

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космической технологии

Болтенко Влада Дмитриевна

«Космическая радиация и методы защиты»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность 5В074600 – Космическая техника и технологии

Алматы 2022

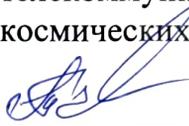
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
«Электроники,
телекоммуникации и
космических технологий»


Таштай Е.
« 27 » 05 2022 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Космическая радиация и методы защиты»

по специальности 5B074600 – Космическая техника и технологии

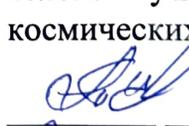
Выполнила

Болтенко Влада Дмитриевна

Рецензент
Заведующий лабораторией
разработки космических систем
ДТОО «Институт космической
техники и технологий»


Елубаев С.
« 27 » 05 2022 г.

Научный руководитель
Заведующий кафедрой
«Электроники,
телекоммуникации и
космических технологий»


Таштай Е.
« 27 » 05 2022 г.

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Электроники,
телекоммуникации и космической
технологий»



Таштай Е.

« 21 » XII 2021 г

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающейся *Болтенко Владе Дмитриевне*

Тема: *Космическая радиация и методы защиты.*

Утверждена приказом ректора университета № *489-Г/0* от «*24*» *XII* 20*21* г.

Срок сдачи законченной работы «*30*» *апреля* 2022 г.

Исходные данные к дипломной работе: 1. ГОСТ 25645.201-83 *Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. (БРЭКАКП). Термины и определения. М.: Госстандарт СССР, 1984* 2. *Требования международных стандартов ISO 15864: 2004 Космические системы - Общие методы испытаний космических аппаратов, подсистем и блоков* 3. *Нормативы ГОСТ Р 53802-2010 Космические системы и комплексы. Термины и определения.* 4. *РД.50-25645.208-86. БРЭКАКП. Методические указания. Методика расчета поглощенной и эквивалентной доз от протонов космических лучей за защитой М.: ГОСТ, 1986*

Перечень вопросов подлежащих изучить и представить в дипломной работе:

- а) Обзор и анализ испытаний конструктивных и электронных элементов КА; б) Анализ ионизирующих излучений действующих на радиоэлектронные средства КА.; в) Исследование параметров радиоэлектронных средств на радиационную стойкость; г) Особенности влияния ионизирующих излучений на материалы КА; д) Методы расчета площади радиационного теплообменника

Перечень графического материала: изложить материалы диссертации в 23 слайдах графического материала.

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Обзор и анализ испытаний конструктивных и электронных элементов КА	1.09.2021-31.12.2021	Отчет – не менее 5 стр. и 4 слайда
2. Анализ ионизирующих излучений действующих на радиоэлектронные средства КА	1.01.2022-30.01.2022	Отчет – не менее 10 стр.
3. Исследование параметров радиоэлектронных средств на радиационную стойкость	1.02.2022-15.02.2022	Отчет не менее 5 стр.
4. Особенности влияния ионизирующих излучений на материалы КА	16.02.2022-31.03.2022	Отчет не менее 5 стр.
5. Методы расчета площади радиационного теплообменника	1.04.2022-15.04.2022	Отчет не менее 5 стр.
6. Написание дипломной работы	15.04.2022-30.04.2022	Окончательная версия дипломной работы не более 30 стр. (без учета Приложений), Справка антиплагиата. Отзыв и Рецензия

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Ибекеев С. Магистр техн. наук, лектор	26.05.2022	

Научный руководитель  к.т.н. Таштай Е.

Задание принял к исполнению обучающийся  Болтенко В.Д.
« _____ » _____ 2021 г.

АННОТАЦИЯ

Бұл диссертация ғарыштық сәулеленуді, оның ғарыш аппаратына, атап айтқанда оның жабдықтарына, жинақтарына және электрондық компоненттеріне әсерін зерттеуге, сондай-ақ радиоқабылданатын ең төзімді материалдарды зерттеу арқылы да қорғау әдістерін зерттеуге арналған. Радиациялық жылу алмастырғыштың ауданы қызып кетумен күресу үшін қажет, бұл да радиацияның салдары болып келеді.

Дипломдық жұмыс радиацияның ғарыш аппаратына, оның құрамдас бөліктеріне және экипажына әсерін, сонымен қатар радиациялық әсерлерді және олардың ғарыш аппаратының құрамдас бөліктеріне теріс әсер ету дәрежесін зерттеуге бағытталған. Ғарыш аппаратының және оның құрамдас бөліктерінің материалдарының сипаттамаларына сынақтар мен талаптар қарастырылады. Қорғау жолдары мен оның қажеттілігі жеке қарастырылады. Қазіргі уақытта қолданылатын, сондай-ақ болашақта пайдалану үшін перспективалы әдістер сипатталған.

Бұл мақалада сонымен қатар жылуды аппараттың өзінен де, ішкі құрамдас бөліктерден де ғарыш кеңістігіне кетіретін жылу алмастырғыштың ауданын табу мәселесін шешудің мысалы қарастырылады, өйткені қызып кету радиацияға тап болған кезде үлкен проблема болып табылады.

АННОТАЦИЯ

Данная дипломная работа посвящена исследованию космической радиации, ее влиянию на космический аппарат, в частности на его оборудование, агрегаты и электронные компоненты, а также исследованию методов защиты, как путем изучения наиболее радиостойких материалов, так и нахождением площади радиационного теплообменника, необходимого для борьбы с перегреванием, которое также является последствием радиации.

Дипломная работа направлена на изучение воздействия радиации на космический аппарат, его компоненты и экипаж, а также радиационных эффектов и их степени отрицательного влияния на компоненты космического аппарата. Рассмотрены испытания и требования к характеристикам материалов космического аппарата и его компонентов. Отдельно рассмотрены способы защиты и ее необходимости. Расписаны как используемые в текущий момент времени способы, так и перспективные для будущего использования.

В этой работе также рассмотрен пример решения задачи по поиску площади теплообменника, который отводит тепло, как от самого аппарата, так и от внутренних компонентов, в открытый космос, так как перегрев является огромной проблемой при встрече с радиационным излучением.

ANNOTATION

This thesis is devoted to the study of cosmic radiation, its effect on the spacecraft, in particular on its equipment, assemblies and electronic components, as well as the study of protection methods, both by studying the most radio-resistant materials, and by finding the area of the radiation heat exchanger necessary to combat overheating, which is also a consequence of radiation.

The thesis is aimed at studying the effects of radiation on the spacecraft, its components and crew, as well as radiation effects and their degree of negative impact on the components of the spacecraft. The tests and requirements for the characteristics of the materials of the spacecraft and its components are considered. The ways of protection and its necessity are considered separately. The methods used at the current time, as well as promising for future use, are described.

This paper also considers an example of solving the problem of finding the area of a heat exchanger that removes heat from both the apparatus itself and from internal components into outer space, since overheating is a huge problem when encountering radiation.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Обзор и анализ испытаний конструктивных и электронных элементов космического аппарата	10
1.1 Космические аппараты и их классификация	10
1.2 Строение КА. Конструктивные и электронные элементы	10
1.3 Этапы разработки КА. Необходимость испытаний изделий	11
1.4 Требования к испытаниям комплектующих деталей КА	13
1.5 Виды проведения испытаний	16
1.6 Классификация испытаний элементов КА	16
1.7 Испытательные комплексы КА	17
2 Анализ ионизирующих излучений действующих на радиоэлектронные средства КА	20
2.1 Первое открытие космической радиации	20
2.2 Радиационный пояс Ван Аллена	21
2.3 Ионизирующие излучения и их свойства	22
2.4 Воздействие ионизирующих лучей на экипаж	24
2.5 Воздействие ионизирующих лучей на оборудование КА	26
3 Особенности влияния ионизирующих излучений на материалы КА	30
3.1 Радиационные эффекты	30
3.2 Повреждение КА от ионизирующих излучений	32
4 Исследование параметров радиоэлектронных средств на радиационную стойкость	35
4.1 Необходимость радиационной защиты	35
4.2 Радиационная стойкость материалов	35
4.3 Перспективные методы защиты	37
5 Методы расчета площади радиационного теплообменника	39
5.1 Радиационный теплообменник	39
5.2 Расчет площади радиационного теплообменника	40
Заключение	45
Список использованной литературы	46

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность выбранной темы дипломной работы обусловлена тем, что проблема радиации считается одной из главных препятствий на пути к освоению космоса, поскольку оказывает разрушительный эффект на КА и даже приводит к гибели экипажа космического корабля.

В своей дипломной работе я использовала методы исследования, которыми являются: анализ литературы и Европейских космических стандартов, изучение и обобщение отечественной и зарубежной практики, а также классификация и теоретический анализ.

Целью работы является исследование космической радиации и ее воздействия на КА, а также исследование методов защиты, как настоящих, так и перспективных.

В первой главе рассматривается космический аппарат и этапы его разработки.

Вторая глава посвящена анализу ионизирующих излучений, действующих на КА.

В третьей части рассматриваются радиационные эффекты и повреждения КА от ионизирующих излучений.

В четвертой части речь пойдет о радиационной стойкости материалов.

В пятой части производится расчет площади радиационного теплообменника.

Таким образом работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы.

1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

1.1 Космические аппараты и их классификация

Космический аппарат (КА) является комплексом технических устройств, предназначенных для изучения космоса, транспортировки людей (доставки космонавтов на орбиту Земли, на МКС и т.д.), межпланетных миссий, наблюдения за Землей и множества других космических операций.

По режиму работы космические аппараты делятся на следующие виды:

- искусственные спутники Земли (ИСЗ) – так называют все аппараты, которые находятся на геоцентрической орбите (т.е. вращаются вокруг планеты Земля);

- орбитальные станции – служат для длительного пребывания и работы космонавтов на орбите нашей планеты;

- автоматические межпланетные станции – иными словами – космические зонды, которые осуществляют переправу между Землей и другими космическими объектами нашей Солнечной системы. Данные аппараты могут отправляться на орбиту вокруг исследуемого тела, а также исследовать их с пролетных траекторий. Некоторые зонды после этого отправляются за границы Солнечной системы;

- планетоходы – являются автоматическими лабораторными комплексами или транспортными средствами, что используются для передвижения по поверхности планеты, либо иного небесного тела;

- спускаемые аппараты – применяются для перевозки материалов и людей с орбиты планеты на ее поверхность;

- космические корабли – аппараты, которые делятся на автоматические или пилотируемые и применяются для перевоза грузов и доставки человека на орбиту планеты Земля.

1.2 Строение КА. Конструктивные и электронные элементы

По причине того, что космические аппараты имеют многообразную классификацию, – структура их строения тоже различается; однако наличие корпуса, состоящего из разнообразных конструктивных элементов, и радиоэлектронной аппаратуры везде остается неизменным.

Радиоэлектронная аппаратура также называется целевой аппаратурой (ЦА) или целевым оборудованием, и служит для реализации задач, для которых разрабатывается космический аппарат. Это оборудование может иметь цель, как и народно-хозяйственного характера, так и научного.

Целевая аппаратура КА бывает нескольких видов: радиолокационная, оптическая, инфракрасная, рентгеновская, телевизионная радиотехническая, спектрометрическая, калориметрическая, фотографическая, ЦА радиосвязи и ретрансляции, радиометрическая и т.п.

Конструктивные элементы – это твёрдотельные части КА, являющиеся обеспечивающим оборудованием. К данным частям присоединяются бортовые приборы и устройства. Существует отдельный термин для совокупности конструктивных элементов, – конструкция КА. Она составляет наибольшую часть массы спутника в дополнение к массе размещенного в нем оборудования. Всякий элемент конструкции улавливает нагрузку от закрепленного к нему прибора и передает соседним элементам конструкции. Фундаментальной целью всей конструкции КА является сохранение своей формы на протяжении всего срока существования без разрушений и всевозможных выходов из строя [1]. Сюда входит целый ряд бортовых систем: терморегуляция, траекторные измерения, ориентация и стабилизация, энергопитание, управление и навигация, телеметрия и т.п.

Задача разработки конструкции определенного КА является довольно непростой, так как должны соблюдаться большое количество различных факторов.

