

ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ШАГ В БУДУЩЕЕ»
ПО ПРОФИЛЮ «ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО»

20977

регистрационный номер

Секция: Космические аппараты и ракеты-носители (СМ1)

название секции

Разработка технологии печати антенного рефлектора на борту наноспутника

название работы

Автор:

Васильев Егор Даниилович

фамилия, имя, отчество

СУНЦ УрФУ, 10С

наименование учебного заведения, класс

Научный руководитель:

Богуславский Лев Георгиевич

фамилия, имя, отчество

ГАНОУ СО «Дворец молодёжи»,
детский технопарк «Кванториум»

место работы

Педагог дополнительного образования

звание, должность

подпись научного руководителя

Москва - 2023

1. Аннотация

Цель работы – создание нового эффективного способа развертывания рефлектора УКВ антенны для космического аппарата с применением технологии 3D печати радиоотражающим фотополимерным композитом.

В ходе работы решены следующие задачи:

- Определены наиболее критичные воздействия условий открытого космоса, влияющие на эксплуатацию антенных рефлекторов.
- Разработан технология 3D печати подходящий для создания устойчивых к условиям открытого космоса антенных рефлекторов непосредственно в условиях космического полета.
- Подобран тип полимерного композита для 3D печати, удовлетворяющий условиям открытого космоса и требованиям к отражению радиоволн УКВ.
- Создан и испытан прототип 3D принтера, работающего по предложенной технологии.

В результате испытаний прототипа, реализующего основные новшества технологии, была доказана жизнеспособность и перспективность предложенных методов.

2. Содержание

2.1. Оглавление

1. Аннотация.....	1
2. Содержание.....	3
2.1. Оглавление	3
2.2. Список использованных источников	4
3. Введение	5
3.1. Актуальные тенденции в космонавтике.....	5
3.2. Существующие способы разворачивания антенных рефлекторов.....	5
3.3. Цель проекта	6
3.4. Метод реализации.....	7
3.5. Задачи	7
4. Основная часть.....	8
4.1. Требования, накладываемые на материал и технологический процесс.....	8
4.2. Экструзия. Состав полимера	8
4.3. Процесс засветки и отверждения фотополимера	10
4.4. Требования, накладываемые на материал и технологический процесс.....	11
4.5. Точность поверхности. Среднеквадратичное отклонение	13
4.6. Условия долговременной эксплуатации. Температурные деформации	13
4.7. Прототип 3D принтера	14
4.7.1. Блок А	15
4.7.2. Блок Б.....	15
4.7.3. Блок В.....	16
4.8. Эксперимент с процессом 3D печати на разработанном прототипе	17
4.7. Перспективы испытания прототипа	18
5. Заключение и перспективы	19

2.2. Список использованных источников

1. Космические запуски в 2020—2021 годах: глобальные тенденции и достижения в освоении космоса. Полковник И.С. ТОПОРКОВ, кандидат технических наук, Полковник А.А. РОМАНОВ, Подполковник Д.В. ДИАНОВ, Подполковник запаса С.В. ЧЕРКАС, доктор военных наук. ВОЕННАЯ МЫСЛЬ · №1 — 2023
2. Проект «Сфера» переходит к практической реализации, Игорь Афанасьев, Русский космос 01.2022
3. ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОРОВ ЗЕРКАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АНТЕНН ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЧАСТОТ, А. Н. Муранов, Институт конструкторско-технологической информатики РАН, Принята к публикации 05.03.2020
4. А. В. Лопатин, М. А. Рутковская Обзор конструкций современных космических антенн (Часть 2). Авиационная и ракетно-космическая техника.
5. ГОСТ 27.002-2015
6. GARDE INC. CORPORATE PRESENTATION Spartan 207/ Inflatable Antenna Experiment Flown on STS-77/ Spartan Project Code 740.1 NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, MD February 14, 1997
7. КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И РИСКИ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ Кузнецов В. Д. ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), 2014 г.
8. ТЕПЛООБМЕН В КОСМОСЕ, С. В. ЦАПЛИН, С.А. БОЛЫЧЕВ, А.Е. РОМАНОВ, » Институт ракетно-космической техники Институт информатики, математики и электроники, «САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА», 2018
9. Математическая модель процесса дегазации полимерного покрытия в условиях открытого космоса, Н.А. Полибина, Корпорация космических систем специального назначения «Комета», 2018
10. Полимеризация Олигокарбонатметакрилат ОКМ-2, фотосенсибилизированная олигооксипропиленгликольбензофенонами, 1997 г. А. Ф. Маслюк, В. В. Агеева, Г. К. Березницкий, В. А. Храновский, В. И. Штомпель, И. М. Сопина. Институт химии высокомолекулярных соединений Национальной академии наук Украины, Киев
11. 3D printing of high performance cyanate ester thermoset polymers, Swetha Chandrasekaran, Eric B. Duoss, Marcus A. Worsley & James P. Lewicki, Journal of Materials Chemistry A, 2017
12. Управление технологическими процессами фотополимеризации, Н. Г. Филиппенко, Т. Т. Чумбадзе, А. А. Беломестных, Т. В. Пискажова, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, 2017.
13. Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц - 300 ГГц, Бузов А. Л., Кольчугин Ю. И., Кубанов В. П., Романов В. А., Сподобаев Ю. М., Филиппов Д. В., Юдин В. В., Самарский отраслевой научно-исследовательский институт радио Министерства Российской Федерации по связи и информатизации, 2002.
14. Разработка и испытания 3D-Принтера для космического эксперимента «3D-Печать» на российском сегменте Международной космической станции Фёдоров В.В., Клименов В.А., Чернявский А.Г., Пожарницкий А.А., Абдулхаликов Р.М., Лямзин А.В., Криницын М.Г., Беликов Р.К.1, Дерусова Д.А., Юркина В.А., Дерюшева В.Н., 2023

