

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет математики и информатики  
Кафедра информационных и управляющих систем  
Направление подготовки /специальность 09.04.04 – Программная инженерия  
Направленность (профиль) образовательной программы Управление разработкой программного обеспечения

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ А.В. Бушманов

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему: Компьютерное моделирование и 3D-печать макетов космических кораблей

Исполнитель

студент группы 157-ом

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Г.Ю. Каминский

Руководитель

доцент, док. техн. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

В.В. Ерёмина

Руководитель научного  
содержания программы  
магистратуры

профессор, док. техн. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

И.Е. Ерёмин

Нормоконтроль

доцент, канд. техн. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Л.В. Никифорова

Рецензент

канд. техн. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Д.С. Щербань

Благовещенск 2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет математики и информатики  
Кафедра информационных и управляющих систем

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ А.В. Бушманов

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

**З А Д А Н И Е**

К магистерской диссертации студента группы 157-ом Каминского Глеба Юрьевича

1.Тема магистерской диссертации Компьютерное моделирование и 3D-печать макетов космических кораблей

(Утверждено приказом от 21.02.2023 № 442-уч)

2.Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 20.06.2023 г.

3.Исходные данные к выпускной квалификационной работе: предметная область, отчеты по практической подготовке

4.Содержание магистерской диссертации (перечень подлежащих разработке вопросов): анализ предметной области проводимого исследования, алгоритмическое и программное обеспечение решения поставленной задачи, проектирование и реализация макетов космических кораблей

5. Перечень материалов приложения (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.): конструкционные схемы космических кораблей; 3D модели элементов

6. Рецензент магистерской диссертации: Щербань Д.С., канд. техн. наук

7. Дата выдачи задания 30.01.2023

Руководитель выпускной квалификационной работы: В.В. Ерёмкина,  
доцент, канд. техн. наук

Задание принял к исполнению (30.01.2023): \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 73 с., 50 рисунок, 1 таблицу, 31 источник.

### 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ, 3D-ПЕЧАТЬ, РАКЕТЫ КОРОЛЕВСКОЙ СЕРИИ, КОСМИЧЕСКИЕ КОРАБЛИ, МАКЕТ, ИТ-ТЕХНОЛОГИИ

Целью данной научно-исследовательской работы является проектирование и создание малобюджетной компьютерной 3D-модели космического корабля с последующей реализацией.

В качестве задач можно выделить:

- проанализировать область моделирования ракет королевской серии;
- оценить актуальность исследования;
- рассмотреть варианты программного и аппаратного обеспечения для проектирования и разработки макетов;
- разработать 3D-модели ракет в редакторе;
- создать макеты ракет на основе компьютерной модели.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Общий обзор отечественной ракетной техники	7
1.1 История развития отечественной космонавтики	7
1.2 Ракеты Королевской серии	9
1.3 Существующая сувенирная продукция	19
2 Малобюджетная технология сувенирных макетов	23
2.1 Предлагаемое решения рассматриваемых задач	23
2.2 Детальные чертежи ракет королевской серии	25
2.3 Программное обеспечение 3D моделирования	27
2.4 Blender	28
2.5 Autodesk 3Ds Max	30
2.6 Autodesk Maya	32
2.7 Zbrush	33
2.8 Обоснование выбора 3D-редактора	35
2.9 Обзор устройств аддитивной технологии	36
2.10 SLA и DLP-принтеры	39
2.11 Обзор ПО трехмерной печати	41
2.12 Ultimaker Cura	41
2.13 PrusaSlicer	43
2.14 Simplify3D	44
2.15 ChiTuBox	45
2.16 Обоснование выбора слайсера	47
3 Практическая реализация моделей	48
3.1 Алгоритм создания моделей	48
3.2 Трехмерное компьютерное моделирование	48
3.3 Практическая 3D-печать	57
3.4 Оценка общей рентабельности проекта	62
Заключение	67
Библиографические ссылки	68
Библиографический список	71

## ВВЕДЕНИЕ

Первое упоминание о 3D-моделировании было в 50-х годах прошлого века, а уже в 60-х годах появились первые компьютерные программы, формирующие простые трёхмерные модели на основе эскизов. На самом деле всем этим занимались простые студенты тех годов, в которых тех годов никто не верил. Но сейчас мы даже не можем представить жизнь без этого открытия. После этого в 80-х годах был запатентован первый 3D-принтер, которое дало огромный толчок науке. Конечно, усовершенствование этих технологий не стояло на месте. В данный момент мы можем заметить их везде. Например, без 3D-моделирования не было создано множество фильмов и мультфильмов, компьютерные игры, помогает создать в архитектурном дизайне какую-либо модель в объёмной форме и т.д.

3D-печать тоже встречается во всех сферах жизнедеятельности. В медицине это создание имплантов или протезов, автомобильная промышленность для создания деталей автомобиля, архитектурные компании для создания макетов будущих строений также сделанной в программе для моделирования, еда, мода, ювелирная промышленность и во многих других отраслях.

Если говорить о космической отрасли, то 3D-моделирование помогает создать примерные модели ракет и их прототипы, уменьшая тем провальные запуски. Так же в данный момент создаются и детали для космических кораблей, и уже даже 3D-принтер побывал в космосе для создания, различных научных инструментов, запчастей и оборудования. 3D-моделирование может освоить каждый человек, также, как и купить 3D-принтер для печати моделей. Это помогает для обучения детей в школах и вузах направленной специальности, и наглядно показать модели космических кораблей и объяснить принцип действия ракет-носителей. И любой ребёнок, который хочет заполучить или приобрести модельку космического корабля сможет это сделать намного дешевле, чем в магазинах.

Целью данной научно-исследовательской работы является проектирование и создание малобюджетной компьютерной 3D-модели космического корабля с последующей реализацией.

В качестве задач можно выделить:

- описать состояние сферы создания макетов ракетной техники;
- выполнить анализ предметной области моделирования макетов ракет королевской серии;
- оценить актуальность исследования;
- рассмотреть варианты программного и аппаратного обеспечения для проектирования и разработки макетов;
- разработать 3D-модели ракет в редакторе;
- создать макеты ракет на основе компьютерной модели.

# 1 ОБЩИЙ ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ

## 1.1 История развития отечественной космонавтики

Большой вклад внёс в развитие космонавтики российский учёный Константин Эдуардович Циолковский, он рассуждал о возможности жизни в космосе. В 1903 году вышла научная работа под названием Исследование мировых пространств реактивными приборами[1]. В работе говорилось о возможности полёта человека в космос.

Дальнейшее развитие теоретических основ российской космонавтики обусловлено функционированием Газодинамической лаборатории и Реактивного научно-исследовательского института в 1920-1930-е годы[2]. Сотрудники данных организаций смогли создать первые реактивные аппараты с двигателями, работающими на жидком и твёрдом топливе. Тогда и были проведены испытания этих аппаратов. Таким образом, уже можно было говорить о создании российской реактивной техники.

Руководители страны видели в космонавтике военный потенциал. Оно и понятно: кровопролитные сражения настроили людей на такой пессимистический лад. Не секрет, что работа над формированием отечественной ракетно-космической отрасли была обусловлена острой необходимостью в обороне страны. Новые технологии изучались с прикладными целями: догнать, перегнать, обезоружить противника. 1957 год запомнился возникновением межконтинентальной баллистической ракеты Р-7. Известно, что её разработка велась под управлением учёного Сергея Королева.

В этом же году ракета совершила свой успешный полет с космодрома Байконур, расположенного в Казахстане. Данное изобретение имело отдельную головную часть, которая была способна доставить термоядерный заряд абсолютно в любую точку, где находился противник[3].

Это открытие ознаменовало большой прорыв в развитии отечественной космонавтики. 4 октября 1957 года - важная дата в истории советской космонавтики. Именно в этот день был запущен первый искусственный спутник

Земли «Спутник-1». Разработкой данного спутника занимались советский учёный Сергей Королев, а также и другие исследователи (Тихонравов, Келдыш и другие). 3 ноября 1957 года снова на орбиту Земли запустили космический аппарат. Впервые в космос отправилось живое существо. Спутник вывел на орбиту собаку по кличке Лайка. Запуск аппарата был приурочен к сорокалетней годовщине Октябрьской революции.

4 января 1959 года станция «Луна-1» оказалась на гелиоцентрической орбите. Автоматическая станция, пройдя расстояние в шесть тысяч километров от поверхности Луны, вышла на орбиту. Именно эта станция впервые стала известна как искусственный спутник Солнца.

Конечно же, самым большим достижением отечественной космонавтики является первый полёт человека в космическое пространство. Ежегодно 12 апреля в стране празднуется День космонавтики. Ведь именно в этот день в 1961 году Юрий Гагарин стал первым человеком, который своими глазами увидел, что собой представляет космос. Космический корабль «Восток» с первым космонавтом отправился с космодрома «Байконур». Всё время полёта занимало 108 минут. Полёт прошёл успешно, и Юрий Гагарин приземлился в Саратовской области. На орбите советский космонавт проводил различные эксперименты. Гагарин употреблял пищу, пил воду, писал карандашом. Когда космонавт положил карандаш, то заметил, что он постепенно начал подниматься вверх. За большой подвиг Юрий Алексеевич был удостоен Звезды Героя Советского Союза.

Спустя два года после полёта Юрия Гагарина состоялся полёт первой женщины-космонавта. Ею стала Валентина Терешкова, которая 16 июня 1963 года на корабле «Восток-6» отправилась покорять космическое пространство. Полет Терешковой длился практически на протяжении трех суток[4].

Ещё одним большим достижением российской космонавтики является выход человека в открытый космос. 18 марта 1965 года советский космонавт Алексей Леонов впервые вышел в открытый космос из корабля «Восход-2». Специально для Леонова был разработан специальный скафандр, название

которого — «Беркут»[5]. Его особенность заключалась в том, что он был покрыт герметичной оболочкой, состоящей из нескольких слов. Оболочка обеспечивала поддержание внутреннего избыточного давления, необходимого для полноценной жизнедеятельности космонавта. Полет Леонова был далеко не простым. В космосе ему пришлось пережить немало трудностей, однако он вернулся настоящим победителем. Все эти события внесли огромный вклад развития советской и российской космонавтики. и на данный момент является лидером по запускаемой космической техники.