В конструкциях космических аппаратов широко применяют сплавы алюминия и титана, а корпуса радиоэлектронных приборов этих аппаратов изготавливают из листовой стали или из сплавов алюминия [2].

1.3 Этапы разработки КА. Необходимость испытаний изделий

Существует пять основных последовательно-связанных шагов в создании изделий КА:

- а) проектирование;
- б) разработка опытных образцов изделия;
- в) экспериментальная отработка в наземных условиях различных систем и узлов, а также самого аппарата;
- г) производство штатного изделия;
- д) летно-конструкторские испытания.

Первым этапом разработки является проектирование. Его конечным результатом является план создания аппарата и точные технические решения по его бортовым системам, элементам и агрегатам.

Процесс проектирования состоит из разработки технических требований, эскизного проектирования и технического проектирования.

Разработка технических требований подразумевает техническое и экономическое обоснование целесообразности разработки определенного КА, целью создания которого является решение актуальных задач. Здесь, к тому же, происходит формулировка и обоснование технических требований к системам

аппарата и его характеристикам, а также определение критерий эффективности систем аппарата и КА в целом.

Далее следует этап эскизного проектирования, где определяется структура КА, технические характеристики его комплектующих элементов и осуществляется компоновка систем аппарата. Изначально, чтобы анализировать влияние главных параметров проектируемого изделия на его качественные показатели, используют математические модели, которые могут быть локальными или приближенными, и созданные для отдельных элементов космического аппарата. Параметры системы, которые были определены с использованием данных моделей считаются приближенными, и все же нуждаются в дальнейшем уточнении на следующем этапе.

Этап технического проектирования служит для разработки технической документации, чтобы в последующем проводить экспериментальную отработку систем и КА в целом в стендовых и лабораторных условиях.

Заключительный шаг в процессе разработки КА – экспериментальная отработка. Цель ее состоит в том, чтобы довести КА и его комплектующие блоки, и агрегаты до такого состояния, которое полностью удовлетворяет требованиям технического задания. Правда она не только является конечным звеном, но еще и тесно объединяется с этапами проектирования. В ходе изготовления КА необходимо принимать во внимание не только теоретические данные, а еще и предыдущий опыт создания иных КА, и полученные в ходе отработок и тестов результаты. Хотя, конечно же, не всегда этого опыта оказывается достаточно, особенно в том случае, если проектируются новые аппараты, которые значительно отличаются от предшествующих, – поэтому здесь встает острый вопрос в необходимости применять новые материалы и конструкции, которые еще не прошли проверку практикой и могут считаться ненадежными. Это значит, что в одно время с разработкой эскизного проекта следует проводить экспериментальную отработку всех данных конструктивных новшеств, ибо история развития ракетно-космической техники имеет множество примеров, где из-за игнорирования подобного подхода сводило к тому, что после всех испытаний, которые проводились над полностью спроектированным и материализованным КА, его необходимо было перепроектировать.

В ранние годы экспериментальная отработка КА производилась при летно-конструкторских испытаниях (ЛКИ), а в наши годы способ экспериментальной отработки состоит в том, чтобы при максимальной имитации штатных эксплуатационных условий провести наземную отработку систем КА. Данный подход к экспериментальной отработке отражается в примере создания КА «Аполлон», где наибольшая часть государственных вложений на программу высадки на Луну направлялась на реализацию наземной экспериментальной базы. Как показал результат, – на исследовательских испытаниях было найдено наибольшее количество конструктивных недостатков и составило 68%, на контрольно-технологических испытаниях – 30%, и на предстартовых и летных испытаниях было выявлено только 2,5% недостатков. Под исследовательскими испытаниями здесь идет речь о тех, что проводятся для того, чтобы выявить

возможность изготовления конструкционной части, а также выявить способность данной конструкционной части к выполнению заданных функций в заданное время, во внешних условиях, что имеют место как в наземной полетной подготовке, так и к самому полету непосредственно.

Исследовательские испытания имеют несколько объектов: макет опытного образца, опытный образец и промышленный образец. Если говорить о приемочных испытаниях, то здесь следует уточнить, что они подразумеваются проверке конструкционной части на наличие ошибок при производстве.

В программу данных испытаний входят испытания функциональные и испытания отдельных частей изделий на влияние условий эксплуатации до и уже после установки полноценные испытания системы. Главными задачами, которые нужно реализовать чтобы протестировать сложнейшую техническую систему, являются нижеперечисленные:

а) оценка точности главных конструктивных, а также схемных решений, которые заложены в основу проекта КА, а также поправка этих решений в процессе разработки;

б) тестирование и отработка работоспособности узлов КА, а также отделенных конструктивных узлов в эксплуатационных условиях и отработка их взаимодействия в общей расчетной схеме;

в) определение летно-технических характеристик космического корабля во всем масштабе способов его использования;

г) исследование, а также в ходе самих испытаний устранение всех причин возможных ошибок и дефектов, способных вывести КА из строя или даже уничтожить его вовсе;

д) разработка эксплуатационной технологии космических аппаратов;

е) определение требований к испытаниям элементов КА [3].

1.4 Требования к испытаниям комплектующих деталей КА

Далее важно понимать требования к испытаниям комплектующих деталей КА, которые излагаются в европейском стандарте ECSS-Q-ST-60C. Данный стандарт различает три класса комплектующих деталей посредством трех различных групп требований стандартизации, которые должны быть выполнены. Эти три класса обеспечивают три уровня компромисса между гарантией и риском. Самая высокая гарантия и самый малый риск обеспечены классом 1, и наиболее низкая гарантия и наивысший риск – классом 3. Затраты на материально-техническое снабжение являются наиболее низкими для класса 1 и наиболее высокими для класса 3. Цели, определение и ограничивающие условия проекта определяют то, какой класс или классы комплектующих деталей являются соответствующими для использования в рамках системы или подсистем [4].

Требования настоящего стандарта распространяются на все детали, рассматриваемые на всех уровнях в интеграции электротехнических, электронных и электромеханических деталей в аппаратных средствах космического сегмента и ракетносителях или пусковых установках.

В соответствии с данным стандартом, для испытаний комплектующих деталей Класса 1, Класса 2 и Класса 3, должна выполняться перечень требований, изложенных в таблицах 1.1, 1.2, 1.3.

Таблица 1.1 – Перечень требований к документам для комплектующих деталей Класса 1 стандарта ECSS-Q-ST-60C

Документ	Пункт
План контроля комплектующих деталей	4.1.2.12
Перечень признанных комплектующих деталей «в проектном исполнении»	4.1.14
Запрос на отсрочку платежей при производстве оборудования (после перечня признанных комплектующих деталей «в проектном исполнении» и до перечня признанных комплектующих деталей «в заводском исполнении»)	4.1.14
Перечень признанных комплектующих деталей «в заводском исполнении»	4.1.14
Техническое примечание о деталях, содержащих чистое олово во внутренних резонаторах	4.2.2.2
План гарантии радиационной стойкости	4.2.2.4
Документ об анализе излучения оборудования	4.2.2.4
Планы оценки	4.2.3.1
Отчеты об оценке	4.2.3.1
Документ утверждения деталей	4.2.4
Спецификации закупок, составленные в рамках проекта	4.3.2
Метод испытаний обнаружения элементарных частиц ударного шума для упаковок DO4, DO5 и TO3	4.3.3
Процедура предварительной проверки заказчиком	4.3.4
Процедура поступления	4.3.7
Отчеты о радиационном испытании RVT, если оно проводится в рамках проекта	4.3.8
Процедура разрушающего физического анализа	4.3.9
Отчеты о разрушающем физическом анализе	4.3.9
Процедура транспортировки и хранения электротехнических, электронных и электромеханических деталей (EEE)	4.4
План действий при предупредительных сигналах	4.5.3
Процедура постпрограммной последовательности	4.6.4

Таблица 1.2 – Перечень требований к документам для комплектующих деталей Класса 2 стандарта ECSS-Q-ST-60C

Документ	Пункт
Матрица соответствия	5.1.2.2
Запрос на отсрочку платежей RFW при производстве оборудования (после перечня признанных комплектующих деталей «в проектном исполнении» и до перечня признанных комплектующих деталей «в заводском исполнении»)	5.1.4
Перечень признанных комплектующих деталей «в заводском исполнении»	5.1.4
Техническое примечание о деталях, содержащих чистое олово во внутренних резонаторах	5.2.2.2
План гарантии радиационной стойкости	5.2.2.3

Продолжение таблицы 1.2

Документ об анализе излучения оборудования	5.2.2.3
Планы оценки	5.2.3.1
Отчеты об оценке	5.2.3.1
Документ утверждения деталей PAD's	5.2.4
Документы технико-экономического обоснования	5.2.4
Спецификации закупок, составленные в рамках проекта	5.3.2
Метод испытаний обнаружения элементарных частиц ударного шума PIND для упаковок DO4, DO5 и TO3	5.3.3
Процедура предварительной проверки, проводимая заказчиком	5.3.4
Процедура поступления	5.3.7
Отчеты о радиационном испытании RVT, если оно проводится в рамках проекта	5.3.8
Процедура разрушающего физического анализа DPA	5.3.9
Отчеты о разрушающем физическом анализе DPA	5.3.9
Процедура транспортировки и хранения электротехнических, электронных и электромеханических деталей (EEE)	5.4
План действий при предупредительных сигналах	5.5.3
Процедура постпрограммной последовательности	5.6.4

Таблица 1.3 – Перечень требований к документам для комплектующих деталей Класса 3 стандарта ECSS-Q-ST-60C

Документ	Пункт
Матрица соответствия	6.1.2.2
Перечень признанных комплектующих деталей «в проектном исполнении»	6.1.4
Запрос на отсрочку платежей RFW при производстве оборудования (после перечня признанных комплектующих деталей «в проектном исполнении» и до перечня признанных комплектующих деталей «в заводском исполнении»)	6.1.4
Техническое примечание о деталях, содержащих чистое олово во внутренних резонаторах	6.2.2.2
План гарантии радиационной стойкости	6.2.2.4
Документ об анализе излучения оборудования	6.2.2.4
Планы оценки	6.2.3.1
Отчеты об оценке	6.2.3.1
Документ утверждения деталей PAD's	6.2.4
Документы технико-экономического обоснования	6.2.4
Спецификации закупок, составленные в рамках проекта	6.3.2
Метод испытаний обнаружения элементарных частиц ударного шума PIND для упаковок DO4, DO5 и TO3	6.3.3
Процедура поступления	6.3.7
Отчеты о радиационном испытании RVT, если оно проводится в рамках проекта	6.3.8
Процедура разрушающего физического анализа DPA	6.3.9
Отчеты о разрушающем физическом анализе DPA	6.3.9
Процедура транспортировки и хранения электротехнических, электронных и электромеханических деталей (EEE)	6.4
План действий при предупредительных сигналах	6.5.3
Процедура постпрограммной последовательности	6.6.4

1.5 Виды проведения испытаний

После изучения требований, необходимых для создания комплектующих частей космических аппаратов, нужно различать виды испытаний. Существует 14 типов обязательных испытаний, в которых проверяется:

- а) работа КА в нормальных условиях климата;
- б) выявление резонансов конструктивных элементов устройства (агрегата);
- в) прочность при влиянии транспортных нагрузок в составе изделия;
- г) устойчивость и прочность при влиянии широкополосной случайной вибрации (ШСВ) и синусоидальной вибрации;
- д) прочность и устойчивость при влиянии механических ударов;
- е) прочность и устойчивость под линейным ускорением;
- ж) воздействие низкой температуры окружающей среды;
- з) проверка реакции на повышенную температуру окружающей среды;
- и) проверка пониженным давлением;
- й) проверка работоспособности при повышенной влажности;
- к) устойчивость к электростатическим разрядам;
- л) безотказность при долговременной эксплуатации (испытания на безотказность);
- м) стойкость устройства (агрегата) к влиянию электромагнитных полей уровнем 1 В/м;
- н) подтверждение работоспособности устройства (агрегата) при влиянии постоянного магнитного поля, напряженность которого 400 А/м [5].

При изучении воздействия порядка проведения испытаний на их эффективность было установлено, что он существенно не влияет на результаты.