3. Введение

3.1. Актуальные тенденции в космонавтике

Тенденция в мировой космонавтике показывает, что число спутников на орбите земли растет [1], свои размеры наращивает и группировка Российских космических аппаратов (КА) в связи с реализацией федерального проекта «Сфера» [2]. Значительную часть от общей группировки составляют спутники связи и ретрансляторы. Они нуждаются в эффективной системе передачи и приема большого количества данных с помощью радиоволн.

Сейчас для реализации этой функции используются антенны с параболическими рефлекторами различных размеров. Для передачи большого объема данных на большие расстояния востребованными остаются отражатели диаметром более 4 метров [3]. Из-за ограничений параметров модулей полезного груза существующих космических транспортных систем, их приходится разворачивать на орбите. Это сложная инженерная задача, сейчас ее решают в основном используя механизмы разворачивания с множеством подвижных элементов [4]. Количество подвижных элементов, то есть точек с повышенным риском отказа [5], с увеличением габаритов рефлектора растет по квадратичному закону, вместе с ним растет риск неудачного раскрытия рефлектора.

Кроме традиционного способа разворачивания также существуют проекты надувных отражателей [6]. В ходе испытаний они не показали должной надежности.

3.2. Существующие способы разворачивания антенных рефлекторов

- Надувные отражатели (спутник Spartan-207 рис. 1) – из-за надувных элементов не так надежны [6].



Рисунок 1

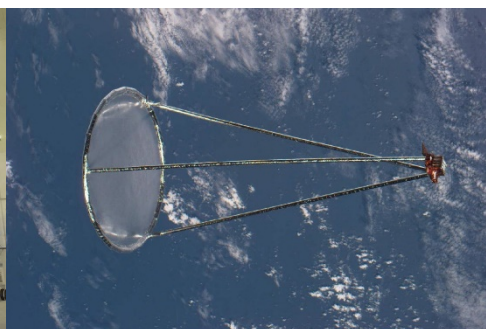


Рисунок 2

- Антенны с ферменным рефлектором (спутник ретранслятор Луч 5А рис. 2) – имеют сложную конструкцию из-за большого количества подвижных элементов.

В таблице 1 приведены параметры характеризующие существующие методы разворачивания рефлекторов:

Таблица 1 – сравнение существующих механизмов развёртывания рефлекторов

Механизм развёртывания	Зонтичный	Надувной
Надёжность	~95% [4]	Не доказана
СКО (Среднеквадратичное отклонение)	~0.1 мм	~0.2 мм
Масса	~5 кг/м ²	~3 кг/м ²
Габариты	До 10 м	Максимальный реализованный диаметр 3 м

Исходя из этого существующие способы развёртывания рефлекторов не позволяют производить отражатели большого размера при небольшой массе и достаточной надёжности аппарата.

3.3. Цель проекта

Разработать технологию развёртывания антенного рефлектора с заданной диаграммой направленности в условиях открытого космоса на борту космического аппарата.

Что позволит размещать в космическом аппарате антенные отражатели габаритами значительно большими, чем габариты самого КА. Как следствие увеличение дальности связи, что в свою очередь позволит создавать

- 1) Орбитальные спутниковые группировки, обеспечивающие связью большую площадь земли, в том числе полярные области, что особенно актуально в связи с развитием северного морского пути и исследования Арктики в целом.
- 2) Спутники ретрансляторы с большей дальностью, способные обеспечить бесперебойную связь для будущих Российских миссий к луне, в том числе на обратной стороне.
- 3) МС способные поддерживать связь с землей на больших расстояниях, например при полетах во внешнюю солнечную систему.

3.4. *Метод реализации*

Технологию развёртывания рефлекторов в космическом пространстве предлагается основывать на использовании технологии 3D печати радио отражающим полимерным композитом, после выведения на орбиту, в открытом космосе, с использованием специализированного устройства.

Преимущества подхода:

- Подход позволяет сэкономить массу – напечатанный в космосе отражатель не должен выдерживать перегрузки во время старта ракеты, а значит может быть достаточно тонким.
- Габариты антенны могут быть много больше габаритов спутника за счет вынесения одной из осей принтера на выдвижную штангу, при этом масса системы меняется не значительно.
- Возможность развернуть рефлектор заданной диаграммы направленности.