## **1.2 Ракеты Королевской серии**

Сергей Павлович Королёв— советский учёный, конструктор ракетно-космических систем, председатель Совета главных конструкторов СССР (1946—1966), академик АН СССР.

Сергей Королёв является одним из основных создателей советской ракетно-космической техники, обеспечившей стратегический паритет и сделавшей Союз Советских Социалистических Республик передовой ракетно-космической державой, и ключевой фигурой в освоении человеком космоса, основателем практической космонавтики[5]. В официальных документах СССР его называли просто «Главный конструктор». Под его руководством был организован и осуществлён запуск первого искусственного спутника Земли и первого космонавта планеты Юрия Гагарина.

8 сентября 1945 года С. П. Королёв вылетел в Берлин, чтобы в советской оккупационной зоне (в Тюрингии) участвовать в изучении трофейной ракетной техники. В 1946 году там был создан новый советско-германский ракетный институт «Нордхаузен», главным инженером которого был назначен С. П. Королёв[6].

Для изучения и воспроизведения ракет Фау-2 на крупном подмосковном артиллерийском заводе № 88 в конце 1945 года было организовано Специальное конструкторское бюро по ракетной технике (СКБ РТ). Когда представители СКБ РТ прибыли в институт «Нордхаузен» для ознакомления с

Фау-2, было принято решение назначить руководителем изготовления копии Фау-2 Королёва[7].

В 1946 году он был назначен начальником отдела № 3 НИИ-88. В то же время должность Главного конструктора СКБ РТ была заменена на должность начальника и введены должности главных конструкторов по каждой ракете. В результате Королёв стал Главным конструктором.

В 1948 году С. П. Королёв начал лётно-конструкторские испытания баллистической ракеты Р-1 (аналога Фау-2) и в 1950 году успешно сдал её на вооружение.

В 1956 году под руководством С. П. Королёва была создана двухступенчатая межконтинентальная баллистическая ракета Р-7 с отделяющейся головной частью массой 3 тонны и дальностью полёта 8 тыс. км[8]. Ракета была успешно испытана в 1957 году на построенном для этой цели полигоне № 5 в Казахстане (нынешний космодром Байконур). Модификация ракеты Р-7А с увеличенной до 11 тыс. км дальностью состояла на вооружении РВСН СССР с 1960 по 1968 год.

Реактивный ракетный двигатель в процессе работы выбрасывает вещество (так называемое рабочее тело) в одном направлении, а сам движется в противоположном направлении. Чтобы понять, как это происходит, не обязательно самому летать на ракете. Самый близкий, «земной», пример – это отдача, которая получается при стрельбе из огнестрельного оружия. Рабочим телом здесь выступают пуля и пороховые газы, вырывающиеся из ствола. Другой пример – надутый и отпущенный воздушный шарик. Если его не завязать, он будет лететь до тех пор, пока не выйдет воздух. Воздух здесь – это и есть то самое рабочее тело. Проще говоря, рабочее тело в ракетном двигателе – продукты сгорания ракетного топлива.

Топливо ракетных двигателей, как правило, двухкомпонентное и включает в себя горючее и окислитель. В ракете-носителе «Протон» в качестве горючего используется гептил (несимметричный диметилгидразин), а в качестве окислителя – тетраоксид азота. Оба компонента чрезвычайно токсичны,

но это «память» о первоначальном боевом предназначении ракеты[9]. А другие виды топлива не позволяли обеспечить долгое хранение. Ракеты «Союз-ФГ» и «Союз-2» используют в качестве топлива керосин и жидкий кислород.

Полезная нагрузка, выводимая в космос, составляет лишь малую долю массы ракеты. Ракеты-носители главным образом «транспортируют» себя, то есть собственную конструкцию: топливные баки и двигатели, а также топливо, необходимое для их работы. Топливные баки и ракетные двигатели находятся в разных ступенях ракеты и, как только они вырабатывают свое топливо, то становятся ненужными. Чтобы не нести лишний груз, они отделяются. Кроме полноценных ступеней применяются и внешние топливные емкости, не оснащенные своими двигателями. В процессе полета они также сбрасываются.

Существует две классические схемы построения многоступенчатых ракет: с поперечным и продольным разделением ступеней (рис.1). В первом случае ступени размещаются одна над другой и включаются только после отделения предыдущей, нижней, ступени. Во втором случае вокруг корпуса второй ступени расположены несколько одинаковых ракет-ступеней, которые включаются и сбрасываются одновременно. В этом случае двигатель второй ступени также может работать при старте. Но широко применяется и комбинированная продольно-поперечная схема.

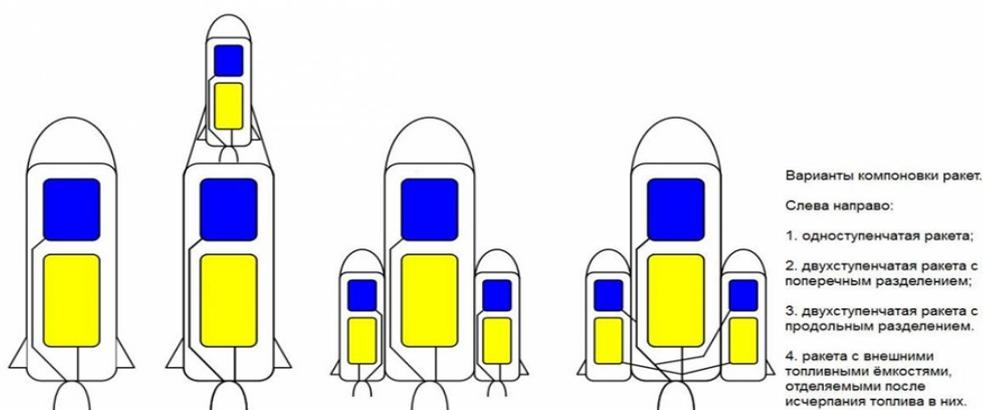


Рисунок 1 – Схемы построение многоступенчатых ракет

Может показаться, что как только ракета вышла в космос, то цель достигнута. Но это не всегда так. Целевая орбита космического аппарата или полезного груза может быть гораздо выше линии, от которой начинается космос. Так, например, геостационарная орбита, на которой размещаются телекоммуникационные спутники, расположена на высоте 35 786 км над уровнем моря. Вот для этого и нужен разгонный блок, который, по сути, является еще одной ступенью ракеты. Космос начинается уже на высоте 100 км, там же начинается невесомость, которая является серьезной проблемой для обычных ракетных двигателей.

Одна из основных «рабочих лошадок» российской космонавтики ракета-носитель «Протон» в паре с разгонным блоком «Бриз-М» обеспечивает выведение на геостационарную орбиту полезных грузов массой до 3,3 т. Но первоначально вывод осуществляется на низкую опорную орбиту (200 км). Хотя разгонный блок и называют одной из ступеней корабля, от обычной ступени он отличается двигателями[10].

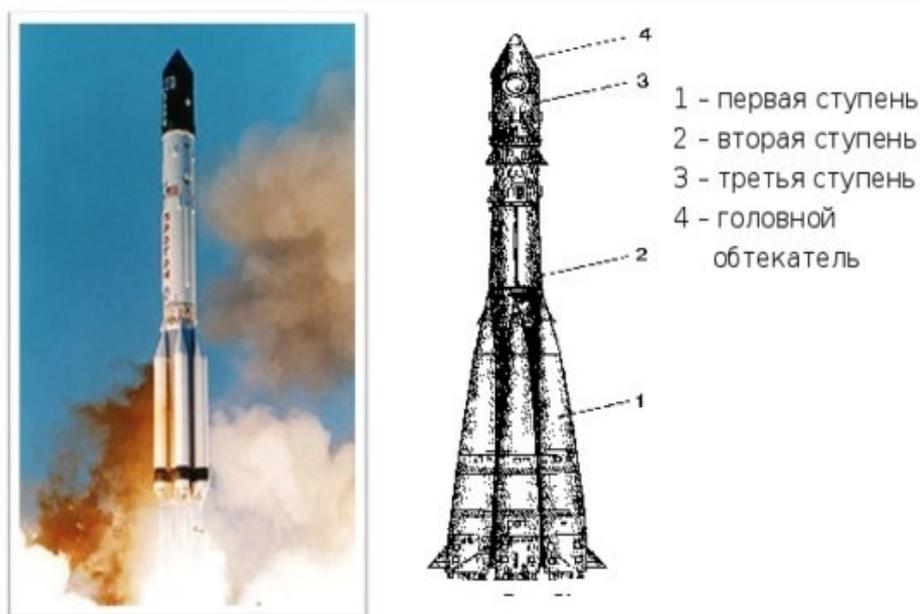


Рисунок 2 – Современная космическая ракета-носитель

Для перемещения космического аппарата или корабля на целевую орбиту или направления его на отлетную или межпланетную траекторию разгонный блок должен иметь возможность выполнить один или несколько маневров, при совершении которых изменяется скорость полета. А для этого

необходимо каждый раз включать двигатель. Причем в периоды между маневрами двигатель находится в выключенном состоянии. Таким образом, двигатель разгонного блока способен многократно включаться и выключаться, в отличие от двигателей других ступеней ракет.

Ракету, которая выводит на орбиту космический корабль с экипажем, практически всегда можно отличить по внешнему виду от той, которая выводит грузовой корабль или космический аппарат. Чтобы в случае возникновения аварийной ситуации на ракете-носителе экипаж пилотируемого корабля остался жив, применяется система аварийного спасения (САС). По сути, это еще одна (правда, небольшая) ракета в головной части ракеты-носителя. Со стороны САС выглядит как башенка необычной формы на вершине ракеты.

