0,7
8,5	0,075	0,15	0,225	0,3	0,375	0,45	0,525	0,6	0,675	0,75
9	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72	0,8
9,5	0,085	0,17	0,255	0,34	0,425	0,51	0,595	0,68	0,765	0,85
10	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,9

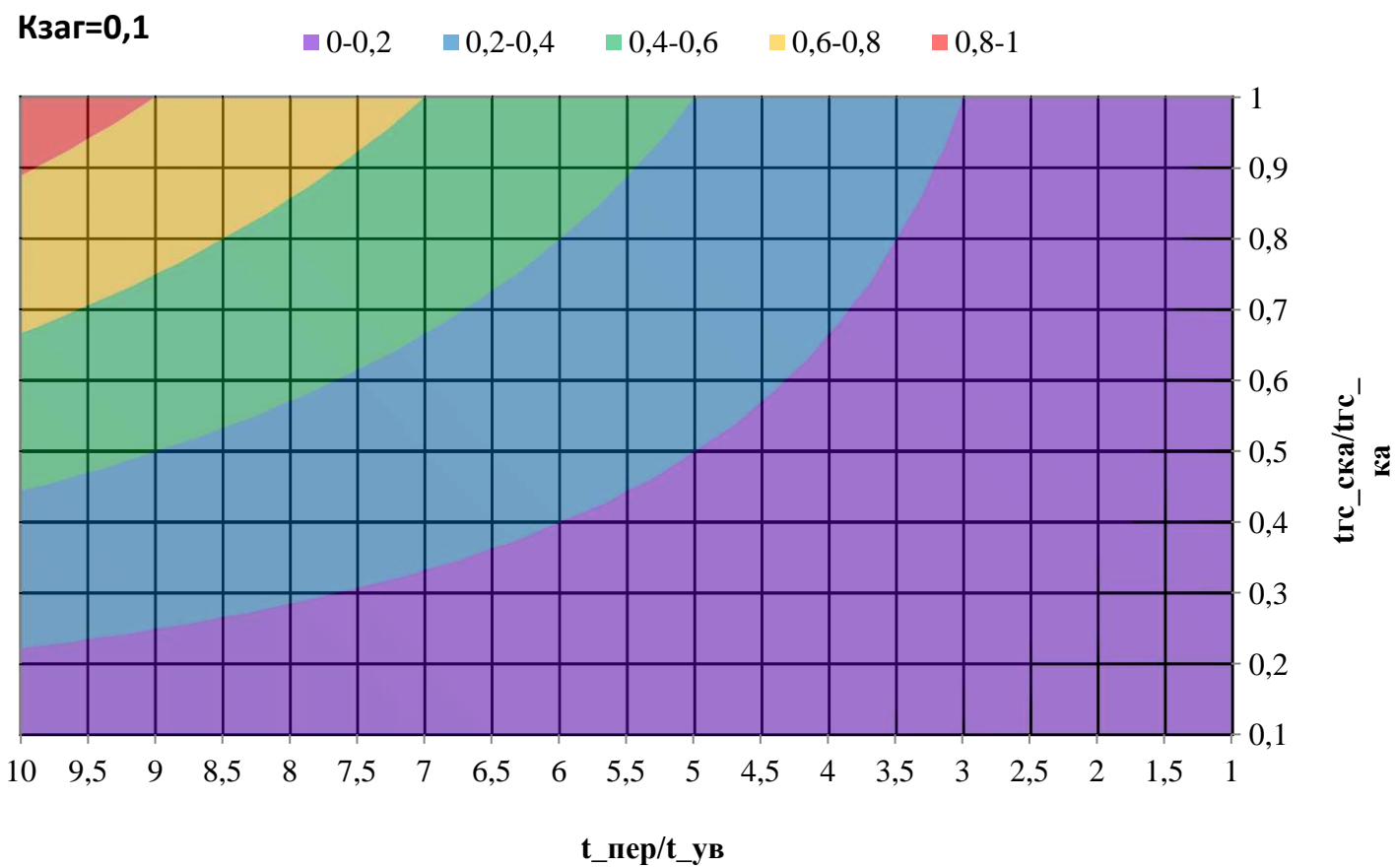


Рисунок 15 - Зависимость допустимой стоимости ОКР СКА от значения отношения $\frac{t_{гс.ска}}{t_{гс.ка}}$ при $K_{зар} = 0,1$

Из рисунков 11-15 видно, что чем больше отношение $\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}}$, то есть чем меньше времени требуется СКА для увода объекта КМ на орбиту захоронения или чем больше время, необходимое для замещения неисправного КА, тем меньше может быть его коэффициент загрузки при неизменной стоимости ОКР СКА. В свою очередь, очевидно, что возможное снижение $K_{\text{заг}}$ в процессе эксплуатации СКА приводит к возникновению требования увеличения $\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}}$ для сохранения рентабельности проекта.