3.5. *Поставленные и выполненные задачи*

В ходе реализации технологии были выполнены следующие задачи:

- 1) Подобрана структура полимерного композита исходя из необходимых эксплуатационных свойств.
- 2) Выбран полимер и исследованы условия его отверждения и воздействия факторов открытого космоса.
- 3) Рассчитано влияние факторов открытого космоса на модель рефлектора, созданного по разработанной технологии.
- 4) Разработана кинематика развёртывающего устройства.
- 5) Реализован механизм экструзии полимерного композита.
- 6) Реализован программно-аппаратный комплекс для управления системой развертывания

4. Основная часть

4.1. Требования, накладываемые на материал и технологический процесс

Основой технологии является материал, используемый для развёртывания отражателя. Он должен выполнять следующие функции:

1. Способность отражать радиоволны на частотах 18-100 ГГц [3].
2. Способность выдерживать долговременное нахождение в открытом космосе.
3. Способность к контролируемому экструдированию¹ и отверждению.

Эти функции в свою очередь накладывают на материал следующие требования:

1. Размер неровностей на поверхности не более $\lambda/16$, где λ – длина волны.
2. Наличие отражающего радиоволны слоя на поверхности печатаемой детали.
3. Устойчивость к долговременному облучению мощностью 1,5 кВт/м² на длинах волн от Ч до X
4. Устойчивость к воздействию «солнечного ветра» - потока заряженных частиц со средней скоростью до 468 км/с [7].
5. Устойчивость к перепадам температур от -100 до +200 °С при нахождении на освещенной и неосвещенной частях орбиты [8].
6. Стабильность смолы и отсутствие ярко выраженной дегазации в вакууме [9] в отвержденном и неотверждённом состоянии
7. Способность к экструдированию через сопло 0.1-1 мм

Исходя из перечисленных требований был подобран материал и разработан следующий аддитивный технологический процесс:

На основание с шероховатой поверхностью через отверстие сопла экструдировается тонкий слой фотополимерной высокотемпературной смолы с металлической лентой внутри. Далее происходит УФ засветка положенного слоя. Цикл повторяется на всех последующих слоях, что позволяет сформировать деталь необходимой геометрии. Далее подробно о каждом этапе

4.2.Экструзия. Состав полимера.

Матрицей в композите является высокотемпературный фотополимер. Этот материал относится к типу термореактивных смол, представляющих собой смесь трех основных

¹ Здесь и далее технология получения изделий путём продавливания вязкого материала или густой пасты через формуящее отверстие.

компонентов: олигомеров, мономеров и фотоинициаторов. Кроме основных компонентов в состав вводятся добавки функционального назначения: регуляторы и стабилизаторы. [10]

Экструдирование фотополимера в жидком виде происходит через латунное сопло диаметром 0.1-1 мм. (рис. 3). Подача осуществляется напрямую из резервуара хранения на борту аппарата с помощью инфузионного насоса, приводимого в движение электродвигателем.

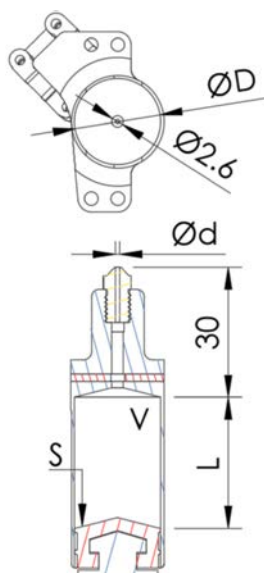


Рисунок 3 – схема емкости подающего механизма

Поток полимера можно рассчитать из соображения что жидкость не сжимаема, исходящего из повышенной вязкости полимера [10]. Таким образом объем выдавливаемый за Δt из емкости (V_1), равен объему экструдированному из сопла (V_2) за тоже время.

$$\frac{V_1}{\Delta t} = \frac{V_2}{\Delta t} \quad (1)$$

Примем, что при экструзии слой принимает форму цилиндра с высотой равной h и диаметру равному диаметру сопла d . За Δt поршень проходит расстояние ΔL , причем величина Δt задается через параметр скорости движения для электродвигателя. Преобразовав уравнение (1) получим:

$$\pi \frac{d^2}{4} h = \pi \frac{D^2}{4} \Delta L \quad (2)$$

Отсюда выразим ΔL :

$$\Delta L = \frac{d^2 h}{D^2} \quad (3)$$

Работа поршня по выдавливанию смеси (трением пренебрегаем) равна работе электродвигателя мощностью N :

$$N\Delta t = F\Delta L \quad (4)$$

Найдем зависимость давления p , оказываемого поршнем на полимер, выразив F и подставив ΔL :

$$p = \frac{ND^2}{Sd^2h}\Delta t \quad (5)$$

Подставив значения можем определить, что давление может меняться в диапазоне от 0 до 3 кПа. Полученные значения позволяют сделать вывод о возможности регулирования скорости печати на большом диапазоне, за счет возможности подавать большое количество полимера под достаточно большим давлением. Системы экструзии, в которых материал подается под схожим давлением, но из нескольких сопел принято называть MJP (Multi Jet Printing) или много сопельная печать, по аналогии предложенную систему закономерно назвать SJP или *односопельная печать*.