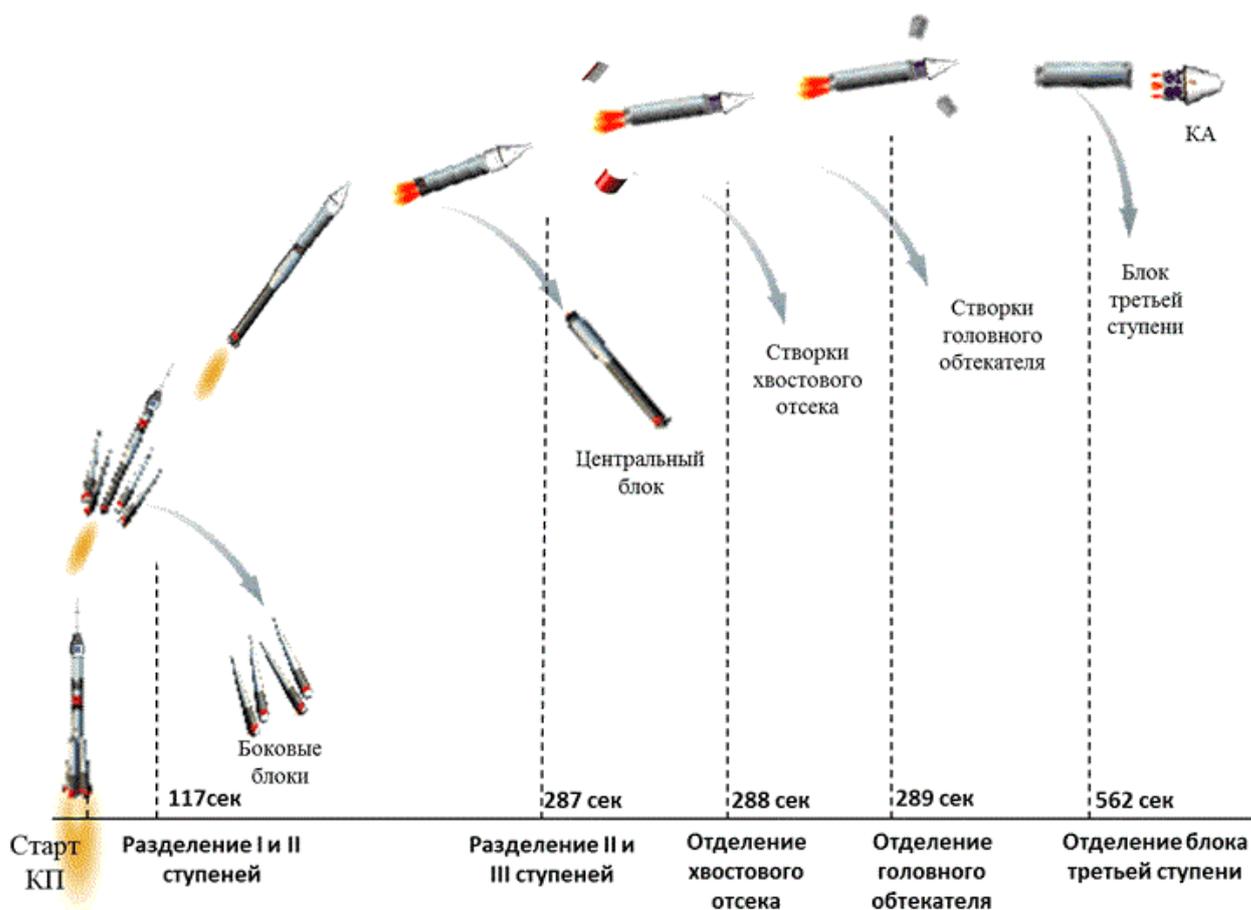


Рисунок 3 – Отделение ступеней ракеты

Рассмотрим примеры ракет Королёвской серии:

Р-7 (разг. «семёрка») — двухступенчатая межконтинентальная баллистическая ракета с отделяющейся головной частью массой 3 тонны и дальностью полёта 8 тыс. км[11].

Первая ступень ракеты состоит из четырех боковых блоков, каждый длиной 19 м и наибольшим диаметром 3 м. Они расположены симметрично вокруг второй ступени и соединены с ней верхним и нижним поясами силовых связей.

Конструкция блоков одинакова. Блок состоит из опорного конуса, топливных баков, силового кольца, хвостового отсека и двигательной установки. На всех блоках стояли ЖРД РД-107 с насосной подачей компонентов топлива. Двигатель был выполнен по открытой схеме и состоял из шести камер сгораний.

Вторая ступень ракеты Р-7 состояла из приборного отсека, баков для окислителя и горючего, силового кольца, хвостового отсека, маршевого двигателя и четырех рулевых агрегатов.

Запуск всех двигателей обеих ступеней на старте осуществлялся по той причине, что у разработчиков ракеты не было уверенности в возможности надежного зажигания двигателей второй ступени на большой высоте.

Все двигатели использовали двухкомпонентное топливо: окислитель — жидкий кислород, горючее — керосин Т-1. Для привода турбонасосных агрегатов ракетных двигателей применялся горячий газ, образующийся в газогенераторе при каталитическом разложении перекиси водорода, а для наддува баков — сжатый азот. Для достижения необходимой дальности полета установили автоматическую систему регулирования режимов работы двигателей и систему синхронного опорожнения баков (СОБ), что позволило сократить гарантийный запас топлива.

- Максимальная дальность полета – 8 000 км.
- Стартовая масса – 283 тонны.
- Масса топлива – 250 тонн.
- Масса полезной нагрузки – 5 400 кг.
- Длина ракеты – 31,4 метра.
- Диаметр ракеты – 1,2 метра.
- Тип головной части – моноблочная.

«Спутник» — двухступенчатая ракета-носитель, созданная на базе межконтинентальной баллистической ракеты Р-7.

Для запусков космических аппаратов с ракеты Р-7 сняли систему радиоуправления дальности, систему боковой радиокоррекции траектории и боевую головную часть. Также вместо отсека радиоуправления и подголовного отсека были установлены облегченный отсек для крепления искусственного спутника Земли и конический головной обтекатель. Кроме того, были смонтированы новые системы телеметрии, программного и командного управления, терморегулирования[12].

Первая ступень состояла из четырех боковых блоков с четырехкамерными жидкостными ракетными двигателями РД-107, размещенных по параллельной схеме вокруг центрального блока второй ступени с четырехкамерным жидкостным ракетным двигателем РД-108.

Всего было выполнено два пуска ракеты «Спутник» – 4 октября 1957 года с Первым искусственным спутником Земли и 3 ноября 1957 года со Вторым искусственным спутником Земли.

Геометрические размеры:

- длина, м – 29,17;
- максимальный поперечный размер, м – 10,3.

Массовые характеристики:

- масса сухой конструкции, т – 20,6;
- стартовая масса, т – 267.

«Восток» – трёхступенчатая ракета-носитель для запуска космических кораблей; на всех ступенях используется жидкое топливо. С помощью РН «Восток» были подняты на орбиту все космические аппараты серии «Восток», КА «Луна-1» – «Луна-3», некоторые искусственные спутники Земли серии «Космос», «Метеор» и «Электрон». Первый запуск (неудачный) состоялся 23 сентября 1958 года, первый успешный – 2 января 1959 года[13]. Запуск ракеты-носителя с первым пилотируемым космическим кораблем «Восток» состоялся 12 апреля 1961. Является частью семейства Р-7.

Разработка корабля началась в ОКБ С. П. Королева (ныне РКК «Энергия») осенью 1958 года. На этапе конструирования рассматривались различные схемы кораблей: от крылатой модели, позволявшей совершать посадку в заданном районе и чуть ли не на аэродромах, до баллистической – в форме сферы. Создание крылатой ракеты с высокой грузоподъемностью было сопряжено с большим объемом научных исследований, по сравнению со сферической формой.

За основу была взята недавно сконструированная для доставки ядерных боеголовок межконтинентальная ракета (МР) Р-7. После ее модернизации и родился «Восток»: ракета носитель и одноименный пилотируемый аппарат. Особенностью корабля «Восток» стала отдельная система посадки спускаемого аппарата и космонавта после его катапультирования. Данная система предназначалась для аварийного покидания корабля на активном участке полета. Это гарантировало сохранение жизни, независимо от того, куда осуществлялась посадка – на твердую поверхность или акваторию.

Обитаемый модуль состоит из:

- корпуса;
- тормозного двигателя;
- катапультируемого кресла;
- 16 газовых баллонов системы жизнеобеспечения и ориентации;
- теплозащиты;
- приборного отсека;
- входного, технологического и служебных люков;
- контейнера с пищей;
- комплекса антенн (ленточных, общей радиосвязи, системы командной радиосвязи);
- кожуха электроразъемов;
- стяжной ленты;
- системы зажигания;

- блока электронной аппаратуры;
- иллюминатора;
- телевизионной камеры.
- Максимальная масса (расчётная) полезного груза РН «Восток» (при выводе на орбиту) – 4725 кг;
- Стартовая масса РН – 287 т;
- Общая длина (с обтекателем) – 38,36 м;
- Максимальный поперечный размер (по воздушным рулям) – 10,3 м.

«Восход» - трёхступенчатая ракета-носитель из семейства Р-7. Ракета-носитель «Восход» была впервые запущена 16 ноября 1963 года. Основные отличия у новой ракеты состояли в третьей ступени. В качестве ее использовался вновь разработанный блок «И», который был существенно мощнее, чем применявшийся ранее на «Востоках» блок «Е». С помощью данной РН были выведены на околоземную орбиту космические корабли серии «Восход». Но наиболее широко эта РН использовалась для запусков ИСЗ серии «Зенит». Ракете-носителю «Восход» присвоен индекс 11А57. 12 октября 1964 года произведен запуск РН 11А57 с многоместным космическим кораблем «Восход» с космонавтами В. М. Комаровым, К. П. Феоктистовым и Б. Б. Егоровым. 18 марта 1965 года на орбиту был выведен космический корабль «Восход-2» с космонавтами П. А. Беляевым и А. А. Леоновым. В процессе полета корабля «Восход-2» космонавтом А. А. Леоновым был осуществлен выход в космос. Всего за период эксплуатации ракеты-носителя «Восход» с 1963 по 1976 гг. произведено 299 пусков, из них 285 успешных[14].

Габариты:

- количество ступеней – 3;
- длина – 44628мм;
- диаметр – 10300мм;
- масса – 298400.