Также из графиков видно, что для заданных $\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}}$ и $K_{\text{заг}}$ можно, сохраняя рентабельность СКА, либо увеличить его стоимость, либо разрабатывать проект СКА исходя из меньшего, по сравнению с КА связи, САС, что (при условии использования для аппаратуры СКА элементной базы с меньшим, по сравнению с элементной базой КА связи, ресурсом) может дополнительно снизить стоимость СКА.

Например, для среднего значения $K_{\text{заг}} = 0,5$, представленного на рисунке 13, характеристики рентабельного СКА при $\frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} \geq 1,5$ должны быть следующими:

1) рентабельным можно считать проект, при котором $\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} \geq 4$, т.к. в этих случаях, отношение $\frac{t_{\text{ГС.СКА}}}{t_{\text{ГС.КА}}}$ не превышает 1, что гарантирует техническую реализуемость проекта. В случае, если $\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} < 4$, для обеспечения рентабельности проекта гарантийный срок СКА должен быть больше гарантийного срока КА связи, т.е. более 15 лет;

2) в случае невозможности обеспечить САС СКА более 7,5 лет для сохранения рентабельности необходимо определить верхнюю границу его стоимости. Так, в случае, когда $\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} = 5$, стоимость СКА будет равной

стоимости КА связи. При $\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} = 4$, стоимость СКА не может быть больше 0,75 от стоимости КА связи.

Графики, устанавливающие связь между коэффициентом загрузки СКА и максимальной (с точки зрения обеспечения окупаемости СКА) длительностью увода неисправного КА связи на орбиту захоронения (в долях времени, необходимого для замещения неисправного КА связи) представлены на рисунке 6. Графики зависимости минимального требуемого САС СКА с коэффициентом загрузки СКА, для различных времён $t_{\text{пер}}$, приведены на рисунке 17. Данные графики справедливы при $\frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} = 1,5$.