4.3. Процесс засветки и отверждения фотополимера

Отверждение полимера на детали инициируется УФ излучением. При попадании световой энергии УФ-спектра на содержащиеся в веществе фотоинициаторы, они распадаются на свободные радикалы с высокой энергией. В процессе перемещения радикалы сталкиваются с олигомерами и мономерами, соединяясь с ними. При отверждении образуется матрица, сшитая из полимерных цепей. Этот процесс хорошо управляем. источник УФ излучения может быть расположен как непосредственно в линии формирования изделий, так и отделен. Основными преимуществами такого типа отверждения являются: высокая энергетическая эффективность, снижение или полное исключение испарения продуктов, высокая производительность процесса, широкий диапазон температур отверждения температура отверждения [11]

По известным данным [12] для отверждения слоя фотополимера толщиной 0.1 мм требуется УФ световой поток длиной волны 405 нм и интенсивностью 650 мКд со временем засветки ~9 сек. В технологическом процессе предлагается применять доступные УФ светодиоды мощностью 3 Ватта, способные эффективно засвечивать слой на отрезке дуги эструдированного на деталь полимера длиной L . (рисунок 4)

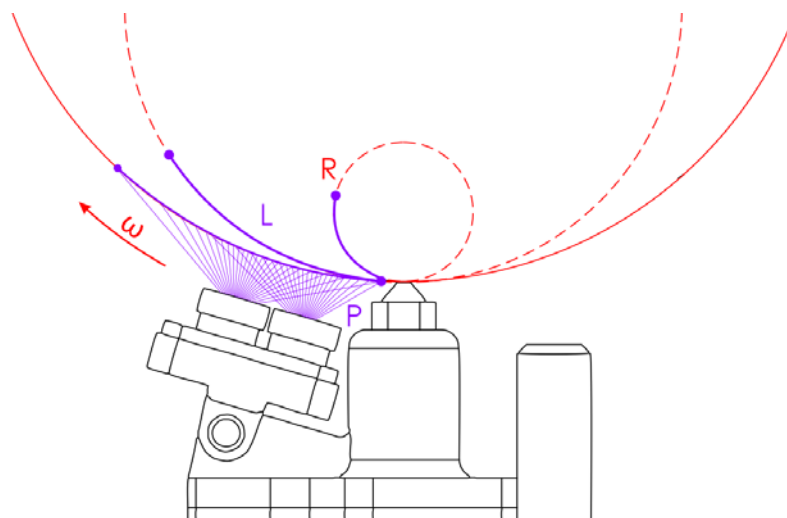


Рисунок 4 – схема печатающей головы, фиолетовые линии P – зоны УФ засветки, красные пунктирные и сплошные линии – контуры печатаемой детали в разные моменты времени.

4.4.Металлическое армирование. Модель отражения радиоволн.

После экструзии и отверждения полученная конструкция представляет собой композитную деталь. Внутри матрицы из отвержденного фотополимера находится плотно скомпонованная спираль из тонкой алюминиевой ленты (рис. 8).

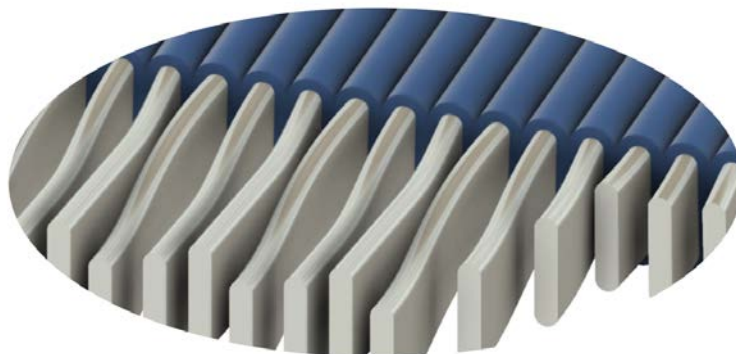


Рисунок 5 – 3D визуализация среза слоя композитной детали.

Для теоретического определения характеристик отражателя примем что слои высотой H укладываются плотно один к другому, при этом находящиеся внутри алюминиевые армирующие ленты толщиной S могут отклоняться от коаксиального расположения на расстояние Δ , то есть толщину полимерного слоя матрицы (рисунок 6)