1.6 Классификация испытаний элементов КА

Основанием для классификации испытаний элементов космических аппаратов являются нижеперечисленные признаки:

- а) назначение исследовательских испытаний, сравнительных испытаний, контрольных испытаний и определительных испытаний;
- б) уровень объекта тестирования испытаний материалов и элементов, испытаний узлов, аппаратов, агрегатов, устройств, а также подсистем, систем, и испытания КА в целом;
- в) определенные параметры объекта. Здесь можно выделить испытания безопасность, прочность, устойчивость, надежность, транспортабельность, граничные испытания и технологические испытания, ну и в заключении функциональные испытания;

г) этапы создания продукта, где испытания доводочные, предварительные, приемочные;

д) место и условия проведения испытаний, где они подразделяются на те, что проводятся в лабораториях, в полигонах, в стендовых условиях, в условиях эксплуатации и те, которые используют предметно-математические модели.

Помимо данных разновидностей испытаний, где их разделение определяется их характерными особенностями, существует еще несколько видов испытаний, относящихся к сложнейшим объектам, таким как КА в целом: автономные испытания, которые проверяют отдельные части КА, далее идут комплексные испытания, которые проверяют группы совокупных систем КА, или для всего КА, чтобы оценить функционирование систем КА по окончании проведения различных монтажно-сборочных работ, и наконец, испытания в имитационных условиях нештатных аварийных происшествий [3].

1.7 Испытательные комплексы КА

1.7.1 Компания TRAD

Существует множество компаний, которые проводят испытательный анализ электронных компонентов. Одной из таких является Tests&Radiations (TRAD), которая была создана в 1994 году и располагается в городе Лаберж, Франция. TRAD занимается разработкой испытательных стендов для измерения электрических отклонений компонентов после различных стадий облучения с различными уровнями дозы в зависимости от использованной технологии. После каждого проведенного испытания, предоставляется полный отчет, содержащий все входные данные – спецификации, планы тестирования, полную прослеживаемость испытательных стендов: карты, измерительные приборы – результаты испытаний, анализы, если требуется – позволяющий быстрое использование результатов [6].

1.7.2 Компания Ghalam

В Казахстане тоже есть такие компании, например, ТОО «Ghalam», которое является крупнейшим центрально-азиатским производителем космических систем. В состав их подразделений входят испытательные лаборатории, а также сборочно-испытательный комплекс (СБИК) КА. Например, «TestLab» является лабораторией для проведения механических и термических испытаний и служит для того, чтобы проводить целые комплексы тестов малых КА и промышленных изделий, масса которых не превышает и 100 килограмм. KazScisat был также испытан здесь. СБИК КА необходим для того, чтобы испытывать КА не превышающие 6 тонн и соответствующие параметрам 3×3×6 м. В состав СБИК КА входят следующие производственные участки:

- зал сборки и функциональных испытаний – здесь одновременно можно собрать 2 больших спутника (6Т), или 3 средних спутника (3Т);
- термовакуумная испытательная площадка (TVAC2, TVAC1) – здесь проводятся термовакуумные испытания (имитация космических условий);
- площадка для испытаний на электромагнитную совместимость (EMC) – здесь проводятся электрические испытания (проверка компонентов спутников на электромагнитную совместимость);
- акустическая испытательная площадка (RAC) – здесь проводятся акустические испытания (имитация акустических нагрузок, создаваемых при запуске ракеты-носителя);
- виброиспытательный полигон (VIB) – здесь проводятся вибрационные испытания (имитация вибрационных нагрузок);
- участок измерения инерционно-массовых характеристик космического аппарата (MPM) – здесь проводят механические испытания (измеряют центр масс КА);
- полигон радиочастотных испытаний (CATR) – здесь проводятся функциональные испытания (настройка спутниковых антенн) [7].

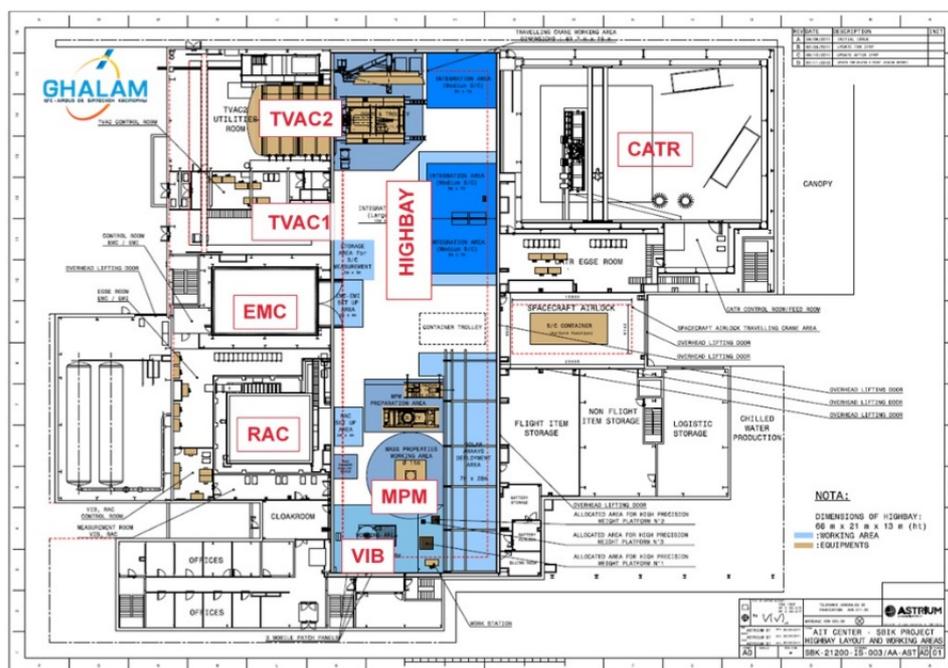


Рисунок 1.1 – Сборочно-испытательный комплекс КА

В компании находится множество испытательных стендов, как например, координатно-измерительный аппарат под названием «Mitutoyo CRYSTA-Арех S9206». Она необходима для того, чтобы измерять геометрические размеры деталей со сложной формой, а также для измерения отклонений размерных параметров и расположения поверхностей элементов деталей [7].



Рисунок 1.2 – Координатно-измерительная машина

2 АНАЛИЗ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА КА

2.1 Первое открытие космической радиации

Как известно, первые космические аппараты носили испытательный характер для выявления уязвимых мест и изучения окружающей среды в космосе, для тестирования конструкционных элементов и систем в реальных условиях полета в космическом пространстве, и в последствии нахождения всевозможных способов приведения их к одному стандарту.

В 1958 году, 31 января, Соединенные Штаты Америки запустили свой первый спутник, под названием Explorer-1, в космос. Назад на Землю данный спутник вернулся с ценной информацией о космической окружающей среде, которая привела к открытию радиационного пояса Ван Аллена. Хотя по размеру спутник Explorer-1 был намного меньше, чем советский Sputnik-1, американский ученый, физик из университета Айовы, Джеймс Ван Аллен догадался прикрепить к нему счетчик Гейгера, который применяется для нахождения и изучения радиоактивных излучений разного рода, и делается это способом подсчёта количества угодивших в счетчик ионизирующих частиц. Последующие эксперименты с тремя другими миссиями в 1958 году — «Explorer-3», «Explorer-4» и «Пионер-3» — установили, что вокруг Земли существует два радиационных пояса.

В то время как наблюдения продолжались в течение десятилетий, знания о поясах расширились, когда в 2012 году были запущены зонды Ван Аллена. Задача зондов Ван Аллена — помочь определить, как частицы попадают в пояса, куда они исчезают и какие процессы ускоряют их до таких высоких скоростей и энергий. Инструменты зондов измеряют сигнатуры огромного количества процессов в широком диапазоне временных масштабов и мест. Зонды Ван Аллена пережили экстремальное излучение в течение многих лет, отправив множество данных. Они обнаружили, что пояса были более сложными, чем предполагалось ранее. Зонды показали, что форма поясов зависит от того, какая частица изучается. Они также обнаружили информацию, намекающую на то, что в некоторых частях поясов Ван Аллена радиация меньше, чем предполагалось, а это означает, что космическим кораблям и людям не потребуется такая серьезная радиационная защита, если они путешествуют в этом регионе. Одним из ключевых результатов были данные, показывающие, что внутренний край внешнего пояса сильно выражен. Для самых быстрых электронов с самой высокой энергией этот край является резкой границей, через которую в нормальных условиях электроны просто не могут проникнуть — отсюда и непреодолимый барьер. Еще одним важным открытием стало то, что в дополнение к тому, что люди формируют ландшафт Земли, ученые теперь знают, что мы также можем формировать нашу ближнюю космическую среду. Было обнаружено, что очень низкочастотная радиосвязь взаимодействует с частицами

в космосе, влияя на то, как и где они движутся. NASA в 2013 году при помощи своих зондов Ван Аллена нашли новый радиационный пояс, который является третьим. За ним тщательно следили и изучали его в течение месяца, но сильнейшая межпланетная ударная солнечная волна уничтожила этот пояс. В 2019 году двойные зонды Van Allen Probes начали свою заключительную фазу исследования и будут продолжать использовать свои инструменты для отправки данных ученым на Земле для изучения, пока у них не закончится топливо, и они в конечном итоге снова войдут в атмосферу Земли примерно через 15 лет.

К 60-летию Explorer-1 НАСА заявило, что исследования поясов Ван Аллена сегодня еще более важны. «Наши современные технологии все более восприимчивы к этим ускоренным частицам, потому что даже одно попадание частицы может вывести из строя наши все более мелкие инструменты и электронику», — сказал Дэвид Сибек, научный сотрудник миссии «Van Allen Probes» в Центре космических полетов имени Годдарда НАСА в Мэриленде.

2.2 Радиационный пояс Ван Аллена

Радиационный пояс Ван Аллена представляет собой зону энергичных заряженных частиц, чья большая часть происходит от солнечных ветров. Частицы захватываются и удерживаются вокруг планеты магнитным полем этой планеты. Он окружает Землю и содержит почти непроницаемый барьер, который не позволяет самым быстрым и энергичным электронам достичь Земли. Внешний пояс состоит из миллиардов высокоэнергетических частиц, исходящих от Солнца и попавших в ловушку магнитного поля Земли, области, известной как магнитосфера. Внутренний пояс возникает в результате взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли.

Хотя изображения радиационных поясов Ван Аллена делают их видимыми и красочными, на самом деле это всего лишь изображение. Сами радиационные пояса настолько разрежены, что космонавты даже не видят и не чувствуют их, находясь снаружи в своих скафандрах. На самом деле ученые обнаруживают их только с помощью чувствительных инструментов внутри спутников и космических кораблей.

Радиационные пояса Ван Аллена захватывают энергичные электроны, протоны, и обитают внутри магнитного поля нашей планеты. Данные пояса являются большой угрозой для космических аппаратов, поэтому их уязвимые компоненты нуждаются в надежной защите, особенно в случае, когда они находятся недалеко от зоны поясов.

Таким образом, понятие радиационного пояса Ван Аллена имеет непосредственное отношение к тем поясам (радиационного воздействия), которые окружают Землю. Но тем не менее они были найдены не только касательно вышеупомянутой планеты. Что касается самого Солнца, то в данном случае оно не способно справиться с данными поясами долговременного

характера. Это достаточно легко объяснить простым примером. У него просто нет особого поля, которое получило название дипольное. При этом стоит уточнить одну особенность рассматриваемых поясов. Получается так, что они не могут выйти за границы восьми радиусов нашей планеты.

Важно знать то, что та самая радиация, находящаяся внутри данного пояса, практически никак не связана с различными изменениями, которые несут временный характер. Радиация отличается разными вариантами, которые имеют существенные отличия по интенсививу.

Есть определенные установленные места, в которых может присутствовать радиация после захвата, но только опять же недолгий отрезок времени. Также можно упомянуть об отдельной так называемой территории, которая названа магнитосферой. Именно через нее некоторые частицы начинают вторгаться. Такие частицы тесно связаны с солнечным ветром.

Стоит уточнить, что некоторые структурные особенности геомагнитного поля оказывают существенное влияние на возможность неорганичного расположения самой радиации. Если наблюдается ослабленный показатель напряженности указанного выше поля, если его сравнить с другим дипольным полем, то частицы радиации оказываются приближенными к самой Земле. Бразильское побережье – этот тот самый пример, где наблюдается минимум напряженности.