Союз – советская трёхступенчатая ракета-носитель (РН) среднего класса из семейства Р-7, предназначенная для выведения на круговую орбиту

Земли с неизменным наклоном орбиты пилотируемых космических кораблей типа «Союз» и автоматических космических аппаратов серии «Космос».

После успешных запусков ракет-носителей «Восток» и «Восход» в 1958–1963 годах, С. П. Королёв приступил к разработке принципиально нового направления в пилотируемой космонавтике.

Рассматривались не только простые полёты, максимум с пассивным сближением кораблей за счёт начального баллистического построения, но и групповые полёты, активное сближение, стыковка, переход космонавтов из корабля в корабль.

Для осуществления длительных полётов предусматривалось обеспечение более или менее комфортных условий для космонавта, для чего в состав корабля нового поколения вводился бытовой отсек[15].

Общая длина ракеты-носителя составляет не более чем 50,67 м и зависит от типа запускаемого космического корабля. Максимальный поперечный размер ракеты-носителя измеряется по концевикам воздушных рулей и составляет 10 м и 30 см. Стартовая масса не более 308 тонн, а общая масса топлива не более чем 274 тонны. Сухая масса ракеты-носителя с транспортными патронами и полезной нагрузкой не более чем 34 тонны и зависит от типа запускаемого космического корабля.

Двигательные установки РН «Союз» позволяют развивать суммарную тягу 413 тс на уровне моря и более чем 505 тс в вакууме.

Трёхступенчатая ракета-носитель «Союз» состоит из:

- первой ступени, которая состоит из четырёх стартовых ускорителей – блоков «Б», «В», «Г» и «Д»;
- второй ступени, которая состоит из центрального блока «А»;
- третьей ступени – блок «И»;
- адаптера полезного груза, головного обтекателя и системы аварийного спасения экипажа.

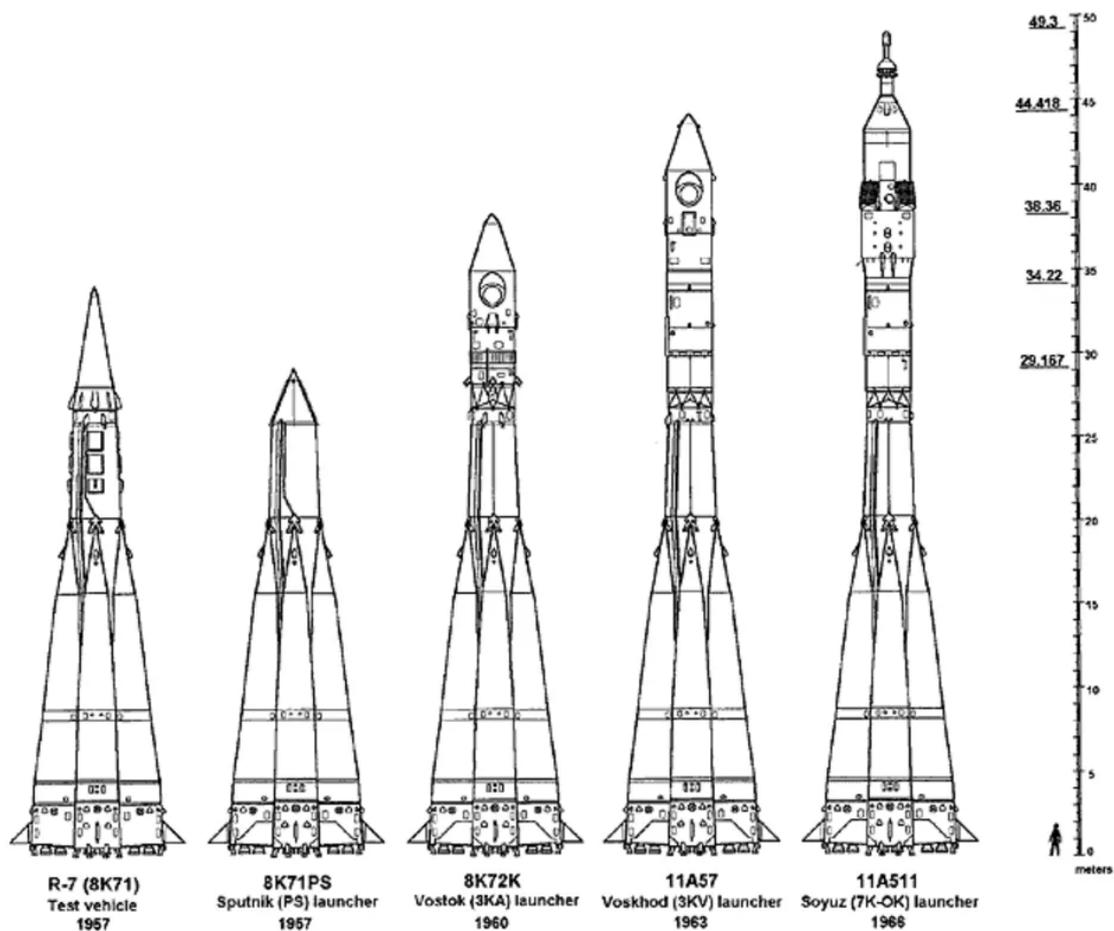


Рисунок 4 – Основные ракеты королевской серии

### 1.3 Существующая сувенирная продукция

На самом деле очень мало компаний, которые производят космическую сувенирную продукцию, по просторам интернет ресурса больше металлических и бумажных моделей кораблей, ниже рассмотрим их преимущества и недостатки.



Рисунок 5 – Сувенирная линейка Роскосмоса



Рисунок 6 – Космический корабль Буран

На текущий момент можно выделить 2 основных типа моделей космических кораблей: металлические и бумажные.



Рисунок 7 – Спутник-1

К преимуществам металлических моделей можно отнести:

- надежность. Металл, как материал отличается долговечностью, сохранением формы и устойчивостью к физическим воздействиям;
- точность макета. Металл позволяет точно передать все пропорции и особенности моделируемого объекта.

Из недостатков металлических моделей стоит отметить:

- долгое время производства. Твердость материала означает не только его долговечность, но и продолжительное время обработки;
- стоимость производства. Данный пункт вытекает из предыдущего. Для обработки металла нужен высококвалифицированный сотрудник, который довольно продолжительное время будет занят одним макетом. Также материал имеет немалую стоимость;
- квалификация производителя. Металлическую модель не получится изготовить в домашних условиях. Нужны профессиональное оборудование и навыки многих специалистов.

Металлические модели могут быть использованы множеством различных способов: выставочные образцы, подарочные экземпляры и тп. Но для процесса обучения они слишком затратные.

В противовес металлическим моделям рассмотрим бумажный аналог.

К преимуществам бумажных моделей можно отнести:

- простота производства. Процесс производства бумажных моделей можно представить 2 этапами: распечатка модели на обычном офисном принтере и ее сборка;
- стоимость производства. Поскольку время сборки и печати невысоко, то и на стоимость одной модели они не влияют. Наибольшее влияние на цену оказывает материал, из которого выполнена модель. Это может быть простой лист бумаги или плотный картон, тем не менее, общая стоимость несравнимо меньше, чем у металлического аналога.

Недостатками бумажных моделей являются:

– высокая погрешность при производстве. Сложить бумажный макет идеально – задача не из простых, поэтому всегда существует погрешность при сборке;

– недолговечность. Один из самых главных недостатков бумаги – это ее невысокая прочность. Помимо физических воздействий, бумага восприимчива к влаге, она хорошо впитывает любую жидкость, которая может оставить на ней следы.

На основе выявленных достоинств и недостатков каждой из моделей можно сделать вывод, что они представляют собой крайности по своим характеристикам. Достоинства одной модели – недостаток другой. Материал модели является одним из основополагающих факторов при выборе модели. К второстепенным факторам можно отнести квалификацию сотрудника при производстве макета и время производства макета.

## 2 МАЛОБЮДЖЕТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУВЕНИРНЫХ МАКЕТОВ

### 2.1 Предлагаемое решения рассматриваемых задач

На основании анализа существующих вариантов модели космических кораблей, рассмотренных преимуществ и недостатков, было сформировано решение – печать моделей кораблей из пластика с помощью 3D-принтера.

Пластик – синтетический материал, который в сыром виде представлен вязкой жидкостью, поэтому не требует грубой и долгой обработки, как металл. В тоже время после нагрева и застывания принимает твердую, практичную форму, которая позволит многократно использовать модель в качестве наглядного предмета.

Материал не токсичный, взаимодействие с ним не оставляет следов ни на коже человека, ни на самой модели.

Обслуживание модели заключается в поверхностной очистке антисептическим или мыльным раствором.

Себестоимость материала для построения модели невысока.

Процесс создания модели можно описать следующими шагами:

- выбор и анализ чертежей модели;
- построение виртуальной 3D-модели корабля в специализированном программном обеспечении;
- печать макета космического корабля на 3D-принтере по созданной компьютерной модели.

Данный подход имеет преимущество в автоматизме процесса печати формы, сотруднику потребует только наблюдать за процессом и небольшая механическая очистка модели от вспомогательных конструкций.

Наибольшее время в описанном выше процессе затрачивается на построение 3D-модели в редакторе. Далее будут рассмотрены виды программного обеспечения для построения 3D-моделей, произведен анализ их преимуществ и недостатков. Также будут рассмотрены существующие устройства для 3D-печати.

Далее в работе необходимо определить область, в которой будет использоваться будущая модель. Данное уточнение позволит точнее определить требования к ее характеристикам.

В данной работе рассматривается область применения моделей космических кораблей в качестве обучающей модели. Основной задачей макета будет демонстрация характеристик ракеты в масштабе.

Из этого вытекают требования к модели:

- точность передачи параметров моделируемого аппарата;
- устойчивость к многократным физическим контактам студентов – прикосновениям к модели. Обучающиеся многократно тактильно взаимодействуют с моделью, чем уменьшают ресурс долговечности;
- доступность производства. Демонстративных образцов требуется достаточное количество на стандартную группу студентов из 20 человек. При этом стоимость производства каждого из макетов должна быть невысокой, так как в конечном итоге это всего лишь демонстрация;
- легкость поддержки рабочего состояния. Постоянные тактильные взаимодействия с моделью ведут к образованию потожировых следов на ней. Также тот факт, что моделей будет достаточно много, накладывает требование к простоте и доступности способа поддержания макетов в демонстрационном, опрятном виде.