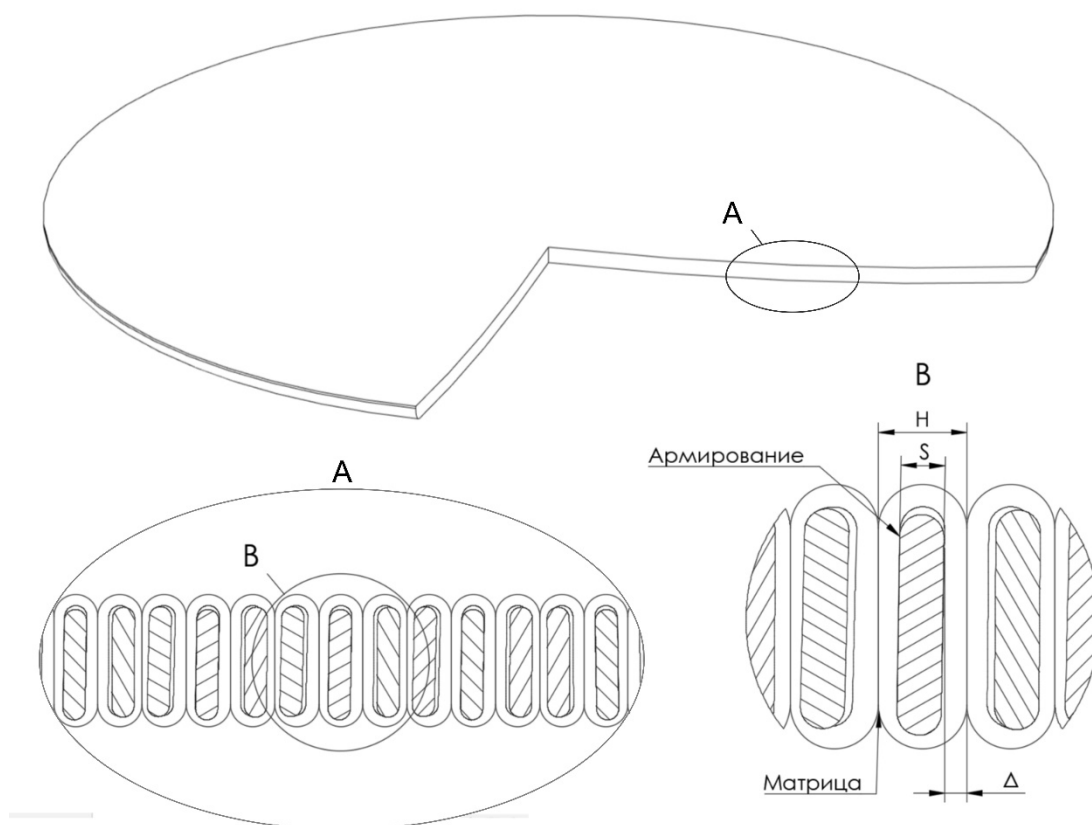


Рисунок 6 – Срез рефлектора

Физически поверхность рефлектора в разрезе представляет массив ярко выраженных неровностей формы близкой к полусферической (рис 6, А). Поскольку матрица выполнена из радиопрозрачного полимера, для построения математической модели отражения радиоволн будем учитывать только геометрические и физические параметры ленты.

Описанная структура рефлектора создает повышенный (по сравнению с зеркалом из сплошного листа) уровень ППЭ [13] в области заднего полупространства антенны. При облучении рефлектора электромагнитной энергией происходит ее отражение и частичное прохождение в область заднего полупространства.

В связи с этим фактом считается важным провести расчет коэффициента прохождения волны через используемую структуру (по полю), по стандартной методике [13].

Подставив значения H и S получаем характеристику T равную . При функционировании на длине волны 14 ГГц. Величина сравнима со значениями у используемых на практике рефлекторов и теоретически позволяет системе радиосвязи завязанной на отражателе из подобного материала передавать данные со скоростью до 1,6 Гбит/с.

4.5. Точность поверхности. Среднеквадратическое отклонение.

Необходимость фокусировки сигнала в малой области пространства – фокальной точке накладывает ограничение на точность отражающей поверхности антенного рефлектора: среднеквадратическое отклонение (СКО) δ профиля поверхности рефлектора не должно превышать величины $\lambda/16$ [11, 12], где λ – длина волны, на которой работает рефлектор. Это требование точности основано на соображениях о допустимой ошибке волнового фронта [11–14]. Величина СКО зависит от геометрии рефлектора на определенной площади, конкретно от среднего отклонения от идеальной параболоидной круговой формы. Исходя из вышеописанной модели найдем прогнозируемую величину СКО:

$$\delta = (2\Delta + \alpha H)^2$$

где δ – СКО отражающей поверхности рефлектора, мм², α – коэффициент, характеризующий отклонение, вызванное пределом точности технологии печати.

Таблица (график) сравнения СКО реальных антенн и печатной

Исходя из приведенных расчетов прогнозируемая эффективность поверхности антенны будет сравнима с поверхностями используемых на данный момент антенных рефлекторов.

4.6. Условия долговременной эксплуатации. Температурные деформации.

После разворачивания начинается основной этап эксплуатации рефлектора. До окончания миссии отражатель будет выполнять свою основную задачу в составе комплекса радиосвязи. На этом этапе на деталь производятся долговременные воздействия радиации солнечной [ссылка] и космической [ссылка]

Эти воздействия порождают 2 наиболее значимых эффекта – изменение химического и физического состояния поверхностного слоя полимера и термические деформации детали.

Интенсивное солнечное излучение в инфракрасном диапазоне, вызывает нагрев поверхности рефлектора. Перепад температур между самым холодным и самым горячим состояниями поверхности может составлять 300°C. Термическое воздействие вызывает изменение геометрии рефлектора, которое может привести к уменьшению эффективности отражения радиоволн.

С целью определения толщины рефлектора, необходимой для эффективного противодействия распирающим нагрузкам от воздействия температуры был проведен расчет изменения геометрии детали при двух крайних возможных температурах -100 °C и +200°C, за

базовое значение взята температура 15°C. На рисунке 10 представлена визуализация термической деформации на модели рефлектора выполненная в программе Ansys.