Положение максимума внешнего радиационного пояса хорошо коррелирует с возмущенностью магнитного поля Земли. В начале магнитной бури пояс, как правило, резко перемещается к центру Земли, потоки частиц данной энергии в нем уменьшаются. После окончания магнитной бури, пояс возвращается на прежнее место. Иногда происходит только сжатие радиационного пояса без изменения числа частиц в нем.

2.3 Ионизирующие излучения и их свойства

Еще в самом начале двадцатого века были обнаружены в большом количестве те самые актуальные для изучения космические лучи. Здесь стоит обратить внимание на вклад известного физика В.Ф. Гесса. Когда он решил провести эксперимент и подняться на большом воздушном шаре, то он вдруг установил, что чем больше высота, тем быстрее разряжается сам электроскоп. И получается, что ионизация воздуха, которая в тот момент принимала активное участие в снижении разряда устройства, отличалась своими уникальными характеристиками. И тогда произошло то самое важное и долгожданное открытие особых лучей, которые стали называться космическими. За такое достижение, физик смог получить достойное вознаграждение. Но тем не менее можно вспомнить, что и другой ученый Э. Милликен также говорил о таких лучах.

Синонимом космического излучения является ионизирующее излучение, или же, другими словами – радиация. Ей называется совокупность потоков различных элементарных частиц, фотонов, атомных ядер, которые могут ионизировать вещество. Однако сюда не входят ультрафиолетовое излучение, и видимый свет, т.к. они лишь в некоторых условиях имеют способность к ионизации вещества. Также сюда не входят излучение радиодиапазонов и инфракрасное излучение, потому что у них не хватает энергической силы для того, чтобы ионизировать вещества.

Самым эффективным является ионизирующее излучение нижеперечисленных видов:

а) Коротковолновое электромагнитное излучение (поток фотонов высоких энергий):

- 1) рентгеновское излучение;
- 2) гамма-излучение.

б) Потоки частиц:

- 1) нейтронов;
- 2) бета-частиц (электронов и позитронов);
- 3) мюонов, протонов и др. элементарных частиц;
- 4) ионов, а также альфа-частиц, осколков деления (появляются при делении ядра), кластеров (это легкие ядра, которые испускаются при кластерном распаде).

Ионизирующее излучение, или радиация, создается различными типами ядерных частиц. К важнейшим из них относятся нейтроны, протоны, ионы, электроны, гамма-кванты и фотоны, характеристики взаимодействия которых в значительной степени зависят от энергии ядерных частиц.

В общем виде радиационные факторы можно разделить на две больших группы по их происхождению – естественному или искусственному.

К первой группе относят ионизирующее излучение, источники которого – различные природные явления (например, космическое излучение), ко второй – излучение, которое возникает за счет деятельности человека (например, ионизирующее излучение ядерных энергетических установок).

Самым большим источником радиации на Земле является Солнце. Солнце излучает все длины волн в электромагнитном спектре. Большинство из них находится в виде видимого, инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Время от времени на поверхности Солнца происходят гигантские взрывы, называемые солнечными вспышками, которые выбрасывают огромное количество энергии в космос в виде рентгеновских лучей, гамма-лучей и потоков протонов и электронов. Это называется событием с солнечными частицами. Эти солнечные вспышки могут иметь серьезные последствия для космонавтов и их оборудования даже в местах, удаленных от Солнца.

Космическое излучение отличается от тех видов излучения, с которыми мы сталкиваемся здесь, на Земле. Космическое излучение состоит из атомов, у которых оторвались электроны, когда атом разогнался в межзвездном пространстве до скоростей, приближающихся к скорости света — в конце концов,

осталось только ядро атома. Космическое излучение состоит из трех видов излучения: частицы, захваченные магнитным полем Земли; частицы, выбрасываемые в космос во время солнечных вспышек (солнечные частицы); и галактические космические лучи, представляющие собой высокоэнергетические протоны и тяжелые ионы из-за пределов нашей Солнечной системы. Все эти виды космических излучений представляют собой ионизирующие излучения.

Ионизирующее излучение обладает способностью проходить через вещества и изменять их по мере прохождения. Когда это происходит, оно ионизирует атомы (выбивает из них электроны) в окружающем материале, с которым взаимодействует. Ионизирующее излучение похоже на пушечное ядро атомного масштаба, которое пробивает материал, оставляя после себя значительные повреждения. Дополнительные повреждения также могут быть вызваны вторичными частицами, которые приводятся в движение частицей первичного излучения. И как раньше уже упоминалось, частицы, связанные с ионизирующим излучением в космосе, подразделяются на три основные группы в зависимости от источника излучения: галактические космические лучи, частицы солнечных вспышек и частицы радиационного пояса (пояса Ван Аллена), захваченные в космическом пространстве вокруг Земли.

Когда речь идет именно о новых, уникальных, современного происхождения космических машинах, то важно помнить, что именно то самое космическое излучение является опасным для борта данных кораблей. Дело все в его основных особенностях. Оно поступает прямо из Млечного Пути. В нем присутствует большое число ядер различных представленных атомов. У них отрываются электроны, которые окружают ядро, а также наблюдается огромнейшая скорость полета. Само по себе рассматриваемое излучение представляет собой нелегкие по весу ионы тех элементов, где нет ни одного указанного электрона. Конечно, это легко объяснить, ведь они перемещались с огромнейшей скоростью. Главная особенность их состоит в том, что они проходят через любые преграды. То есть они легко могут проникнуть даже через кожные покровы человека, который находится в космосе с разными задачами.

2.4 Воздействие ионизирующих лучей на экипаж

За пределами низкой околоземной орбиты космическая радиация может подвергать космонавтов значительному риску лучевой болезни и повышенному пожизненному риску рака, воздействию на центральную нервную систему и дегенеративных заболеваний. Научные исследования воздействия различных доз и мощностей излучения дают убедительные доказательства того, что рак и дегенеративные заболевания следует ожидать от воздействия галактических космических лучей или событий, связанных с солнечными частицами. Миллизиверт (мЗв) — это форма измерения, используемая для измерения радиации. Поглощенная доза излучения, воздействию которой подвергаются

космонавты, находится в диапазоне от 50 до 2000 мЗв. 1 мЗв ионизирующего излучения эквивалентен примерно трем рентгенограммам грудной клетки. Это, как если бы человеку сделали от 150 до 6000 рентген грудной клетки.

Есть три основных фактора, которые определяют радиационный риск экипажа космического аппарата в космическом полете, количество радиации, которую получают космонавты, или то, как радиация влияет на космонавтов.

К ним относятся:

- высота над Землей – на больших высотах атмосферная защита Земли отсутствует, а магнитное поле слабее, поэтому меньше защита от ионизирующих частиц, и космические аппараты чаще проходят через захваченные радиационные пояса;

- солнечный цикл – Солнце имеет 11-летний цикл, кульминацией которого является резкое увеличение количества и интенсивности солнечных вспышек, особенно в периоды, когда на Солнце много пятен;

- индивидуальная восприимчивость – исследователи все еще работают над тем, чтобы определить, что делает одного человека более восприимчивым к воздействию космической радиации, чем другого человека. Это область активных исследований.

Радиация крайне негативно сказывается на здоровье космонавтов, так как:

- она разрушает клетки костного мозга, пищеварительного тракта и др.;
- деструктивно влияет на половую функцию;
- приводит к изменениям на генном уровне, в следствие чего происходят мутации и различного рода наследственные болезни;
- изменяет работу сердца и нервной системы;
- развивает злокачественные новообразования, в следствие чего появляются раковые заболевания;
- ведет к ухудшению зрительных органов.

Даже те профессионалы, которые находятся за рулем воздушного судна, испытывают большие проблемы, трудности с негативным влиянием радиации прямо на глаза. Для того чтобы проверить данное предположение, были проведены эксперименты. В них принимали участие более четырехсот человек среднего возраста. И всего где-то четвертая часть из них оказались теми самыми пилотами. И получились такие данные: у пилотов был риск появления катаракты в три раза больше, чем у других специалистов.

Космонавты постоянно испытывают на себе много негативных факторов среды, в которой они вынуждены какое-то время находиться. И в тот самый момент, когда профессионал находится достаточно далеко от нашей планеты, то на него активно и сильно действуют различные лучи космического характера. И чем дальше он находится, тем эти удары сильнее и мощнее. В итоге организм страдает так сильно, что со временем увеличивает вероятность онкологии и других смертельно-опасных заболеваний.

Исходя из выполненного анализа, который проводился в медицинских условиях, можно было сделать вывод о том, что есть конкретные дозы радиации, допустимые для профессионала, работающего в космическом пространстве. Для

каждого органа они свои. Например, в целом для кожи предел влияния составит семьсот бэр, для глаз этот показатель приблизительно в три раза меньше, а для ступней и кистей рук составляет 980 бэр. Именно бэр является часто используемой единицей измерения эквивалентной дозы радиации и расшифровывается как биологический эквивалент рентгена. Так, один зиверт равен ста бэр. Если человек попадает в состояние невесомости, то воздействие радиации становится сильнее и мощнее.

Но не только на организм человека влияют те самые космические лучи. Они воздействуют и на окружающий человека мир, все планеты. Например, если эти же самые лучи проявляют повышенную активность, тогда на улице не очень солнечная и благоприятная для прогулок погода. Все это закономерно и интересно в изучении и подробном рассмотрении.

2.5 Воздействие ионизирующих лучей на оборудование КА

В открытом космосе, космические аппараты (КА) находятся в сложной радиационной обстановке. Радиационные пояса, расположенные во внутренней области магнитосферы Земли, представляют опасность для спутников. Это связано с тем, что датчики и интегральные схемы, а также солнечные элементы подвергаются сильной радиацией.

Излучение в космосе создается частицами, испускаемыми из различных источников как внутри, так и за пределами нашей Солнечной системы. Радиационное воздействие этих частиц может не только вызвать деградацию, но и привести к выходу из строя электронных и электрических систем космических аппаратов или спутников. Были задокументированы случаи, когда высотные коммерческие авиалайнеры, которые летают по полярным маршрутам, сталкивались со сбоями в работе авионики, что происходило под воздействием радиационного излучения.

Космическое излучение может серьезно повлиять на работу спутников. Излучение некоторых частиц настолько энергично, что может проникать внутрь спутника и взаимодействовать с его электронной схемой. Это может вызвать широкий спектр эффектов, от незначительных до отключения жизненно важной системы. Например, если схема управляет направлением антенны спутника, спутник может выйти из контакта с наземными приемниками и временно «потеряться». Важно понимать условия космического излучения, чтобы можно было спроектировать надежные спутники по разумной цене. Недооценка радиационной обстановки приводит к чрезмерному риску для спутника. Это может привести к снижению производительности и сокращению срока службы. С другой стороны, переоценка радиационной обстановки может привести к чрезмерному проектированию инженерами. Это может увеличить стоимость спутника и даже ограничить его возможности.

Спутники на околоземной орбите подвергаются воздействию значительного количества высокоэнергетического электромагнитного излучения и заряженных частиц, которые не достигают поверхности Земли из-за ее защитной атмосферы. Космическая среда вокруг Земли заполнена энергичными заряженными частицами, захваченными радиационными поясами Ван Аллена. Пространственная протяженность, энергия и количество излучения в поясах Ван Аллена контролируются космической погодой, при этом значительное увеличение их размера и количества излучения происходит во время сильных геомагнитных бурь. Хотя спутники обычно не обращаются непосредственно в поясах Ван Аллена, эти заряженные частицы оказывают значительное влияние на конструкцию космических аппаратов и космических приборов.

Сильное влияние некоторых дополнительных явлений, наблюдаемых прямо в космосе, говорит о том, что становятся все хуже и хуже основные характеристики и особенности выбранных материалов, из которых создаются системы кораблей, выпускаемых в космос. Они повреждаются достаточно быстро. В качестве основного примера можно в данном случае назвать существенное уменьшение показателей качества солнечных батарей. Радиация в данном случае наносит существенный вред. Системы быстро и, что очень опасно, неожиданно могут просто выйти из строя. То есть все основные поломки, повреждения происходят именно по причине влияния радиоактивных элементов.