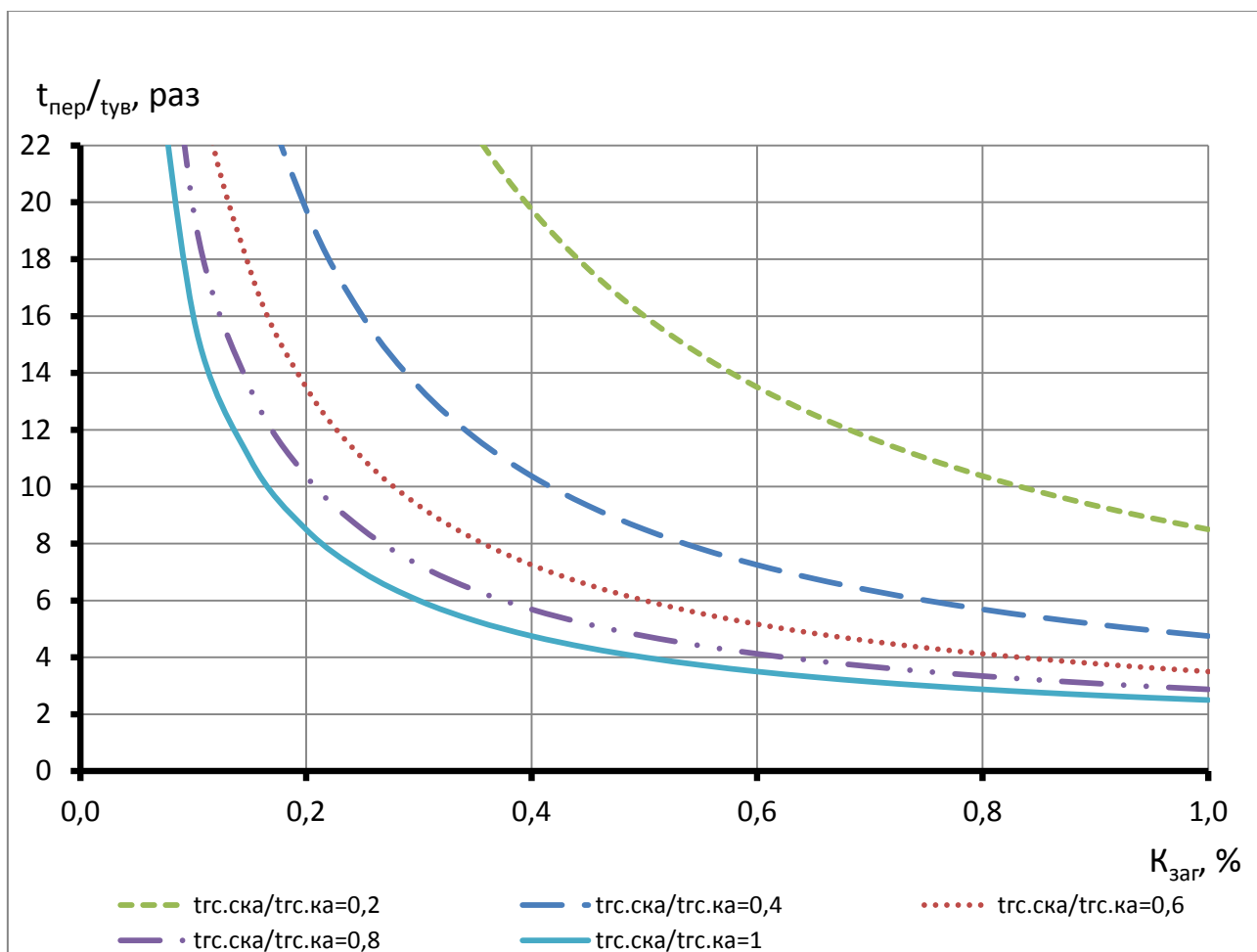


Рисунок 16 - Максимальная длительность увода неисправного КА для обеспечения окупаемости СКА при $\frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} = 1,5$

Из рисунка 16 видно, что для СКА при $K_{\text{заг}} = 0,3$ время увода объекта КМ на орбиту захоронения должно быть в шесть раз меньше времени перерыва в работе КА связи, а при $K_{\text{заг}} = 0,5$ время увода объекта КМ на орбиту захоронения должна быть в четыре раза меньше времени перерыва в работе КА связи. С уменьшением САС требования по скорости увода ужесточаются. Таким образом, из графиков ясно, что при минимальном САС СКА для обеспечения рентабельности проекта период увода КА на орбиту захоронения должен быть максимально сокращен, либо необходимо уменьшить стоимость изготовления СКА. Также эти графики позволяют определить требования к коэффициенту загрузки СКА при заданных САС СКА и скорости увода КА связи на орбиту захоронения.