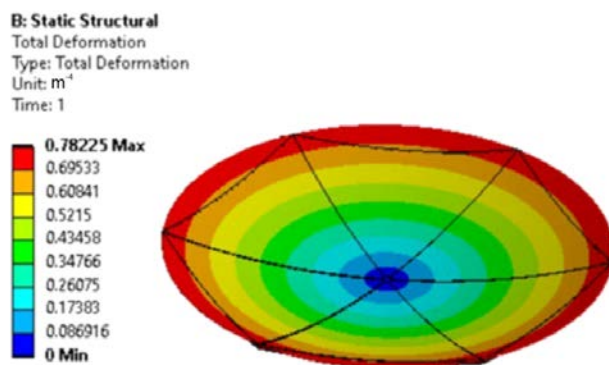


Рисунок 7 – Визуализация проделанного в Ansys расчета термической деформации

Максимальная деформация проявляется на периферии и не превышает 0.08 мм. Это удовлетворяет пределу расчетного СКО.

4.7. Прототип 3D принтера

Для отработки полного процесса печати (экструдирования, отверждения фотополимерной смолы, послойного формирования детали) по описанной выше технологии был разработан прототип 3D SJP принтера в габаритах кубсата 3U (рисунок 8). Такой формфактор выбран с заложенным на перспективу планом стратосферного испытания аппарата такой же конструкции, а также в виду удобства блочной разработки.

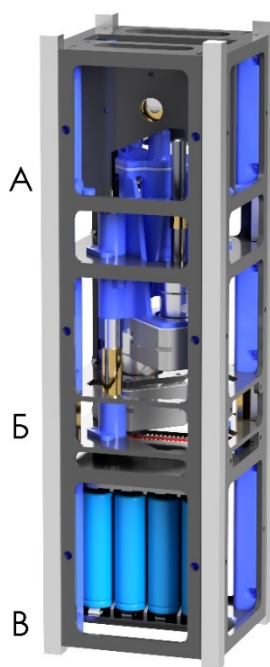


Рисунок 8 – 3D модель разработанного 3D принтера

Созданный прототип состоит из трех блоков:

- А. Блок «Образца» с мотором оси φ и системой контроля печати.
- Б. Основной блок кинематики с подвижной кареткой оси R , емкостью с фотополимером и системой подачи материала.
- В. Блок управляющей электроники и системы электропитания.

4.7.1. Блок А

Конструкционно блоки А и Б составляют кинематику бортового 3D принтера. В блоке А (рисунок 11) находится поворотное основание для печатаемой детали (1). Его точное позиционирование на требуемый угол (φ) за счет вращения электродвигателя позволяет экструдировать слои фотополимера по спирали, таким образом происходит формирование детали заданной формы (2). На прототипе, для отработки процесса, отверждение фотополимерная происходит за счет излучения инфракрасных светодиодов (3) (длина волны 405 нм) общей мощностью 3 Вт.

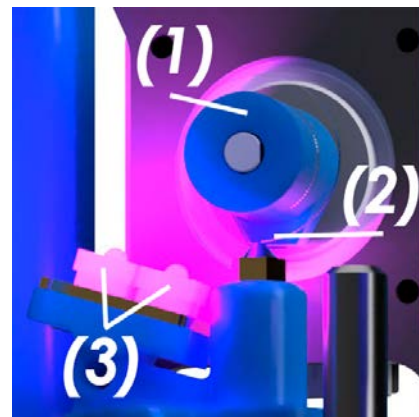


Рисунок 9 – модель зоны экструзии и отверждения материала

4.7.2. Блок Б

Блок Б составляет основу кинематики 3D принтера. В блоке располагается каретка оси R с размещенной на ней емкостью с фотополимером и системой подачи материала в виде инфузионного насоса, приводимого в движение шаговым мотором. Каретка движется по направляющим приводимая в движение шаговым мотором через связку трапецеидальная ось-винт.

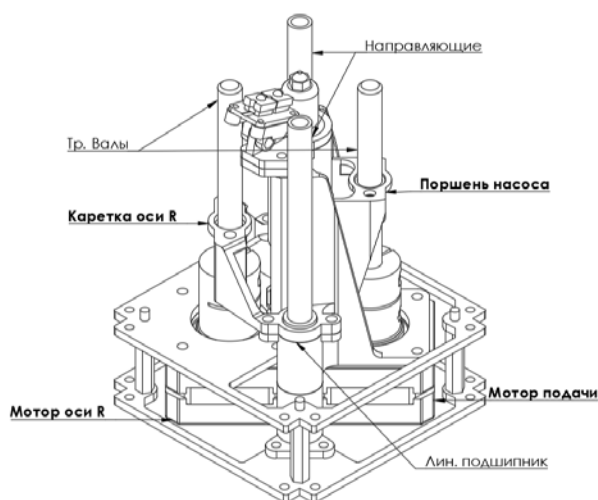


Рисунок 10 – схема блока Б

Вместе блоки А и Б составляют кинематику принтера (рисунок 9) работает в полярной системе координат с началом отсчета в основании печатаемой детали: положение сопла относительно печатаемой поверхности, задается поворотом детали на полярный угол φ с помощью прецизионного шагового мотора, и перемещением печатающей головки по оси R. Поле печати ограничено диском диаметром 10 см и толщиной сравнимой с диаметром сопла (1-2 мм). Для проверки технологии на жизнеспособность и отработки самого процесса на принтере предполагается печать простой детали в виде плоского диска.