Такая негативная по характеру ситуация происходила даже в семидесятые годы в прошлом веке. Тогда в функционировании современных устройств были конкретные погрешности, проблемы. Спутники Соединенных Штатов Америки в то время не справлялись со своими задачами в полной мере. Все это по причине различных появившихся помех, которые приводили к включению и выключению аппаратуры, а также смене ориентации антенн. Именно по этой причине нужно было что-то срочно предпринимать, как-то справляться с возникшими сложностями.

Материалы атомарного уровня разрушаются радиацией. Транзистор в наше время состоит из миллионов атомов, по этой причине он пройдет через большое количество сбоев, перед тем как окончательно выйдет из строя. Но поскольку микроэлектронные устройства уменьшаются в размерах с каждым годом, и вследствие чего транзистор станет содержать пару тысяч атомов, вместо миллиона, то и маленький сбой сможет значительно быстрее уничтожить его.

Состав и интенсивность излучения существенно меняются в зависимости от траектории космического корабля. Опыт со многими космическими аппаратами, начиная с Explorer I, показывает, что более высокие концентрации электронов наблюдаются между 45° и 85° широты как в северном, так и в южном полушариях, указывая на то, что пояса опускаются на более низкую высоту в этих регионах. Для орбит с малым наклоном, менее 30 градусов, концентрация электронов относительно мала. Из-за асимметричного магнитного поля Земли область в Атлантике около Аргентины и Бразилии, известная как

Южно-Атлантическая аномалия, имеет относительно высокие концентрации электронов.

Солнечная активность вызывает динамические изменения в атмосфере и ионосфере, которые могут повлиять на производительность и надежность спутников в околоземной космической среде, а также наземных технологических систем и сервисов, которые от них зависят. Это состояние называется космической погодой.

Во время экстремальных явлений космической погоды потоки захваченных электронов в поясах Ван Аллена могут увеличиться на несколько порядков по интенсивности, что приведет к повышенному риску отказа спутника. Одним из примеров такого ущерба является ухудшение генерирующей способности спутниковых солнечных панелей.

Наихудшее событие может привести к значительным потерям мощности по выработке электроэнергии — почти до 8% — и вызвать ухудшение дозы ионизирующего излучения на срок до четырех лет, что приведет к повреждению компонентов и сокращению срока службы спутников. Последствия таких потерь чрезвычайно значительны, учитывая нашу растущую зависимость от спутников для широкого спектра услуг, включая связь, навигацию, оборону и критически важную инфраструктуру.

Частицы могут бомбардировать поверхности спутников и взаимодействовать с ними, а иногда обладают достаточной энергией, чтобы проникнуть через их открытые поверхности с возможным доступом к их электрическим, электронным и электрохимическим компонентам. Этот сценарий может вызвать спорадические и необъяснимые ошибки в чувствительных частях космических кораблей, ухудшить критические свойства их конструкционных материалов, поставить под угрозу летную пригодность космических кораблей, представлять временную и неизлечимую опасность для здоровья как находящихся на борту пассажиров, так и космонавтов, и даже привести к полному выходу из строя.

Отказы компонентов, встречающиеся в космосе из-за использования нерадиостойких устройств, могут привести к катастрофическим последствиям, что может привести к гибели космических аппаратов и, возможно, к гибели людей. Крайне важно принять достаточно надежные инженерно-технические меры для обеспечения будущей надежности спутниковых технологий, от которых все больше зависит наше общество.

Поскольку космическое излучение может воздействовать на наши спутники, оно также может отрицательно сказаться на нашем обществе, вызывая проблемы в системах связи, системах GPS-навигации и других высокотехнологичных системах в космосе. Это также может повлиять на авиаперелеты в полярных регионах Земли, которые менее защищены магнитным полем Земли, чем экваториальная область. Большой выброс корональной массы нашего Солнца также может вызвать серьезные последствия в электрических сетях. Излучение частиц, испускаемое Солнцем, возмущает магнитное поле Земли, вызывая «магнитную бурю». Это, в свою очередь, может вызвать скачки

напряжения в линиях электропередач и, в крайнем случае, вызвать отключение электроэнергии. Драматическое событие такого рода произошло в марте 1989 года, когда в результате скачка напряжения отключилась вся система на электростанции, что привело к отключению электроэнергии в большей части Квебека. Из-за нашей растущей зависимости от высокотехнологичных систем такое экстремальное радиационное явление, как это, может потенциально вызвать больше экономических трудностей, чем другие экстремальные явления на нашей планете, такие как ураганы и землетрясения.

3 ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА МАТЕРИАЛЫ КА

3.1 Радиационные эффекты

Космические инструменты несут множество электронных устройств, включая микропроцессоры, регистры в цифровых схемах и т. д. Если заряженная частица из космоса ударит чувствительный узел электронной схемы, это может привести к сбою или необратимому повреждению.

Сохранность и успешная эксплуатация космических систем в космической радиационной среде или на поверхности других тел солнечной системы не могут быть обеспечены без тщательного учета эффектов радиации. Некоторые радиационные эффекты могут ограничивать полет, когда они приводят к быстрому или накопленному ухудшению, которое приводит к сбою в подсистеме или системе, или к катастрофическим системным аномалиям. Примерами могут являться повреждение электронных компонентов из-за полной ионизирующей дозы или повреждающее взаимодействие одного тяжелого иона (термический отказ после «защелкивания»). Другие эффекты могут быть источником помех, ухудшая эффективность полета. Примерами являются радиационный «фон» в датчиках или искажение электронной памяти [15]. Радиационные эффекты внутри спутников часто группируются в три категории: общая ионизирующая доза, повреждение от смещения и эффекты одиночного события.

3.1.1 Общая ионизирующая доза

Эффекты полной ионизирующей дозы в электронике являются результатом повреждения, которое обычно накапливается в течение длительного периода времени в изолирующей области электронного устройства. Это изменяет свойства устройства, что приводит к снижению производительности и в конечном итоге может привести к полному отказу устройства.

3.1.2 Повреждение смещения

Повреждение смещения также является кумулятивным эффектом, но это происходит в полупроводниковом материале электронного устройства. Эти эффекты также приводят к тому, что устройство сначала ухудшается и, возможно, выходит из строя, если оно подвергается достаточному облучению.

3.1.3 Эффекты одиночного события

Эффекты одиночного события (SEE) вызываются одной энергичной частицей и могут принимать различные формы. Эффекты одиночного события вызываются прохождением одной частицы через чувствительную область

электронного устройства. Существует множество типов эффектов одиночного события, которые могут быть как неразрушающими, так и разрушительными для устройства. Обычно они проявляются в виде переходных импульсов в логической или поддерживающей схемах или в виде переверотов битов в ячейках памяти или регистрах. Они могут создавать программные ошибки, такие как нарушение одиночного события (SEU), переходный процесс одиночного события (SET), функциональное прерывание одиночного события (SEFI), и серьезные ошибки, такие как блокировка одиночного события (SEL), разрыв шлюза одиночного события (SEGR), однократный разрыв диэлектрика (SEDR), серьезные ошибки одиночного события (SENE) и перегорание одиночного события (SEB).

а) Однократное расстройство (SEU): временный эффект, влияющий в основном на память.

б) Переходный процесс одиночного события (SET): временный импульс проходит по цепи. Ничего нельзя с ним поделать.

в) Блокировка одиночного события (SEL): может разрушить компонент, затрагивая главным образом КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник).

г) Разрыв шлюза одиночного события (SEGR): потенциально разрушительный, затрагивающий субмикронную структуру.

д) Перегорание одиночного события (SEB): имеет разрушительное воздействие, затрагивая в основном силовые полевые МОП-транзисторы.

е) Функциональное прерывание одиночного события (SEFI): возникает, когда нарушение регистров состояния прерывает нормальную работу цепей, и затронутое устройство переходит в другой режим работы или блокируется. По сути, SEFI — это SEU, происходящие на участках управления цепи. Их сложнее восстановить, чем другие SEU, и обычно требуется программный сброс или отключение питания.

ж) Однократный разрыв диэлектрика (SEDR): вызван ионизированной частицей внутри области сильного поля диэлектрика, которая создает токопроводящий путь, что приводит к явлению скачка тока (скачок питания сердечника). Однако SEDR скорее считается академическим интересом, поскольку в основном наблюдается при тестировании, а не в космосе.

з) Серьезные ошибки одиночного события (SENE): также называемые «застрявшими» битами, представляют собой биты памяти, которые невозможно изменить в процессе записи, поэтому они становятся нефункциональными. Механизм, лежащий в основе этого, объясняется эффектами микродоз, вызванными одиночными ионами [12].

Некоторые из этих эффектов носят только разрушительный характер, например SEU и SET, а некоторые другие могут необратимо разрушить цепь, например SEL, SEGR и SEB.

Тяжесть SEE зависит от типа эффекта и того, насколько критична система. Тяжесть эффекта может быть настолько мала, что может остаться незамеченной. С другой стороны, это может привести к отключению системы на спутнике.

Могут появиться несколько типов серьезных ошибок, потенциально разрушительных: блокировка одиночного события (SEL) приводит к высокому рабочему току, превышающему технические характеристики устройства, и должна быть устранена сбросом питания. Другие серьезные ошибки включают перегорание силовых МОП-транзисторов, разрыв затвора, замороженные биты и шум в ПЗС-матрицах. В целом, он представляет собой немедленную угрозу — быстрые всплески энергии, когда солнечная частица или космический луч пронизывают цепь.

В космической среде конструкторы космических аппаратов должны учитывать две основные причины эффектов одиночного события (SEE): космические лучи и протоны высокой энергии. Для космических лучей SEE обычно вызваны его тяжелым ионным компонентом. Эти тяжелые ионы вызывают прямую ионизацию SEE, т.е., если ионная частица, пересекающая устройство, накапливает достаточный заряд, может произойти событие, такое как переключение бита памяти или переходный процесс. Космические лучи могут быть галактическими или солнечными по происхождению.

Протоны, обычно захваченные радиационными поясами Земли или солнечными вспышками, могут вызывать прямую ионизацию SEE в очень чувствительных устройствах. Однако чаще всего протон может вызвать ядерную реакцию вблизи чувствительной области устройства и, таким образом, создать косвенный эффект ионизации, потенциально вызывающий SEE.

«Высокоэнергетические частицы отбрасывают энергию в вашу электронику», — сказал Клайв Дайер, инженер-электрик из Космического центра Университета Суррея в Англии. «Эффекты одиночного события испортят ваши компьютеры, перепутав ваши данные — в двоичном коде — от 1 до 0». Многие космические аппараты оборудованы для восстановления после этих стычек с частицами. Но некоторые удары могут нарушить работу программ космического корабля, повлиять на системы связи или навигации и привести к сбоям в работе компьютеров. В худшем случае результат может быть катастрофическим. Несколько лет назад ноутбуки астронавтов на космическом челноке разбились, когда они проходили через особенно волосатые участки радиационных поясов, а космический телескоп НАСА «Хаббл» упреждающе выключает свои научные инструменты, когда он проходит через этот регион [12].

3.2 Повреждения КА от ионизирующих излучений

Космическое излучение может создавать и другие повреждения спутников. И потом, есть эффекты, которые ухудшаются со временем. Заряженные частицы могут собираться на поверхности космического корабля и накапливать заряд в течение нескольких часов. Подобно тому, как вы идете по комнате с ковровым покрытием и поворачиваете металлическую дверную ручку, зарядка вызывает статическое электричество, которое может повредить электронику, датчики и

солнечные батареи. В апреле 2010 года зарядка отключила системы связи спутника Galaxy 15, отправив его на восемь месяцев в дрейф.