На основании выделенных характеристик области применения модели космического корабля, можно сформировать развернутый вывод о пригодности существующих решений. Таким образом, текущие варианты моделей космических кораблей не способны в полной мере удовлетворить требованиям задач обучения студентов. Необходимо некое среднее решение, которое будет достаточно практично и долговечно, достаточно точно передавать физические параметры исходной системы, как металлический образец и с невысокой стоимостью и простотой производства, как аналогичный бумажный вариант. Металлические модели слишком дорогие и избыточно точные. Бумажные модели дешевые, но недостаточно прочные.

## 2.2 Детальные чертежи ракет королевской серии

Чтобы систематизировать общую совокупность реализуемой линейки макетов ракет Королевской серии, рассмотрим технические чертежи ракетоносителей «Спутник», изображенный на рисунке 8, ракетоноситель «Восток», изображенный на рисунке 9, ракетоноситель «Восход», изображенный на рисунке 10 и ракетоноситель «Союз», изображенный на рисунке 11.

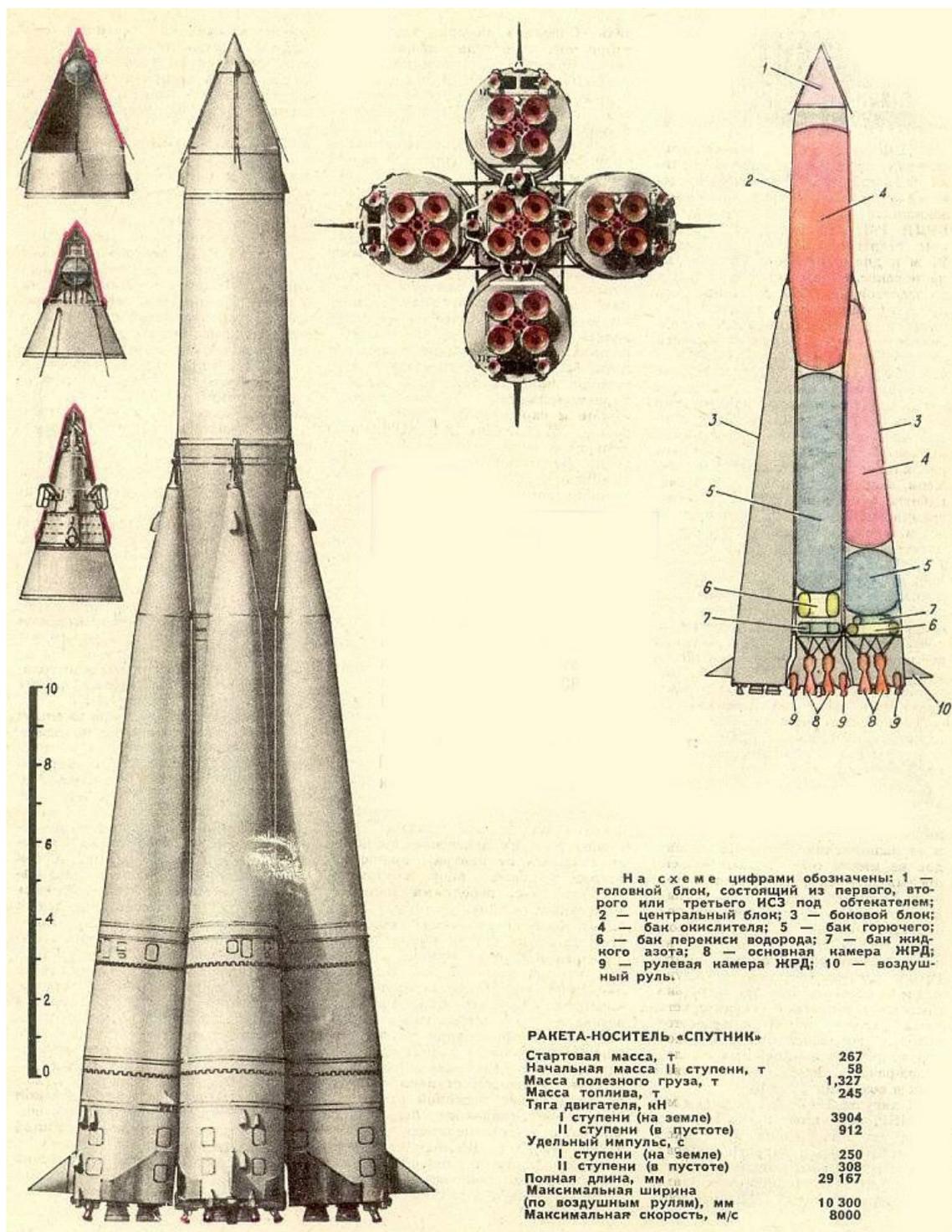


Рисунок 8 – Схема ракетоносителя «Спутник»

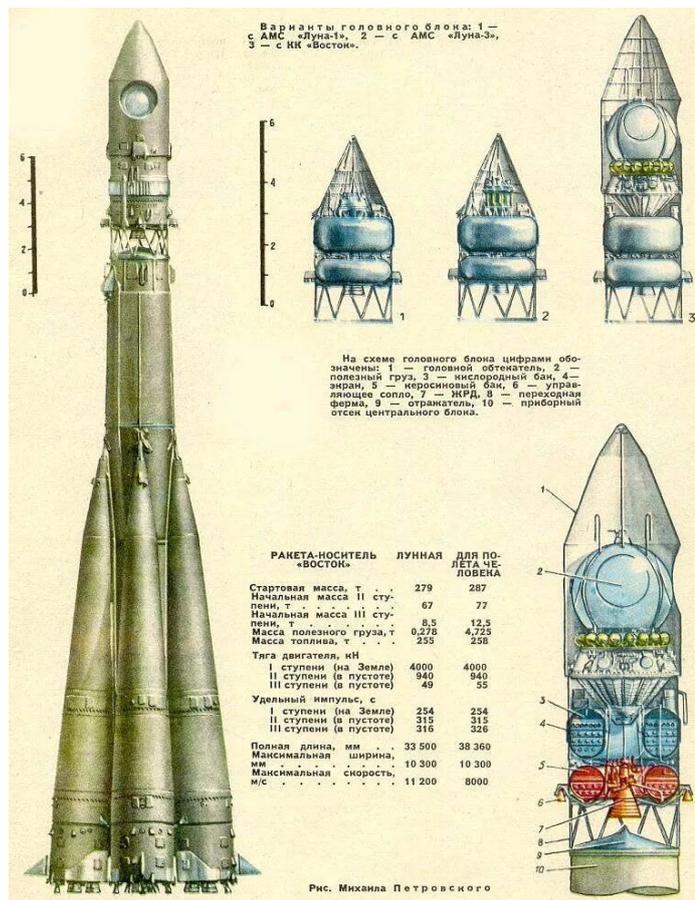


Рисунок 9 – Схема ракетносителя «Восток»

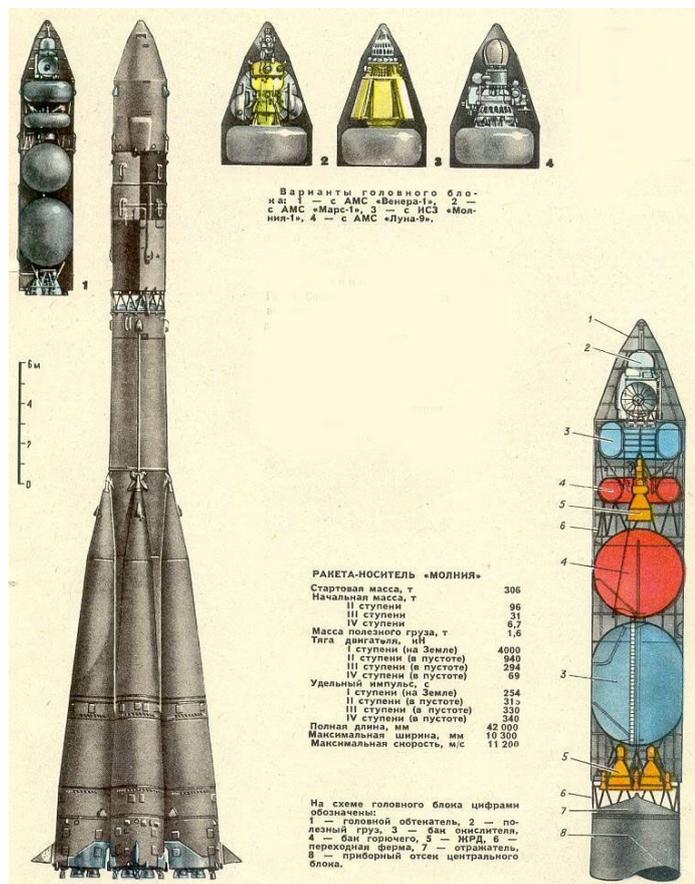


Рисунок 10 – Схема ракетносителя «Молния» («Восход»)