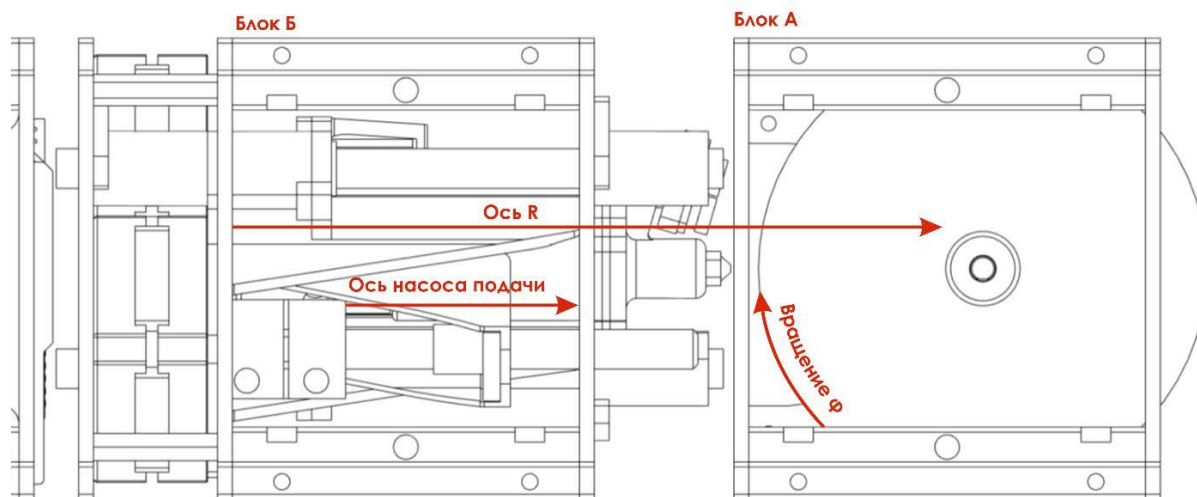


Рисунок 11 – схема разработанной кинематики

4.7.3. Блок В

В блоке В располагается плата управления (1), плата стабилизации питания и защиты аккумуляторов (2) и блок аккумуляторных батарей (3).

Управления кинематикой реализовано на базе платы Arduino Mega с микроконтроллером Atmega2560 и платой расширения RAMPS. Эта платформа была выбрана в виду простоты реализации на ее базе управления кинематикой (моторы и концевики) и внешними подсистемами (контроль аккумуляторов, управление светодиодами).

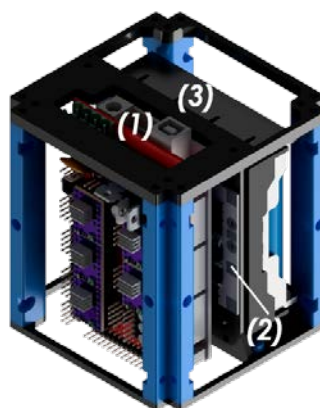


Рисунок 12 – 3D модель блока В

4.8. Эксперимент с процессом 3D печати на разработанном прототипе

Целью эксперимента стала проверка жизнеспособности разработанного технологического процесса 3D печати на всех этапах (экструдирование, отверждение фотополимерной смолы, послойное формирования детали). Определение слабых мест технологии.

Для испытания использовался прототип одно сопельного полярного 3D принтера (изображения), конструкция которого описана выше. В качестве материала для печати использована фотополимерная смола марки.