Высокоэнергетические электроны, протоны и космические лучи разрушают солнечные элементы, обесцвечивают стекла и покрытия объективов камер, разрушают изоляционные материалы и поджаривают электронику. Материалы космического корабля в суровых условиях могут даже настолько электризоваться, что вызывают небольшие удары молнии в сам спутник. «Радиация так или иначе влияет практически на каждую часть космического корабля», — сказал Дрю Тернер, космический физик из «Applied Physics Laboratory». Но мы до сих пор мало знаем о том, как все множество заряженных частиц в космосе взаимодействует с космическим кораблем, потому что радиационная среда может меняться быстро и случайным образом, а факторы, вызывающие эти изменения, сложны, в большинстве случаев непредсказуемы, и их невозможно идеально смоделировать. «На Земле просто нет объекта, способного воспроизвести диапазон частиц и интенсивности излучения, которые мы имеем в космосе», — сказал Тернер. Обойти это можно, проводя активные эксперименты в космосе, например, устанавливая группу электронных плат, солнечных элементов или линз так же, как на космическом корабле, отправляя их в космос и наблюдая, как они деградируют со временем. По словам исследователей, это жизненно важно. В то время как самые надежные спутники (включая Van Allen Probes) могут работать от 5 до 15 лет, многие запускаемые спутники — это CubeSat и SmallSat, которые не прослужат больше года или двух. Из-за того, что вокруг земного шара летает слишком много безжизненных спутников, возможны непреднамеренные столкновения, в результате которых образуется космический мусор, который может вызвать каскад разрушенных космических кораблей.

Охрупчивание — это форма повреждения материала, вызванная воздействием УФ-излучения, вследствие чего происходит значительное снижение пластичности материала, что делает материал хрупким. Многие полимеры особенно чувствительны к таким фотонам, энергия которых достаточно высока, чтобы модифицировать структуру их химических связей. Воздействие ультрафиолета также вызывает электрические изменения в виде изменения удельного сопротивления и оптические изменения, влияющие как на тепловые характеристики, так и на непрозрачность. Особенно чувствительным к УФ-излучению элементом является солнечная батарея. В частности, потемнению подвержено покрывное стекло солнечного элемента и сопутствующий клей. Это приводит к уменьшению освещенности элемента и повышению рабочей температуры, что отрицательно сказывается на работе элемента. Радиационные повреждения в той или иной степени затрагивают все материалы, в том числе и человека. Высокоэнергетическое корпускулярное излучение наиболее сильно проявляется в радиационных поясах Ван Аллена, но также на значительном уровне в любой космической операции. Даже при небольших дозах облучения некоторые металлы, такие как кадмий и цинк, могут образовывать металлические усы [13].

Полупроводниковые материалы и биологические ткани особенно чувствительны к повреждениям, вызванным высокоэнергетическими заряженными и нейтральными частицами. Обычно это происходит как из-за смещения атомов из узлов кристаллической решетки, так и из-за сопутствующей локальной ионизации, а также следа ионизации, вызванного проникающим излучением. Защита представляет собой сложную задачу, поскольку экранирующий материал сам по себе будет генерировать вторичное излучение из-за прохождения через него первичной высокоэнергетической частицы. Следует отметить, что «тяжелые» частицы, такие как протоны и нейтроны, наносят значительно больший ущерб, чем легкие, такие как электроны. Они вызывают плотную дорожку ионизации через материал, пока их не остановит столкновение атомов. При этом возникает значительное смещение атома, приводящее к дальнейшей ионизации, чего не происходит для электронов [13].

В таблице 3.1 приведены основные эффекты, производимые различными типами ионизирующего излучения в полупроводниковых устройствах [15].

Таблица 3.1 – Типы ионизирующих излучений и их воздействие на полупроводниковые приборы

Частица	Физический эффект	Электрический результат	Окружающая среда
Фотон	Образование заряда в окисле	Смещение порогового напряжения	Космос, радиация
	Образование поверхностных состояний	Ухудшение подвижности и снижение подпорогового напряжения	Космос, радиация
Тяжелый ион	Образование электронно-дырочных пар	Единичные сбои	Космос
Нейтрон	Смещение атома	Ухудшение βF	Радиация
Протон	Отскок атома	Единичные сбои	Космос
	Ядерное взаимодействие	Единичные сбои	Солнечные вспышки
	Образование заряда в окисле	Смещение порогового напряжения	Радиационные пояса Земли
Электрон	Создание заряда окиси	Смещение порогового напряжения	Космос
	Смещение атома	Ухудшение βF	Радиационные пояса Земли

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

4.1 Необходимость радиационной защиты

После проведения испытаний и тестов элементов КА, необходимо, используя анализ этих результатов, найти наиболее стойкий к радиации материал, чтобы минимизировать повреждения. Сначала инженеры используют компьютерные модели, чтобы определить, каким будет пункт назначения космического корабля — сколько радиации он там встретит — и какие тесты им нужны, чтобы отразить эту среду в лаборатории, а затем исследуют параметры радиоэлектронных средств, и то, как они подвергаются радиации.

По некоторым прогнозам, к 2030 году мы сможем увидеть до 50 000 спутников, окружающих Землю, и больше космонавтов в космосе, чем когда-либо прежде. Возникает необходимость в наискорейшем принятии мер по защите как космонавтов, так и космических аппаратов от радиации. Каждая часть каждого прибора, предназначенного для космических полетов, проходит радиационные испытания, чтобы убедиться, что он выживет в космосе.

4.2 Радиационная стойкость материалов

Прежде чем говорить о наиболее устойчивых к радиации материалах, нужно разобраться, что же вообще представляет собой радиационная стойкость. А ей называется способность веществ резервировать свои определенные параметры под действием радиации. Данные характеристики меняются после перемещения в кристаллических решетках атомов и также еще множество иных факторов влияют на изменения. Иными словами, изменения в кристаллической решетке меняют и свойства материала.

Когда радиация оказывает влияние на металл, то одиночные дефекты, появляющиеся как результат, упрочняют материал. К тому же электрическое сопротивление металлов возрастает из-за дефектов в их решетке. Полупроводниковые материалы наиболее склонны к изменению свойств под воздействием радиации.

Чтобы гарантировать, что электронные компоненты (основанные на полупроводниках), такие как транзисторы, диоды и т. д., способны выжить в радиационной среде, необходимо рассчитать общую дозу внутри космического корабля в радах. На основе расчетов устанавливаются требования для электронных деталей. Если используемые детали не соответствуют этим требованиям, то можно провести более подробный трехмерный анализ, чтобы определить дозу в фактическом местоположении «мягких» частей. Обычно это приводит к снижению дозы за счет включения большего количества отдельных

компонентов космического корабля, что приводит к дальнейшему снижению значений дозы. Если доза все еще слишком высока, то можно применить точечное экранирование (т. е. размещение экрана из тантала или вольфрама в месте расположения фактической детали) или можно найти радиационно-стойкую версию детали [13].

Решить проблему слабой радиационной стойкости полупроводниковых материалов космического аппарата смогли Ученые Университета Информационных Технологий, Механики и Оптики (ИТМО) совместно с Научно-производственным объединением (НПО) «Специальные материалы». Их предложением было использование полупроводникового материала, что устойчивее противостоит радиационному излучению, где большой акцент был сделан на использование полупроводников с наиболее широкой запрещенной зоной (ей является та часть значения энергии, что не содержится в электроне). Если эта зона шире, то удельное сопротивление соответственно тоже больше, а значит он и намного больше сможет выдержать напряжения. Параллельно проводились эксперименты с оксидом галлия (Ga_2O_3), который является достаточно неплохим полупроводниковым материалом, но все же в ходе экспериментов пришли к выводу о том, что арсенид алюминия-галлия ($AlGa$) $2O_3$ является наиболее подходящим и имеет больше преимуществ. Профессор института перспективных систем передачи данных, Дмитрий Бауман, объясняет: «Это такой твердый раствор, не примесь, он встраивается в кристаллическую решетку вместо атомов галлия. Где-то стоит галлий, где-то алюминий, это смесь оксида галлия и оксида алюминия. Установлено, что в нем значительно выше подвижность электронов, что хорошо для любого полупроводника, чем выше подвижность, тем быстрее материал реагирует на внешнее воздействие, тем быстрее будет работа прибора» [19].

На такое качество как высокую стойкость по отношению к негативному влиянию радиации влияет основные виды химических связей неорганического характера соединений. В центре внимания в данном случае находятся именно кристаллические решетки ионного типа. Они отличаются повышенными показателями устойчивости к лучам.

Но и это еще далеко не все основные моменты, которые стоит обязательно учитывать. Полимерные материалы после применения радиации, страдают.

Но есть один из важных и актуальных вопросов, на котором также стоит здесь и сейчас сделать акцент. Он заключается в том, от чего зависит устойчивость по отношению к радиации. Здесь важно оценить именно механические параметры, особенности. Иногда некоторые полимеры достаточно хрупкие, им очень трудно справиться с конкретными, казалось бы, даже не такими масштабными, на первый взгляд нагрузками.

Есть еще один немаловажный момент, который также влияет на показатель указанной выше стойкости. Это то самое актуальное для исследования молекулярное строение.

Полимеры, которые содержат в макромолекуле бензольные ядра являются наиболее устойчивыми к радиации, самыми неустойчивыми же являются

полимеры, представляющие алифатические звенья и в состав которых входят четвертичные атомы углерода и атомы галогенов. Есть список материалов по степени уменьшения показателя стойкости к радиации:

- полистирол;
- полиэтилен;
- полиамиды;
- ПВХ (поливинилхлорид);
- ПММА (полиметилакрилат);
- политетрафторэтилен [17].

В 2020 году в Румынии, г. Яссы, была проведена выставка международных изобретений под названием «INVENTICA-2020». Там был представлен проект многослойного полимера, при поддержке Центра подготовки космонавтов и технологического университета в Белгороде. Цель проекта заключается в дальнейшем применении полимеров для радиационной защиты в космическом пространстве, а именно в обивке МКС и в создании скафандров. Данный полимер практически не имеет аналогов, к тому же в данное время он выпущен, уже был проверен в наземных станциях и позже будет проходить испытания уже непосредственно на МКС [18].

4.3 Перспективные методы защиты

Что касается перспективных методов защиты, то здесь есть несколько идей. Например, есть возможность использовать воду и пластики, чтобы изготовить защиту для определенного отсека, а не всего КА. Использование таких материалов обусловлено тем, что они представляют из себя атомы легких химических элементов, которые обеспечивают надежную защиту, т.к. делают нейтроны более медленными.

Например, США на МКС обкладывают вместо алюминия, который обладает слабой радиационной стойкостью, полиэтиленовыми плитами свои спальные места.

Также необходимо защитить наиболее уязвимые места человеческого тела, которыми являются: система кровотока, что означает необходимость защиты тазовой области, а также отдел мозга называемый гиппокам, который можно спасти от радиации шлемом из полиэтилена или подобного материала.

Многие опытные исследователи постоянно размышляют о новых, современных вариантах качественной, надежной защиты. К ним относятся, к примеру, состояние сна – гибернация, и изменение органов, для улучшения человека – киборгизация. Почему это так важно. Дело все в том, что в состоянии гибернации многие процессы становятся не такими активными, как во время бодрствования. Что касается киборгизации, то, когда люди в прошлые года отправлялись в разные экспедиции, особенно в сложные по условиям места, им

удаляли все зубы или заменяли хрусталик глаза, удаляли аппендикс, чтобы их организм легче справился с нагрузками.

И появляется такая точка зрения, что людей можно изменить, как-то поправить их и потом отправить в долгожданный полет. То есть исследователи, разные ученые с большим опытом работы постоянно что-то меняли в лучшую сторону, совершенствовались, чтобы возникало меньше непредвиденных проблем.

Важно помнить об индивидуальной радиочувствительности экипажа корабля, и поэтому возникает идея облучения крови определенной дозой радиации, в пробирках, для отбора наиболее выносливых космонавтов [16].

Путешествие к Луне также возможно, если ориентироваться на опыт экипажа «Аполлон». Невозможно добраться до Луны, не коснувшись радиационных поясов Ван Аллена, поэтому предполагается по опыту маршрута экипажа «Аполлон» так выстроить траекторию пути, чтобы пройти через наиболее тончайшие участки поясов.

5 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЛОЩАДИ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

5.1 Радиационный теплообменник

Как говорилось в предыдущих частях, радиация в космосе вызывает множество видов сбоев и ошибок в аппарате. Однако, помимо этого существует и другая проблема радиационного излучения – перегревание. При выборе характеристик оборудования для обеспечения теплового режима на борту КА возникает проектная задача расчета потребной площади радиационного теплообменника.