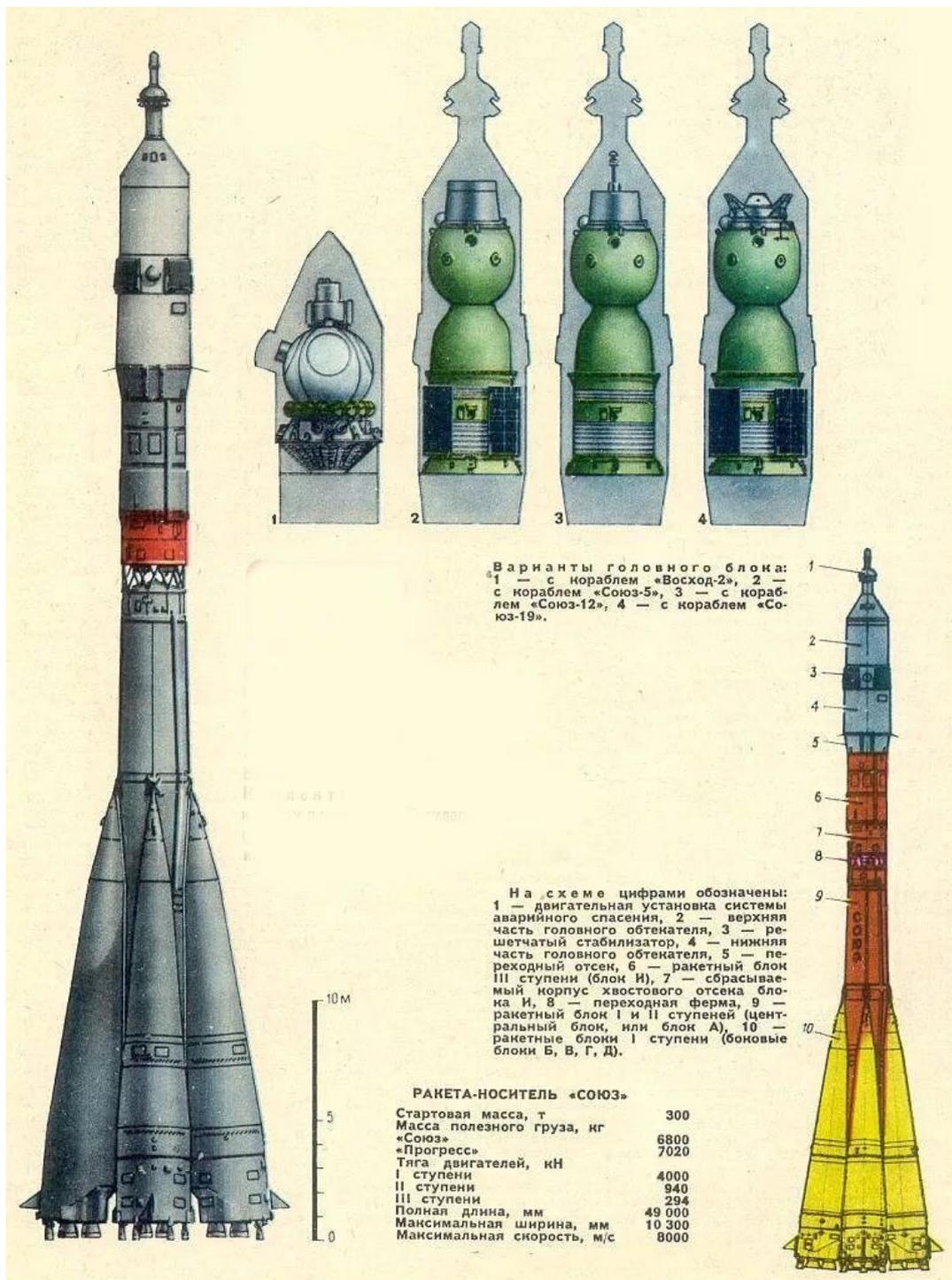


Рисунок 11 – Схема ракетносителя «Союз»

### 2.3 Программное обеспечение 3D моделирования

Динамично развивающиеся технологии привело к значительному росту качественного программного обеспечения, направленного на работу с трехмерной графикой. Сейчас окружающие мир визуальные эффекты уже приелись, в том числе и потому что развитии технологий позволило вывести ком-

пьютерное моделирование на новый уровень, благодаря современным редакторам для работы с трехмерной графикой.

## **2.4 Blender**

Blender – это очень функциональный программный продукт с огромным количеством инструментов по всем направлениям компьютерной графики, включающий такие направления, как моделинг, хард-серфейс моделинг, скульптинг, двухмерная и трехмерная анимация, объемы, рендеринг и многое другое. Данный продукт включает всё необходимое, как для изучения, так и продвинутого моделирования[16].

Удобный набор инструментов для моделирования и скульптинга дают возможность очень быстро изучить возможности разных функций и начать работать с моделями. Возможность автоматического рига, позволяет без особых трудов произвести анимацию сложных объектов, а также персонажей, даже, если до этого никогда не связывался с анимацией.

Для художников в формате двухмерного моделирования, Blender дает возможность произвести формирование сцены в перспективе. Также Blender имеет набор физических возможностей Мантафлоу, который выполняет работу с спецэффектами формата VFX[17].

Для 2D-аниматоров Blender может предложить лучшее, что есть в сфере – grease pencil. Этот инструмент позволяет делать крутые раскадровки для 2Данимации, анимировать 2D-объекты поверх 3D-сцены и многое другое.

Данная программа постоянно получает обновления, и имеет большое количество активных пользователей, которые производят платежи для дальнейшего развития.

Blender, также включает в себя редактор видеозаписей, который имеет в себе функционал, включающий работу с нарезкой и монтажом видео, но и также выполнять динамический трекинг.

Начинающие пользователи данного программного обеспечения имеют возможность простого входа в индустрию трехмерной компьютерной графики. Пользователи могут обучаться, как в одном направления, так и во множе-

стве. Комбинирование направлений даст возможность создавать очень сложные модели и сцены, которые можно использовать в качестве будущей игровой сцены, или качественного рендер-изображения.

Также имеет место отметить низкий порог вхождения в ПО за счёт его дружелюбного интерфейса, в отличие от конкурентов. Этот фактор значительно влияет на статус программного обеспечения, так как именно удобный интерфейс располагает к себе. Также Blender имеет множество форумов, а также большое количество всевозможной литературы и видеоматериалов обучающего характера.

В отличие от других программ Blender позволяет, к примеру, провести моделирование объекта и разобрать его топологию, произвести детализацию, например, включить режим скульптинга и нарисовать дефекты поверхности, или построить карты нормалей, а также произвести запекание моделей, что нельзя сделать в других программах.

Скульптинг в Blender реализован на хорошем уровне, с удобными и понятными инструментами и большим количеством настроек, но при работе с большим количеством полигонов, появятся проблемы в виде торможения, поэтому для работы с моделями с высоким количеством полигонов, лучше использовать программу ZBrush, но данная программа имеет больший порог вхождения и сложный интерфейс по сравнению с Blender[18].

В итоге можно сказать, что данное программное обеспечение для разработки трехмерных моделей, является универсальным, и включает в себя большой и удобный инструментарий (рис12). Также это ПО является исключительным за счёт своей доступности, которая выражается тем, что программа имеет небольшой вес, а также факт свободного распространения. Разработчики выпускают по несколько небольших обновлений в месяц и со статистикой примерно раз в год производят выпуск больших обновлений включающих большой набор новых инструментов и возможностей.

Возможности:

- моделирование, основанное на полигонах;

- возможность скульптурной лепки;
- система частиц;
- динамика физических объектов и их состояний;
- скелетная анимация;
- встроенный механизм рендеринга;
- редактор видео;
- возможность создания игр и приложений.

Достоинства:

- бесплатность;
- открытый код;
- постоянное развитие;
- небольшой размер установщика;
- кроссплатформенность;
- большое количество модификаторов.

Недостаток:

- отсутствие документации в базовой поставке.

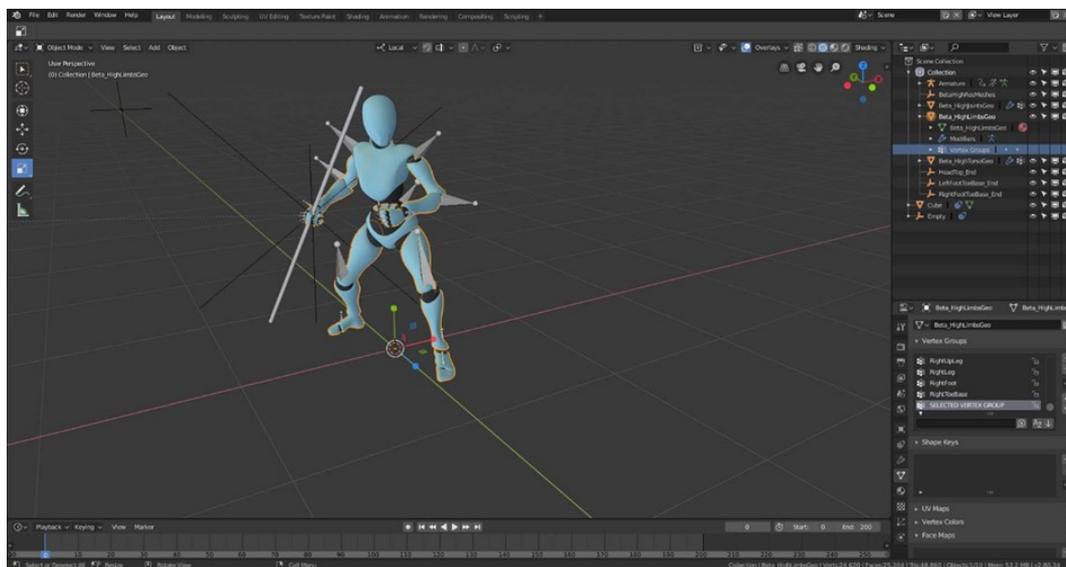


Рисунок 12 – Интерфейс Блендер

## 2.5 Autodesk 3Ds Max

Лидером рынка средств разработки трехмерной графики является программное обеспечение от компании Autodesk – 3Ds Max(рис 13). Данная программа включает в себя работу трехмерной графикой, в частности работу с

реконструкцией, что сыграло важную роль в популярности и популярности среди фанатов[19].