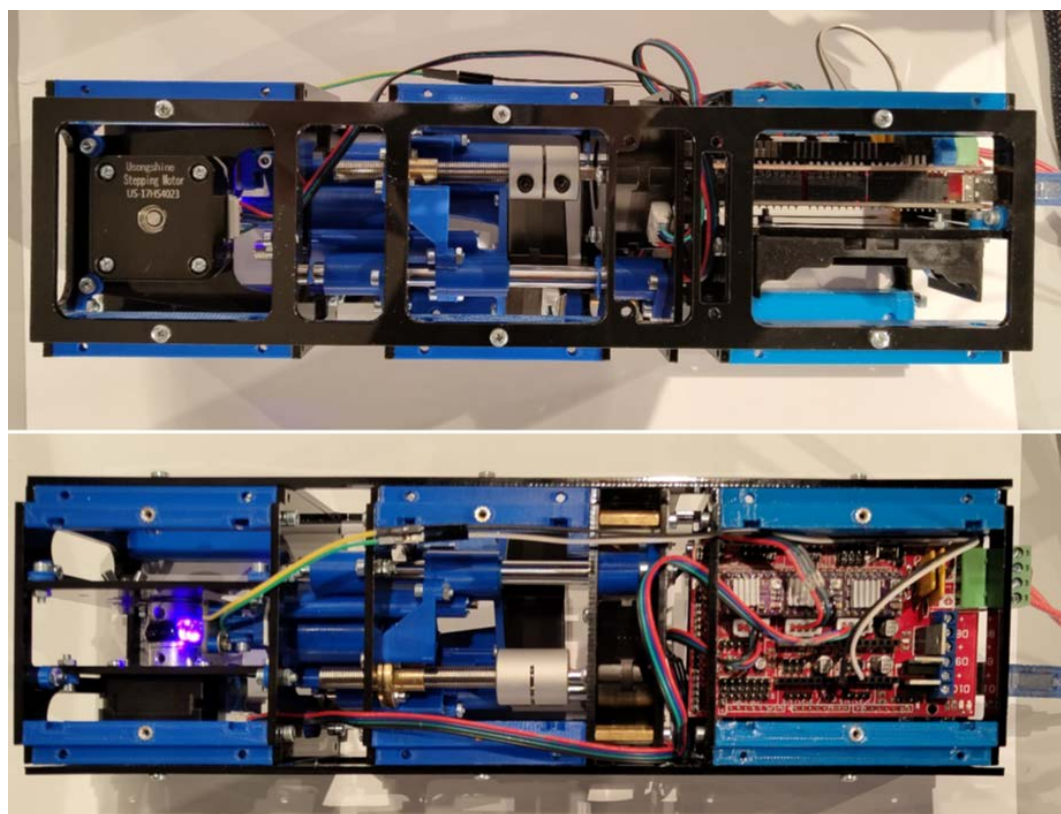


Рисунок 13 – Прототип в сборе

Для управления кинематикой была написана простая программа задающая скорость движения моторов через зависимость, выведенную из формул 1-4.

Печатающая система была размещена вертикально, таким образом чтобы сопло было направлено в надир, такое положение позволяет смоле равномерно вытекать из сопла и минимизирует влияние силы тяжести на ход эксперимента, приближая систему к реальным условиям эксплуатации в невесомости [14].

Экструзия была запущена на 3 минуты, за это время система израсходовала около 1 мл фотополимера. На рисунке 13 видно, как происходил процесс. В ходе печати было экструдировано 22 слоя фотополимерной смолы, они сформировали на детали пояс высотой 2,2-2,3 мм и средней толщиной 4 мм (Рисунок 14).

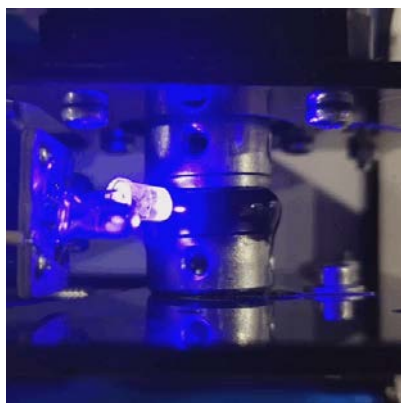


Рисунок 13 – принтер во время печати.

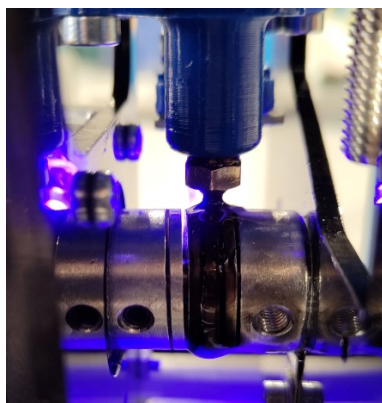


Рисунок 14 – образец

В ходе эксперимента кинематика 3D принтера отработала штатно. В ходе экструзии выявлено что из-за чрезмерной текучести выбранной для испытания смолы, она растекалась по площади на поверхности в 1,5-2 раза большей чем прогнозировалось. Отверждение слоев происходило без нареканий, замечено, что из-за слишком широкого пучка света, за время эксперимента на одной стороне сопла образовался слой отвержденного полимера. Полученный в результате образец имеет геометрические размеры больше предполагаемых и неоднородный срез, замечено значительное стекание полимера на верхних слоях.

В целом эксперимент показал работоспособность предложенного метода. При устранении перечисленных дефектов удастся производить детали необходимой формы.

4.9. Перспективные испытания прототипа

На данный момент предлагаемая технология проходит испытания в лабораторных условиях, поочередно имитирующих воздействия в реальном космическом полете (перепады температуры, низкое давление, воздействие солнечного излучения). Но подобные

испытания хоть и позволяют говорить об общей работоспособности технологии не могут позволить отработать все факторы вместе.

Единственным способом учесть все «космические» воздействия является испытание в реальных условиях. Оптимальным будет проведение 3D печати в стратосферном полете на высоте 20-30 км по так как:

- Условия приближены к условиям открытого космоса на высоте 300-400 км.
- Ввиду небольшого времени печати образца (не более 40 минут) все испытание проводится в рамках одного полета и необходимости в орбитальном запуске нет.
- Существует возможность возврата напечатанного образца.

Существующий прототип при минимальных изменениях конструкции (адаптация электроники, замена материалов корпуса и некоторых элементов) подходит для проведения миссии по испытанию технологии 3D печати высокотемпературным фотополимером в стратосферном полете.

5. Заключение и перспективы

В ходе работы разработана технология 3D печати в кинематике сферического типа, подобран термостойкий фотополимерный композит и разработан, испытан полноразмерный прототип. Планируется внедрить в процесс печати внесение армирующего радиотражающего материала и исследовать отражение УКВ от получаемых антенн, увеличить габариты печатающей системы и разработать КА с 3D принтером, использующим представленную технологию на борту. Провести стратосферное испытание технологии на этом КА.

Разработанная технология позволяет получать детали с заданными параметрами (отражение радиоволн, температурная устойчивость) выдерживающие условия открытого космоса непосредственно в условиях космической миссии. Эти возможности обеспечивают обширные альтернативы для применения технологии, например печать деталей, эксплуатируемых на внешней обшивке орбитальной (или межпланетной) станции непосредственно во время миссии.