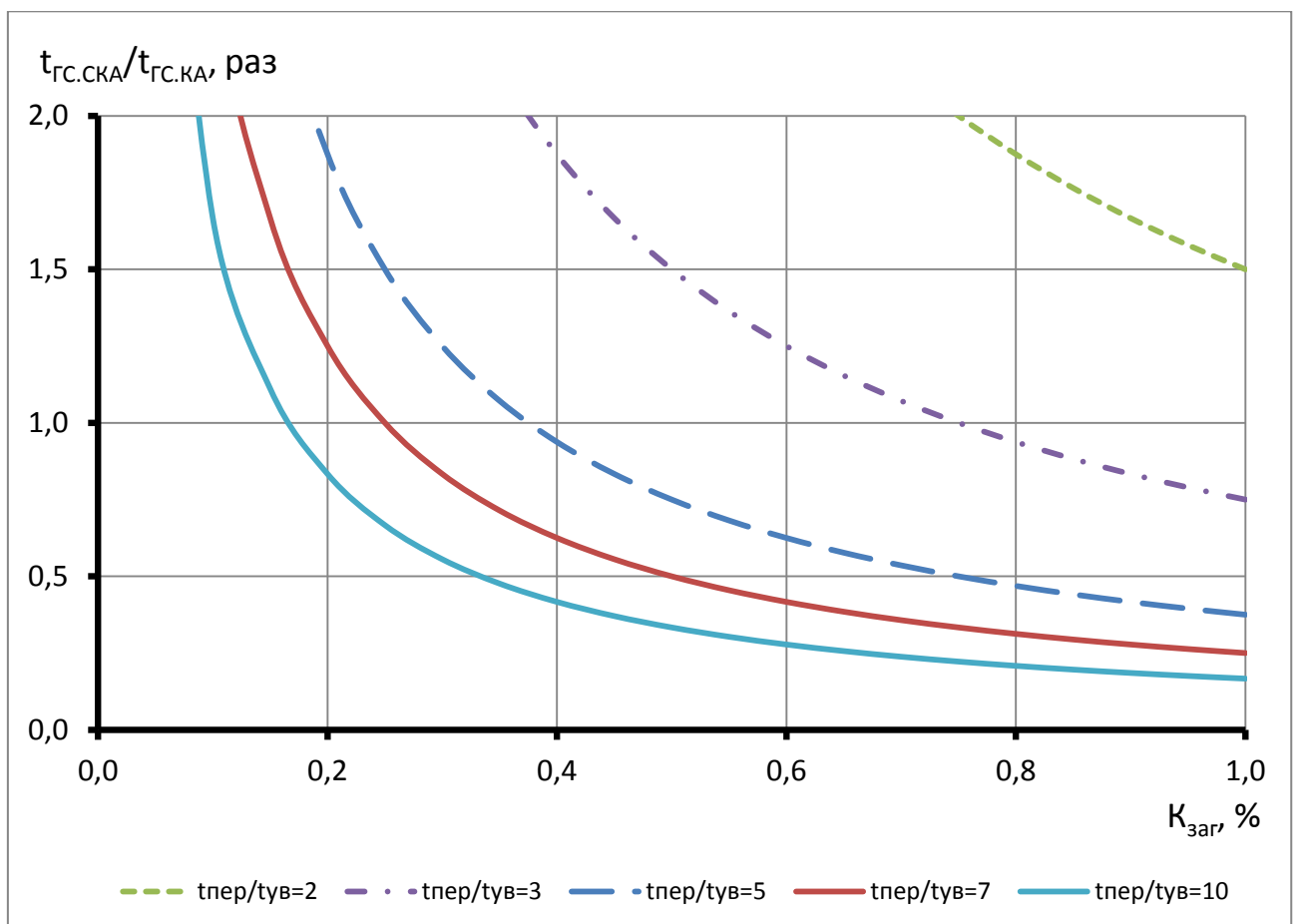


Рисунок 17 - Минимальный требуемый САС СКА для различных времён $t_{\text{ув}}$.

$$\text{при } \frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} = 1,5$$

Из графика видно, что чем меньше времени необходимо для увода объекта КМ на орбиту захоронения, тем меньше может быть САС СКА при сохранении рентабельности проекта. Так, если время увода объекта КМ на ГСО равно, например, половине времени перерыва в работе КА связи, а отношение $\frac{C_{ОКР.СКА}}{C_{ОКР.КА}} = 1,5$, САС СКА должен быть в 1,5-2 раза выше, чем САС КА связи, что накладывает дополнительные трудности на реализацию такого проекта. Также графики показывают, что при уменьшении $K_{заг}$ до значений ниже, приблизительно, 0,5 происходит резкое ужесточение требований к длительности увода аварийного КА на орбиту захоронения, поэтому при разработке техпредложения на СКА вопросу определения перечня КА связи, подлежащих уводу, должно быть уделено повышенное внимание.

3.2 Пример применения методики

Рассчитаем стоимость изготовления сервисного космического аппарата при заданных значениях:

- стоимость изготовления и запуска спутника связи для замены вышедшего из строя аппарата составляет 8,5 млрд.руб.
- срок перерыва для замены вышедшего из строя аппарата составляет 6 месяцев;
- срок активного существования аппарата связи составляет 15 лет;
- срок активного существования сервисного космического аппарата составляет 15 лет;
- время увода сервисным космическим аппаратом на орбиту захоронения, с учетом времени долёта до неисправного КА и его захвата, составляет 2,3 месяца;
- коэффициент загрузки сервисного космического аппарата составляет 70%.

Используя формулу (13) произведем расчет:

$$\frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{8,5 \text{ млрд. руб.}} \leq \left(\frac{6 \text{ мес.}}{2,3 \text{ мес.}} - 1 \right) \cdot \frac{15 \text{ лет}}{15 \text{ лет}} \cdot 0,7$$

$$C_{\text{ОКР.СКА}} \leq 9,57 \text{ млрд.руб.}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что при заданных параметрах создание сервисного космического аппарата будет целесообразно если стоимость его изготовления не будет превышать 9,57 млрд. руб.