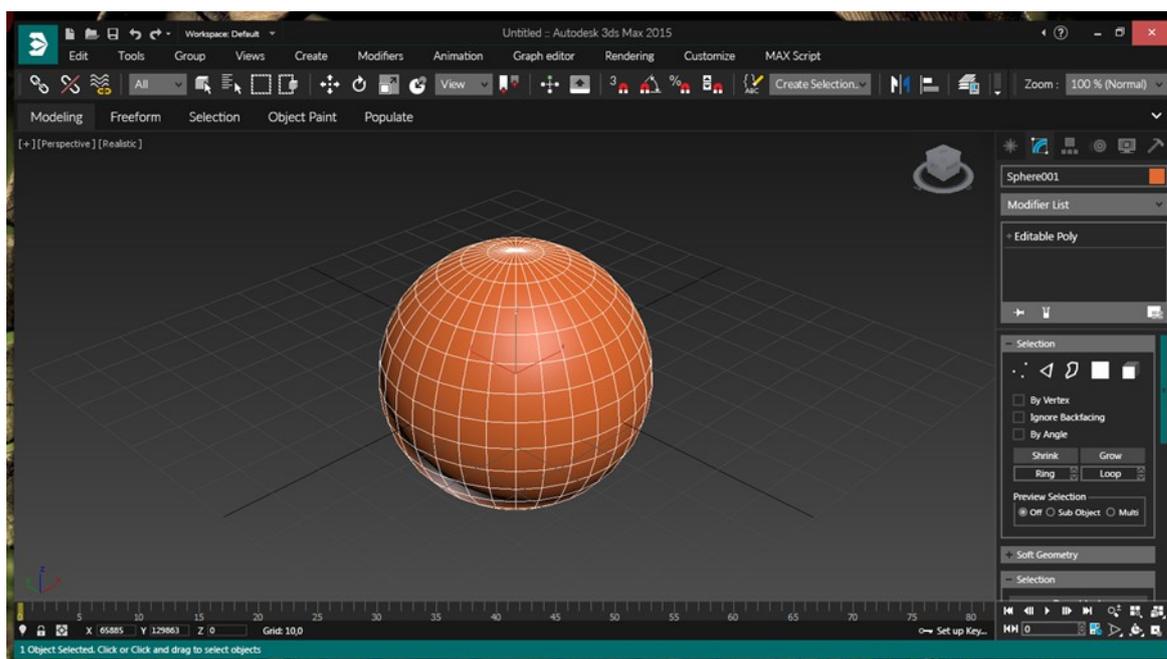


Рисунок 13 – Интерфейс 3D Max

Данная программа включает огромное количество разных ассетов, что способствует ускорению и упрощению процесса моделирования. Программа включила в себя встроенный и очень мощный инструментарий, для возможности очень детализированных моделей, с помощью которых достигается максимальная реалистичность модели, которую можно сравнить с оригиналом. Также программа имеет мощный рендер движок, включающий гибкие настройки освещения.

Возможности:

- полигональное моделирование;
- мощная система частиц;
- модуль волосы/шерсть;
- расширенные шейдеры Shader FX;
- анимация толпы;
- импорт из Revit и SketchUp;
- интеграция композитинга.

Достоинства:

- достойный функционал;
- множество плагинов и обучающей информации.

Недостатки:

- довольно непросто освоить;
- требуются серьезные обновления.

## 2.6 Autodesk Maya

Autodesk Maya – это еще один флагман среди программных продуктов трехмерной разработки, который постоянно конкурирует с его близкой средой трехмерной разработки 3Ds Max (рис 14). Данное программное обеспечение обрело большое количество пользователей в сфере трехмерной разработки.

Autodesk Maya включает большой инструментарий для создания реалистичных трехмерных моделей, а дальнейшая обработка в фоторедакторе приводит рендеры к идеалу. Программа славится процессором PaintEffects, с помощью которого можно создать объекты по типу травы, волос и т.д.[20].

Главной же особенностью данного ПО является богатый функционал работы с анимацией трехмерных объектов, сцен, персонажей, VFX-объемов, различных визуальных эффектов и т.п, также, как и Blender программа включает работу с анимационной строкой, а также редактором графов, что дает возможность создать качественную анимацию, а также позволяющий редактировать осевые ускорения, положения, вращения и масштабы объектов, а также производить привязку дочернего объекта к родительскому, тем самым упрощая работу над сложными сценами.

Возможности:

- полный набор инструментов для полигонального моделирования;
- мощные средства общей и персонажной анимации;
- развитая система частиц;
- технология Maya Fur (создание меха, волос, травы);
- технология Maya Fluid Effects (моделирование жидкости, атмосферы);
- динамика твердых и мягких тел;

- широкий набор средств создания динамических спецэффектов;
- UV-текстуры, нормали и цветовое кодирование;
- многопроцессорный гибкий рендеринг.

Достоинства:

- огромный функционал и возможности.

Недостатки:

- длительное и сложное обучение;
- высокие требования к системе;
- высокая цена

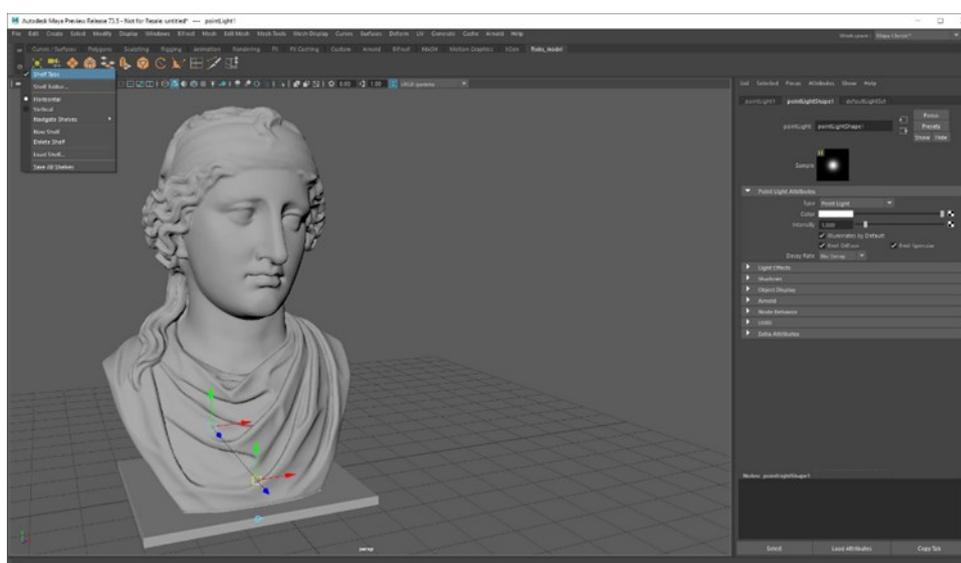


Рисунок 14 – Интерфейс Maya

## 2.7 Zbrush

ZBrush – это программный продукт для производства трехмерных моделей с так называемым процессом, как скульптинг, разработана компанией Pixologic (рис 15). Данная программа имеет своеобразный процесс моделирования, который напоминает процесс лепки из глины трехмерных объектов. В отличие от других программ трехмерного моделирования, ZBrush с легкостью обрабатывает модели с высоким полигональным разрешением свыше 5 млн. полигонов, что является затруднительным для таких программ, как Blender и 3Ds Max, это возможно за счёт усиленного движка для произведения рендеринга трехмерной сцены, или объекта, который обрабатывает модели в реальном времени, таким образом процесс моделирования упрощает-

ся, за счёт сокращения производственных мощностей. Каждая точка, называемая в среде трехмерной разработки вершиной, описывается не только координатами x и y, а также цветом, но и глубиной, которая описывается осью z, а также имеет информацию об ориентации, а также об имеющихся материалах и их свойствах. За счёт перечисленных средств появляется возможность не только лепки модели, но и её будущей раскраски. Для более реалистичной картинке, используется средства динамического рендеринга, которые проецируют на объект светотеневой рисунок.

Программа может работать со всеми стандартными трехмерными моделями, используя в качестве инструментария кисти, при помощи которых производится модификация объекта, а также появляется возможность работы с текстурами и материалами. Для производства более сложных действий, всегда можно подключить дополнительные сложные модули, которые могут расширить начальный функционал программы, а также гибкая настройка графического интерфейса пользователя позволит настроить всё под себя, что в разы ускорит процесс производства трехмерных моделей[21].

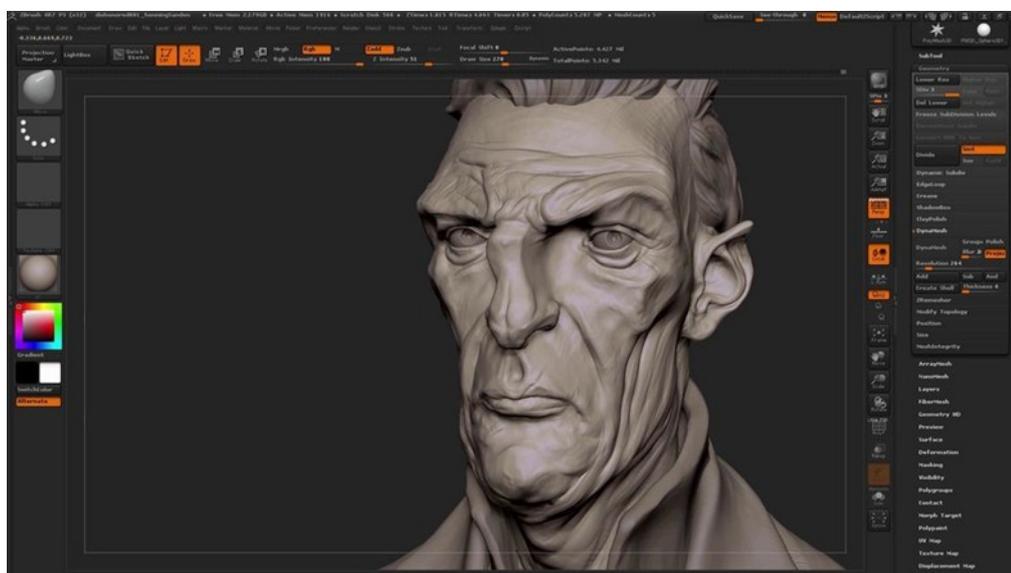


Рисунок 15 – Интерфейс ZBrush

ПО включает огромное количество кистей различного назначения, например, вытягивать, или вдавливать геометрию объекта, наращивать, или удалять «виртуальную глину» у объекта, вытягивать, сглаживать, полировать, царапать, а также многое другое, что в комбинации даёт очень мощный

программный продукт, для создания моделей любой сложности. Модификация геометрии материала и текстуры осуществляется с помощью кисти. В программе присутствует большое количество подключаемых модулей:

- быстрой интеграции с профессиональным пакетом 2d графики;
- широкого выбора кистей;
- возможности создания собственных альф на основе рисунка;
- работы с текстурой и др.