Радиационным теплообменником (РТО) называется устройство, которое сбрасывает избытки внутренней тепловой энергии приборов КА в космическое пространство. В самом простом варианте исполнения представляет из себя участок поверхности КА со специальным покрытием, позволяющим излучать максимальное количество лучистой тепловой энергии. Как правило, размещается на затененных участках корпуса КА.

Также можно обратить внимание на современные решения, связанные с процессом терморегулирования. Избытки внутренней энергии должны быть транспортированы к РТО, и для этого нам необходимы сложные активные системы терморегулирования или простые пассивные системы.

Среди лучистых тепловых потоков на орбите Земли можно выделить: тепловой поток солнечного излучения ($Q_{\text{солн}}$); тепловой поток солнечного излучения, отраженный от земной поверхности ($Q_{\text{отр}}$); тепловой поток собственного излучения планеты ($Q_{\text{пл}}$) [1].

В целом, схема построения системы терморегулирования температур приборов на борту КА показана на рисунке 5.1.

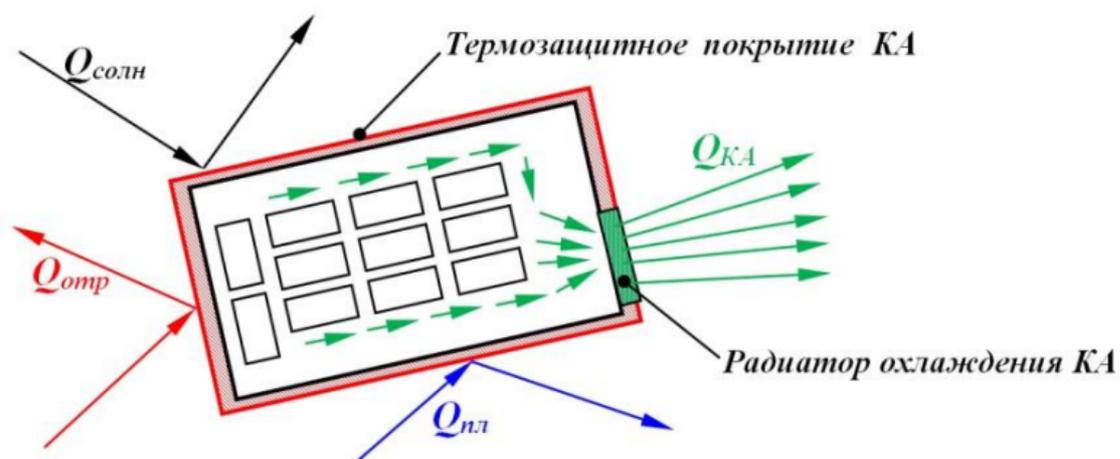


Рисунок 5.1 – Упрощенная схема способа терморегулирования на борту КА

5.2 Расчет площади радиационного теплообменника

Для ознакомления рассмотрим пример расчета площади радиационного теплообменника. Проектируется КА со следующими характеристикам: площадь поверхности КА $S_{пов}=10\text{м}^2$; оптический коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью КА $A_s=0,2$; коэффициент степени черноты поверхности КА $\varepsilon_W = 0,1$. Внутри КА расположены три прибора с мощностями энергопотребления: $N_1=100\text{ Вт}$, $N_2=80\text{ Вт}$, $N_3=50\text{ Вт}$ соответственно.

Для обеспечения теплового режима и выброса в космическое пространство излишнего тепла на КА установлен радиационный теплообменник с жалюзи, которые периодически закрывают его. Радиационный теплообменник имеет форму прямоугольного листа толщиной $\delta_{PTO} = 0,005\text{ м}$ и площадью S_{PTO} . Радиационный теплообменник сделан из материала с плотностью $\rho_{PTO} = 2300\text{ кг/м}^3$, удельной теплоемкостью $c_{PTO} = 930\text{ КДж/кг}\cdot\text{К}$, степенью черноты внешней поверхности $\varepsilon_W^{PTO} = 0,3$ и начальной температурой поверхности $T_{нач} = 20^\circ\text{C}$.

Считаем, что все приборы мгновенно передают свою мощность на радиационный теплообменник, а внешние тепловые потоки непрерывно действуют на всю поверхность КА.

Требуется подобрать такую площадь радиационного теплообменника S_{PTO} , чтобы за период в 25 часов температура его поверхности отклонилась от начальной $T_{нач}$ не более чем на 1 градус.

Рассмотрим решение данной задачи поэтапно.

а) Для нахождения площади радиатора исходя из температуры, нам необходимо составить уравнение теплового баланса:

$$c_{PTO} \cdot m_{PTO} \cdot \frac{dT_{PTO}}{dt} = A_S \cdot (Q_{солн} + Q_{отп}) + \varepsilon_W \cdot Q_{пл} + \sum_{i=1}^3 N_i - S_{PTO} \cdot \varepsilon_W^{PTO} \cdot \sigma \cdot T_{PTO}^4(t), \quad (5.1)$$

Площадь из уравнения не будем выражать, а будем подставлять методом перебора в конце.

б) Для того, чтобы найти площадь, которую в дальнейшем решении мы будем находить методом перебора, нам надо найти изменение температуры (dT_{PTO}), для этого мы из уравнения теплового баланса выразим dT_{PTO} :

$$dT_{PTO} = \frac{1}{c_{PTO} \cdot m_{PTO}} \cdot [A_S \cdot (Q_{солн} + Q_{отп}) + \varepsilon_W \cdot Q_{пл} + \sum_{i=1}^3 N_i - S_{PTO} \cdot \varepsilon_W^{PTO} \cdot \sigma \cdot T_{PTO}^4(t)] dt, \quad (5.2)$$

в) Также чтобы найти изменение температуры (dT_{PTO}) мы можем воспользоваться следующей формулой:

$$dT_{PTO} = T_{PTO}(t + dt) - T_{PTO}(t), \quad (5.3)$$

г) Исходя из формул в первом и втором этапах мы можем составить зависимость температуры от текущего времени, чтобы найти температуру через шаг времени. Это наша основная формула, далее будем подставлять в нее значения:

$$T_{PTO}(t + dt) = T_{PTO}(t) + \frac{1}{c_{PTO} \cdot m_{PTO}} \cdot [A_S \cdot (Q_{солн} + Q_{отр}) + \varepsilon_W \cdot Q_{пл} + \sum_{i=1}^3 N_i - S_{PTO} \cdot \varepsilon_W^{PTO} \cdot \sigma \cdot T_{PTO}^4(t)] dt \quad (5.4)$$

д) Далее подготовим данные для расчета формулы из 3 этапа исходя из постоянных и данных из условия:

1) Характеристики поверхности КА					7) Параметры расчета		
Площадь поверхности КА, м ²	A_S	ε_W				Интервал расчета, час	
10	0,2	0,1				25	
2) Параметры солнечного излучения							
Температура Солнца, К	Радиус Солнца, м	Расстояние от Солнца до КА, м	Кэф-т Ст-на Больцмана	Кэф-т ослабления			
5755	6,96E+08	1,50E+11	0,000000567	0,000483			
Уд. Мощ-сть Солн излучения $q_{солн}$, Вт/м ²							
13985,55							
3) Параметры тепловых потоков от Земли							
Альбедо Земли	Высота орбиты, км	$\cos A$					
0,29	300	1					
ε_0	Уд. Мощн-ть $q_{отр}$, Вт/м ²	Уд. Мощн-ть $q_{пл}$, Вт/м ²					
0,95502931	3303,933502	3492,728288					
4) Параметры тепловыделений от приборов							
Мощность N1, Вт	Мощность N2, Вт	Мощность N3, Вт					
100	80	50					
5) Параметры радиационного теплообменника							
Удельная теплоемкость РТО, Дж/кгК	Толщина стенки радиатора, м	Плотность РТО, кг/м ³	ε_W	Кэф-т Ст-на Больцмана	Начальная температура, кельвин	Площадь РТО, м ²	
930000	0,005	2300	0,3	0,000000567	293	1,2	
Масса РТО, кг							
13,8							

Рисунок 5.2 – Данные для расчета задачи

Рассмотрим остальные параметры, необходимые для решения задачи:

- коэффициент Стефана-Больцмана – физическая постоянная, которая показывает мощность излучения абсолютно черного тела;
- $Q_{солн}$ – удельная мощность солнечного излучения, Вт/м² – отношение мощности излучения Солнца к ее весу;
- $Q_{отр}$ – удельная мощность отраженных лучей планеты;
- $Q_{пл}$ – удельная мощность планеты – отношение мощности к весу планеты;
- Площадь РТО – площадь теплообменника, для начала взяли площадь 1,2 м²;
- dt – это время через которое будем считать следующую температуру.
- $T_{PTO}(t)$ – предыдущая температура.
- $T_{PTO}(t+dt)$ – следующая температура.

е) Имея на руках начальную температуру (293 К), будем искать температуру через некоторое время, например, 450 секунд. Для этого мы подставим в формулу из 4 этапа наши данные из таблицы. Получаем 293,0888077 К, это температура через 450 секунд.

ж) Дальше считаем следующую температуру, везде вместо T_{PTO} подставляем полученную температуру из 6 этапа, и получаем 293,1775514 К, это температура еще через 450 секунд.

з) Далее считаем каждую температуру пока не выйдет 25 часов, т.е. 90000 секунд. Поскольку это составляет 200 итераций, – будем проводить расчеты в Excel, построив таблицу.

и) После чего рассчитаем значения dT_{PTO} , чтобы было удобнее узнать разницу между наибольшей и наименьшей температурами.

й) В конце мы получим вот такие значения:

Номер точки	Текущее время, сек	Шаг изм. Времени, сек.	dT_{PTO}	$T_{PTO}(t+dt)$
1	450	450		293
2	900	450	0,08880767	293,0888077
3	1350	450	0,08874369	293,1775514
4	1800	450	0,088679698	293,2662311
5	2250	450	0,088615693	293,3548468
6	2700	450	0,088551677	293,4433984
7	3150	450	0,088487649	293,5318861
8	3600	450	0,08842361	293,6203097
9	4050	450	0,088359559	293,7086692
10	4500	450	0,088295496	293,7969647
11	4950	450	0,088615693	293,8855804
12	5400	450	0,088167058	293,9737475
13	5850	450	0,088102962	294,0618505
14	6300	450	0,088038854	294,1498893
15	6750	450	0,087974736	294,237864
16	7200	450	0,087910607	294,3257747
17	7650	450	0,087846467	294,4136211
18	8100	450	0,087782317	294,5014034
19	8550	450	0,087718156	294,5891216
20	9000	450	0,087653984	294,6767756
21	9450	450	0,087589803	294,7643654
22	9900	450	0,087525611	294,851891
23	10350	450	0,087461409	294,9393524
24	10800	450	0,087397196	295,0267496
25	11250	450	0,087332974	295,1140826
26	11700	450	0,087268742	295,2013513
27	12150	450	0,087204501	295,2885558
28	12600	450	0,087140249	295,3756961
182	81900	450	0,077191618	308,0248754
183	82350	450	0,077127059	308,1020025
184	82800	450	0,077062505	308,179065
185	83250	450	0,076997956	308,256063
186	83700	450	0,076933414	308,3329964
187	84150	450	0,076868877	308,4098652
188	84600	450	0,076804345	308,4866696
189	85050	450	0,07673982	308,5634094
190	85500	450	0,076675301	308,6400847
191	85950	450	0,076610788	308,7166955
192	86400	450	0,076546282	308,7932418
193	86850	450	0,076481781	308,8697236
194	87300	450	0,076417287	308,9461409
195	87750	450	0,0763528	309,0224937
196	88200	450	0,076288319	309,098782
197	88650	450	0,076223845	309,1750058
198	89100	450	0,076159378	309,2511652
199	89550	450	0,076094917	309,3272601
200	90000	450	0,076030464	309,4032906
Итого			3,83130282	

Рисунок 5.3 – Результаты изменения температур при площади РТО 1,2 м²

Как мы видим в последнем столбце ($T_{PTO}(t+dt)$), а также в итоге предпоследнего столбца (dT_{PTO}), – температура за 25 часов повысилась более чем

на 1 градус. Исходя из этого будем повышать площадь теплообменника, пока не получим необходимый результат.