Для сервисного космического аппарата со сроком активного существования 10 лет максимальная стоимость при сохранении рентабельности будет составлять 6,38 млрд. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данного исследования были достигнуты поставленные задачи, а именно, была разработана методика комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаления космического мусора с геостационарной орбиты, которая позволит на начальном этапе проектирования определить ряд показателей для использования их в качестве проектных ограничений при формировании проектного облика КА. В качестве обобщенных показателей эффективности были приняты максимальная стоимость проекта на создание сервисного космического аппарата ($C_{\text{ОКР.СКА}}$), срок активного существования сервисного космического аппарата ($t_{\text{ГС.СКА}}$) и длительность увода сервисным КА неисправного КА связи на орбиту захоронения ($t_{\text{ув}}$).

Исходя из графического анализа экономической модели сервисного КА $\frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} \leq \left(\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}} - 1 \right) \cdot \frac{t_{\text{ГС.СКА}}}{t_{\text{ГС.КА}}} \cdot K_{\text{заг}}$, представленного в данной главе, можно сделать следующие основные выводы:

1) длительность увода КА связи на орбиту захоронения напрямую влияет на рентабельность проекта по созданию сервисного космического аппарата. Также необходимо учитывать время, необходимое для перевода СКА на орбиту аварийного КА. А значит, одной из основных задач выбора перечня потенциальных КА для увода является минимизация разности наклонов плоскостей орбит соседних КА;

2) чем меньше времени требуется СКА для увода объекта КМ на орбиту захоронения, тем меньше может быть его коэффициент загрузки. Таким образом можно, сохраняя рентабельность, либо увеличить стоимость СКА при одновременном увеличении коэффициента загрузки, либо уменьшить его САС, что может дополнительно снизить стоимость СКА;

3) при уменьшении времени увода объекта КМ на орбиту захоронения возможно:

- сохраняя рентабельность уменьшить коэффициент загрузки СКА:
например при увеличении $\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}}$ с 5 до 9 и неизменных величинах показателей

$\frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}} = 2$ и $\frac{t_{\text{ГС.СКА}}}{t_{\text{ГС.КА}}} = 0,5$ коэффициент загрузки может быть уменьшен с 1 до 0,5;

- сохраняя коэффициент загрузки СКА увеличить рентабельность:
например, при неизменном $K_{\text{заг}}=0,5$ при увеличении $\frac{t_{\text{пер}}}{t_{\text{ув}}}$ с 5 до 9 можно

увеличить значение $\frac{C_{\text{ОКР.СКА}}}{C_{\text{ОКР.КА}}}$ с 1 до 2, то есть либо иметь возможность в два раза увеличить стоимость ОКР СКА, либо не изменяя стоимость ОКР СКА увеличить рентабельность проекта;

4) значение коэффициента загрузки меньше 0,5 приводит к необходимости существенного уменьшения длительности увода КА на орбиту захоронения, а значит, при разработке проекта СКА необходимо обеспечить коэффициент его загрузки выше 0,5. Вследствие этого для обеспечения необходимого уровня коэффициента загрузки необходимо изучить степень востребованности СКА и определить потенциальных заказчиков услуги на стадии разработки проекта.

В дальнейшем предполагается более глубокое исследование данной методики в части влияния на значение показателей методики убытков, вызванных аварийной потерей управления космическим аппаратом связи, представленных в данной методике в виде коэффициента убыточности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГСО – геостационарная орбита;

КМ – космический мусор;

КА – космический аппарат;

ОКМ – объект космического мусора;

ОКР – опытно-конструкторские работы;

САС КА – срок активного существования космического аппарата;

СКА – сервисный космический аппарат;

ЭРДУ – электрореактивная двигательная установка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Шустов, Б. М. О фундаментальных исследованиях по проблеме космического мусора / Б. М. Шустов // Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы: Материалы всероссийской научной конференции с международным участием / ИКИ РАН. – Москва, 2019. – С. 7-14.

2 Оголев, А. В. Анализ засорённости околоземного космического пространства объектами техногенного происхождения и их влияние на функционирование космических аппаратов / А. В. Оголев, С. В. Морозов // Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы: Материалы всероссийской научной конференции с международным участием / ИКИ РАН. – Москва, 2019. – С. 15 - 19.

3 Кириллов, В. А. Анализ концепций очистки околоземного космического пространства / В. А. Кириллов, И. Р. Багатеев, Тарлецкий И. С., Баландина Т. Н., Баландин Е. А. // Сибирский журнал науки и технологий. – Красноярск, 2017. - Т. 18, № 2. – С. 343 – 351.

4 Чеботарев, В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. Пособие / В. Е. Чеботарев, В. Е. Косенко. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. - 488 с.

5 Чеботарев, В. Е. Анализ экономической эффективности удаления космического мусора с геостационарной орбиты с использованием сервисного космического аппарата / В. Е. Чеботарев, А. А. Внуков // Международная конференция по авиационной технике и транспорту (AviaENT 2018), достижения в области инженерных исследований. – Красноярск, 2018.-№ 158. – С.73 - 76.

6 Чеботарев, В. Е. Нормирование показателей экономической эффективности спутников связи / В. Е. Чеботарев, В. Е. Косенко, В. В. Попов, Д. А. Матроницкий, А. А. Внуков // Вестник СибГАУ. – Красноярск, 2013. - №6. – С. 60 - 64.

- 7 Макаров, В. В. Телекоммуникации России: состояние, тенденции и пути развития: монография.- Москва: ИРАС, 2007.- 286 с.
- 8 Титов, В. И. Экономика предприятия: учебник. – Москва: Эксмо, 2008. - 416 с.
- 9 Лукашин, Ю. П. Финансовая математика: учебно-методический комплекс. – Москва: Изд. Центр ЕАОИ, 2008. – 200 с.
- 10 ГОСТ Р 52925–2008. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. Введ. 2009-01.01. Москва: Стандартинформ, 2008. - 5 с.
- 11 Вентцель, Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. – 2-е изд., стер. – Москва: Наука, 1988. - 208 с.
- 12 Кресснер, Г. Н. Введение в системы космической связи / Г. Н. Кресснер, Д. В. Михаелс – Москва: Связь, 1967. - 392 с.
- 13 Фортушенко, А. Д. Основы технического проектирования систем связи через ИСЗ / А. Д. Фортушенко, Г. Б. Аскинази, В. Л. Быков и др. – Москва: Связь, 1970. – 332 с.
- 14 Камнев, Е. Ф. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой / Е. Ф. Камнев, А. А. Акимов, В. Ю. Бобков и др. – Москва : Глобсатком, 2009. - 724 с.
- 15 Макаров, В. В. Телекоммуникации России: состояние, тенденции и пути развития : монография. – Москва: ИРАС, 2007. - 286 с.
- 16 Скляр, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е испр: пер. с англ. – Москва: Издательский дом «Вильямс 2, 2003. - 1104 с.
- 17 S.I. Nishida, S. Kawamoto, Y. Okawa, F. Terui, S. Kitamura. Space debris removal system using a small satellite // Acta Astronautica. – 2009 - Volume 65, Issues 1–2, pp.95 - 102.
- 18 S. I. Nishida, S. Kawamoto. Strategy for capturing of a tumbling space debris // Acta Astronaut. - 2011 - vol. 68, no. 1–2, pp. 113 – 120.

19 K. Yoshida, H. Nakanishi, H. Ueno, N. Inaba, T. Nishimaki, M. Oda. Dynamics, control and impedance matching for robotic capture of a non-cooperative satellite // *Adv. Robot.* - 2004 - vol. 18, pp. 175 – 198.

20 A. E. White, H. G. Lewis. The many futures of active debris removal // *Acta Astronaut.* – 2014 - vol. 95, no. 1, pp. 189 – 197.

Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение

высшего образования

«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

институт

Межинститутская базовая кафедра

«Трикладная физика и космические технологии»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.Е. Косенко

подпись, инициалы, фамилия

«25»

06

2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИСЕРТАЦИЯ

«Методика комплексной оценки технико-экономической эффективности использования сервисного космического аппарата для удаленной космической

миссии с геостационарной орбиты»

тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»

код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»

код и наименование магистерской программы

Научный

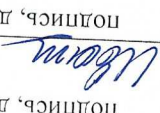
руководитель

Выпускник

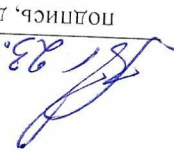
Рецензент

Нормоконтроль


подпись, дата
27.06.21


подпись, дата
27.06.21


подпись, дата


подпись, дата
27.06.21

профессор
МБК ПФИКТ,
Д-р техн. наук
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев
инициалы, фамилия

заместитель начальника
отдела 640 АО «ИСС»
имени академика М.Ф.
Решетова»
должность, ученая степень

С.В. Ефремов
инициалы, фамилия

профессор
МБК ПФИКТ,
Д-р техн. наук, доцент
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев
инициалы, фамилия