к) Изменяя площадь, чтобы температура за 25 часов не изменилась более чем на 1 градус, мы дошли до площади РТО 3,1 м².

Теперь взглянем на таблицу:

Номер точки	Текущее время, сек	Шаг изм. Времени, сек.	dT _{рто}	T _{рто(t+dt)}
1	450	450		293
2	900	450	0,005289903	293,0052899
3	1350	450	0,005280062	293,01057
4	1800	450	0,005270239	293,0158402
5	2250	450	0,005260434	293,0211006
6	2700	450	0,005250646	293,0263513
7	3150	450	0,005240876	293,0315922
8	3600	450	0,005231123	293,0368233
9	4050	450	0,005221389	293,0420447
10	4500	450	0,005211671	293,0472563
11	4950	450	0,005201934	293,0524681
12	5400	450	0,005192181	293,0576709
13	5850	450	0,005182516	293,0628815
14	6300	450	0,005172877	293,0680643
15	6750	450	0,005163244	293,0732276
16	7200	450	0,005153628	293,0783812
17	7650	450	0,005144033	293,0835252
18	8100	450	0,005134456	293,0886597
19	8550	450	0,005124896	293,0937846
20	9000	450	0,005115353	293,0989
21	9450	450	0,005105828	293,1040058
22	9900	450	0,005096322	293,1091021
23	10350	450	0,005086829	293,1141889
24	10800	450	0,005077355	293,1192663
25	11250	450	0,005067899	293,1243342
26	11700	450	0,005058459	293,1293926
27	12150	450	0,005049037	293,1344417
28	12600	450	0,005039631	293,1394813
182	81900	450	0,003777812	293,8132451
183	82350	450	0,003770726	293,8170159
184	82800	450	0,003763652	293,8207795
185	83250	450	0,003756592	293,8245361
186	83700	450	0,003749545	293,8282857
187	84150	450	0,003742511	293,8320282
188	84600	450	0,003735489	293,8357637
189	85050	450	0,003728488	293,8394921
190	85500	450	0,003721485	293,8432136
191	85950	450	0,003714502	293,8469281
192	86400	450	0,003707532	293,8506357
193	86850	450	0,003700575	293,8543362
194	87300	450	0,003693633	293,8580299
195	87750	450	0,003686699	293,8617166
196	88200	450	0,003679788	293,8653963
197	88650	450	0,003672874	293,8690692
198	89100	450	0,003665988	293,8727352
199	89550	450	0,003659099	293,8763943
200	90000	450	0,003652231	293,8800465
Итого			0,210060501	

Рисунок 5.4 – Результаты изменения температур при площади РТО 3,1 м²

Как мы видим, температура в конце не повысилась более чем на 1 градус, и в итоге разница между начальной и конечной температурами составляет 0,210060501.

л) Далее на основе столбцов T_{рто} и текущего времени построим график зависимости изменения температуры от времени:

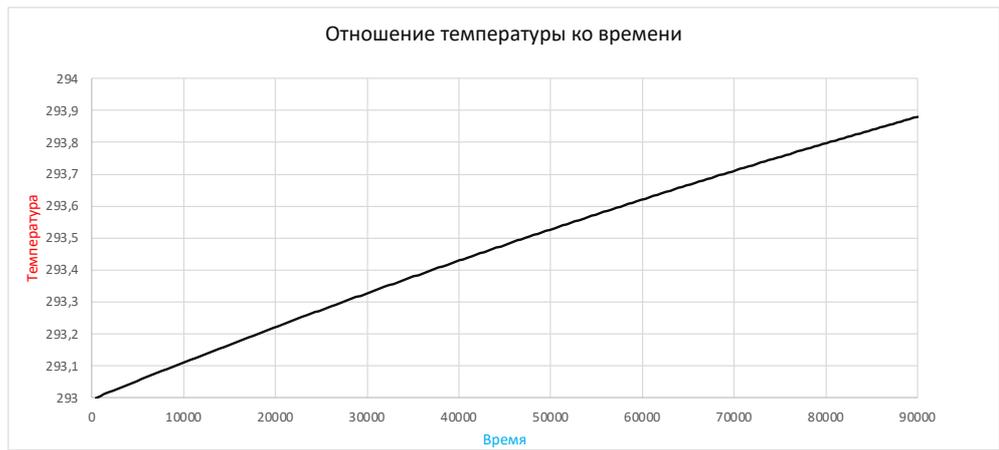


Рисунок 5.5 – График изменения температуры ко времени

В конечном итоге за период в 25 часов температура внешней поверхности радиационного теплообменника изменилась не более чем на один градус, а следовательно площадь $S_{PTO} = 3,1 \text{ м}^2$ нас удовлетворяет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей дипломной работе была рассмотрена проблема космической радиации, которая является актуальной с начала исследования космоса по сей день. По оценке проведенного нами исследования можно сказать, насколько деструктивной она является не только для КА, но и для экипажа. По этой причине необходимо отметить важность предприятия мер по радиационной защите методом нахождения наиболее радиостойких материалов и проведения их испытаний и тестов в сборочно-испытательных комплексах, таких как в ТОО Галам.

Наша работа также позволяет сделать вывод о том, что проблема поражения КА радиацией может быть если не полностью решена, то минимизирована расчетным путем. Например, расчет полета траектории, который поможет одолеть наиболее радиоактивные части поясов Ван Аллена, или решение вопроса перегрева КА путем расчета площади радиационного теплообменника.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Волоцуюев В.В., Ткаченко И.С. Введение в проектирование космических аппаратов. – Издательство Самарского университета, 2018.
- 2 Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. Книга 1. – ТЕХНОСФЕРА, 2015.
- 3 Колесников А.В. Испытания конструкций и систем космических аппаратов. – 2007.
- 4 Space product assurance. Electrical, electronic and electromechanical (EEE) components. ECSS-Q-ST-60C Rev.2.: ECSS, 2013.
- 5 Быков А.П., Пиганов М.Н. Методика автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов. – 2021.
- 6 Испытания электронных компонентов // Электронная версия на сайте <https://www.trad.fr/ru/%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%BE%D1%81/%D0%B8%D1%81%D0%BF%D1%8B%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2/>
- 7 ТОО «Ghalam» // Электронная версия на сайте <https://ghalam.kz/ru/>
- 8 Why Space Radiation Matters // Электронная версия на сайте <https://www.nasa.gov/analogs/nsrl/why-space-radiation-matters>
- 9 Чумаков А.И. Радиационная стойкость изделий ЭКБ
- 10 Van Allen radiation belt // Электронная версия на сайте https://www.wikiwand.com/en/Van_Allen_radiation_belt
- 11 Вокин Г.Г. Введение в ракетно-космическую технику. – Инфра-Инженерия, 2021. – 22–24 с.
- 12 Space Radiation Effects On Electronics – Single Event Effects// Электронная версия на сайте <https://spacetalos.com/news/space-radiation-effects-on-electronics-single-event-effects/>
- 13 Spacecraft systems engineering/ Под ред. Фортестья П., Свинерд Г., Старк Дж. – Wiley, 2004.
- 14 Methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins. ECSS-E-ST-10-12C.: ECSS, 2008.
- 15 Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. Книга 2. – ТЕХНОСФЕРА, 2015
- 16 Почему на Марсе можно побывать только раз в жизни // Электронная версия на сайте <https://tass.ru/kosmos/6761162>
- 17 Радиационная стойкость // Электронная версия на сайте https://e-plastic.ru/slovar/r/radiazionnaua_ctoikoct/
- 18 Новый материал для защиты космонавтов от радиации испытают на МКС // Электронная версия на сайте <https://rg.ru/2021/02/08/novyj-material-dlia-zashchity-kosmonavtov-ot-radiacii-ispytaiut-na-mks.html>

19 Как защитить «мозги» спутника от космической радиации //
Электронная версия на сайте <https://news.itmo.ru/ru/news/10105/>

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на дипломную работу
(наименование вида работы)

Болтенко Влада Дмитриевна

(Ф.И.О. обучающегося)

5B074600 – Космическая техника и технологии

(шифр и наименование специальности)

Тема: «Космическая радиация и методы защиты»

В настоящей дипломной работе рассматривает изучение воздействия радиации на космический аппарат, его компоненты и экипаж, а также радиационных эффектов и их степени отрицательного влияния на компоненты космического аппарата. Рассмотрены испытания и требования к характеристикам материалов космического аппарата и его компонентов. Отдельно рассмотрены способы защиты и ее необходимости. Расписаны как используемые в текущий момент времени способы, так и перспективные для будущего использования.

В расчетной части диплома рассмотрена поиск оптимальной площади теплообменника, который отводит тепло, как от самого аппарата, так и от внутренних компонентов, в открытый космос, так как перегрев является огромной проблемой при встрече с радиационным излучением.

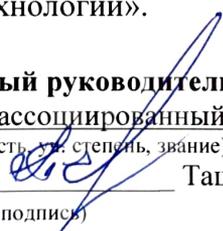
Все поставленные задачи в ТЗ дипломником выполнены в полном объеме и при этом Влада Дмитриевна показала себя трудолюбивым и ответственным студентом.

Дипломная работа **Болтенко В.** оценивается на 95 баллов и автор заслуживает академической степени бакалавр техники и технологий по ОП «Космическая техника и технологий».

Научный руководитель

К.т.н., ассоциированный профессор

(должность, уч. степень, звание)


Таштай Е.

(подпись)

« 25 » мая 2022 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу студента 4 курса Казахского национального
исследовательского технического университета им. К.И.Сатпаева
специальности 5В074600 «Космическая техника и технологии»

Болтенко Влада Дмитриевна

на тему: «Космическая радиация и методы защиты»

Целью работы является исследование космической радиации и ее воздействия на КА, а также исследование методов защиты, как настоящих, так и перспективных.

Актуальность выбранной темы дипломной работы обусловлена тем, что проблема радиации считается одной из главных препятствий на пути к освоению космоса, поскольку оказывает разрушительный эффект на КА и даже приводит к гибели экипажа космического корабля.

В работе было проделано исследование проблемы космической радиации, а также рассмотрено решение задачи перегрева КА путем расчета площади радиационного теплообменника.

По оценке проведенного студентом исследования можно сказать, насколько деструктивной она является не только для КА, но и для экипажа. По этой причине необходимо отметить важность предпринятия мер по радиационной защите методом нахождения наиболее радиостойких материалов и проведения их испытаний и тестов в сборочно-испытательных комплексах.

В целом дипломная работа выполнена на достаточно высоком уровне, соблюдены все требования к оформлению работы.

Учитывая вышесказанное, считаю, что дипломная работа заслуживает высокой оценки 92 баллов и рекомендуется к защите, а при успешной защите Болтенко В. достойна присвоения академической степени бакалавра технических наук.

Заведующий лабораторией
разработки космических систем
ДТОО «Институт космической
техники и технологий»


С.А. Елубаев
2022 г.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Болтенко Влада Дмитриевна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Космическая радиация и методы защиты

Научный руководитель: Ерлан Таштай

Коэффициент Подобия 1: 3.1

Коэффициент Подобия 2: 0.6

Микропробелы: 4

Знаки из других алфавитов: 13

Интервалы: 0

Белые Знаки: 1

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

25.05.2022
Дата

Заведующий кафедрой



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Болтенко Влада Дмитриевна

Тақырыбы: Космическая радиация и методы защиты

Жетекшісі: Ерлан Таштай

1-ұқсастық коэффициенті (30): 3.1

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.6

Дәйексөз (35): 2.1

Әріптерді ауыстыру: 13

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 4

Ақ белгілер: 1

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

25.05.2022
Күні

Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Болтенко Влада Дмитриевна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дисломная работа

Название работы: Космическая радиация и методы защиты

Научный руководитель: Ерлан Таштай

Коэффициент Подобия 1: 3.1

Коэффициент Подобия 2: 0.6

Микропробелы: 4

Знаки из здругих алфавитов: 13

Интервалы: 0

Белые Знаки: 1

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

25.05.2022
Дата

Марселев С.
проверяющий эксперт