## **2.8 Обоснование выбора 3D-редактора**

Среди выделенных трехмерных редакторов, самыми интересными являются ZBrush и Blender. С одной стороны, стоит программное обеспечение с большим количеством кистей способных создать объект любой сложности и который не боится использования большого количества полигонов, но требует огромных знаний и времени на изучение, с другой же стороны стоит программа свободного распространения, которая имеет низкий порог вхождения, а также удобный интерфейс и понятные инструменты, что позволяет очень быстро начать создавать различные модели[22]. Поэтому, для реализации выбранного объекта, более подойдет программное обеспечение Blender. Среди его преимуществ можно выделить:

- русский язык и еще множество других языков разной степени локализации, на русский язык программа переведена полностью;
- быстрое моделирование по сравнению с аналогами благодаря тому, что все функции имеют свои горячие клавиши и это очень удобно реализовано. В программе удобнее работать именно клавишами;
- свободное распространение. Программа является свободно распространяемой, так как она содержится на пожертвованиях своего немалого общества, которые видят в ней большой потенциал.

Программа Blender дает пользователю множество возможностей в моделировании, остается бесплатной и кроссплатформенной. Само существование такой программы показывает, насколько качественным может быть свободно распространяемый продукт безо всяких оговорок.

Именно поэтому в качестве 3D-редактора выбор пал именно на Blender

## 2.9 Обзор устройств аддитивной технологии

FDM-печать, или трехмерная модель методом послойного наплавления это один из видов аддитивной технологии, который представляет собой выдавливание расплавленного материала слой за слоем. Весь процесс трехмерной печати методом послойного наплавления, включает в себя расплавление филаментов различного состава, с различными свойствами, которые выдавливаются через узкое сопло, диаметры которых также могут варьироваться, на рабочую поверхность, которая в большинстве случаев имеют собственный нагрев слой, за слоем с установленной высотой каждого слоя[23].

Трехмерная печать методом послойного наплавления (рис. 16) является самой распространённой технологией трехмерной печати, за счёт своей доступности и простоты работы и использования устройств. На сегодняшний день представлены различные решения реализации устройств данной технологии, а также с каждым годом придумываются всё более интересные и результативные решения.

Разработка трехмерных моделей под трехмерную печать требуют дополнительных знаний в моделировании таких моделей, так как, методы реализации трехмерной печати, используют специальные алгоритмы, которые требуют от моделей, соблюдение некоторых обязательных правил[24].

Конец нити филамента, подаётся в трехмерный принтер из специальной катушки. В зависимости от вида принтера, нить по-своему подается в горячую зону, или в так называемый хотенд, в которой нить расплавляется и начинает проникать наружу из сопла с маленьким диаметром, регулировка подачи пластика осуществляется с помощью экструдера. Экструдер подключен к 3-осевой системе, которая позволяет перемещаться в направлениях X, Y и Z. Расплавленный материал выдавливается в виде тонких нитей и плавится в виде слоя в определенных местах, где охлаждается и затвердевает. Иногда нагрев материала ускоряют вентиляторы, прикрепленные к экструдеру. Экструдер делает несколько проходов, чтобы заполнить область печати. При об-

работке слоя движение движется вниз (или, как в некоторых моделях принтеров, экструдер движется вверх), а новый слой наваривается на уже установленный. Этот процесс повторяется до тех пор, пока модель не создаст фабрику.

Многие принтеры, работающие по технологии послойного наплавления, имеют возможность настройки параметров трехмерной печати. В них включены такие параметры, как: настройка температуры нагревательного блока, рабочей поверхности, скорости печати, ускорение печати, высоту слоя, процент от работы кулеров охлаждения, плотность заполнения, толщину стенок, а также дна и днища, и т.д. Самое главное в трехмерной печати методом FDM, это не заходить за границы рабочей поверхности и оптимальный выбор высоты слоя трехмерной модели: Размеры рабочей поверхности 3D-принтеров варьируются от довольно мелких, от 10 см по каждой стороне, до огромных 100 см, которые относятся к промышленным принтерам. Размер 3D-принтера подбирается от возможного бюджета, а также цели, так как в случае чего, всегда существует возможность разбить большую модель на множество маленьких, распечатать и склеить между собой. Что важно с точки зрения моделирования, так это учитывать размер стола и высоту слоя самой детали: Для FFF-принтеров характерны печатные слои высотой от 50, до 400 микрон, данная настройка устанавливается в программе-слайсере, которая нарезает всю модель на установленные слои, также с недавнего времени доступна настройка динамических слоев, где программа сама подбирает какой слой печатать с той, или иной высотой. Чем меньше слой, тем более точнее получается выходная модель, но при этом время печати становится очень высоким, большая высота слоя, обеспечит быструю печать, но качество такой модели будет желать лучшего, но в качестве быстрого прототипирования очень полезно. На данный момент существует огромное множество разнообразных 3D-принтеров, работающих по технологии послойного наплавления:

49 Самый простой вариант 3D-принтера, это конструкция, представляющая из себя кубический каркас в основании которой, устанавливается печатная

плоскость с возможностью нагрева и перемещения в вертикальной проекции. Над ней располагается горячая зона с горизонтальным перемещением, чаще всего такая система работает на шаговых двигателях и перемещается по металлическим направляющим с помощью туго натянутых ремней. Горячая зона, чаще всего называется головой 3D-принтера и представляет собой комбинацию из фидера и хотэнда. Фидер – это устройство к которому крепится шаговый двигатель, отвечающий за количество выдавливаемого материала через сопло 3D-принтера, основная его функция — это захватить пруток пластика и на протяжении всего процесса печати обеспечивать подачу и вывод прутка из горячей зоны, пример такого устройства представлен на рисунке 16.

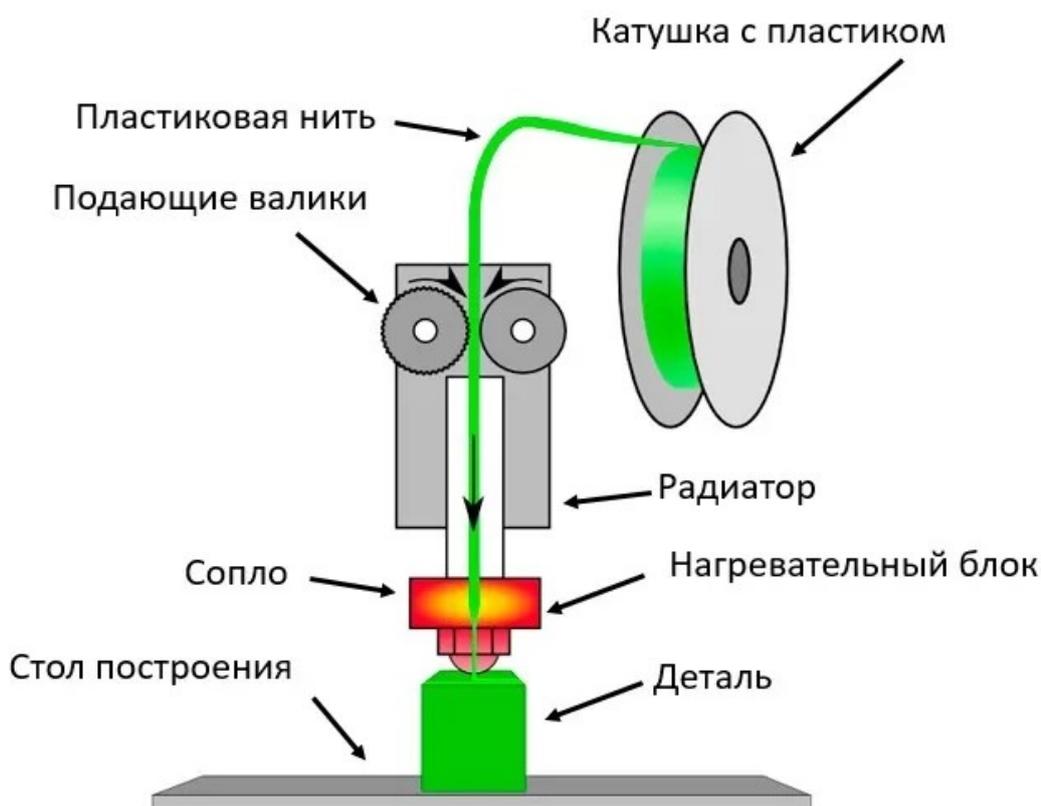


Рисунок 16 – Устройство FDM-принтера

Хотэнд – это комбинированное устройство, состоящее из радиатора, термобарьера, нагревательного блока и сопла, его функцией является 50 на-

грев прутка пластика до плавкого состояния и вывода его через сопло определенного диаметра (рис 17 ) [25].



Рисунок 17 – Хотенд 3D-принтера

На данный момент представлено огромное множество принтеров, работающих с технологией FDM. Существуют принтеры с прямой или дальней подачей пластика, с открытым или закрытым корпусом и даже принтеры с условно бесконечной высотой изготавливаемой продукции (рис 18).

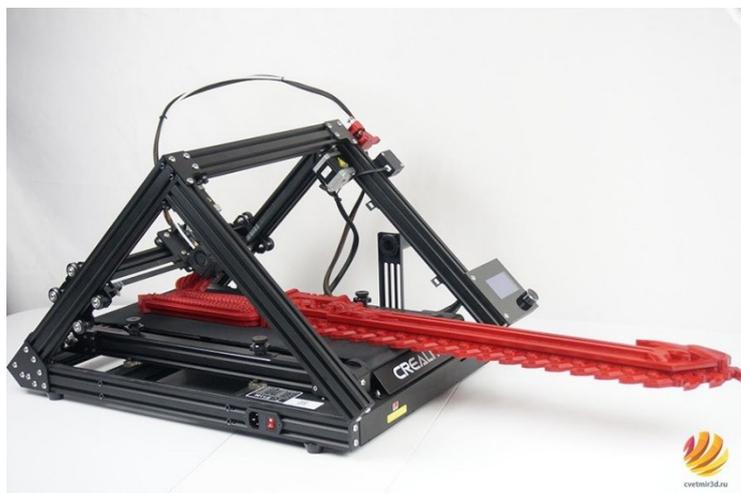


Рисунок 18 – 3D-принтер Creality 3DPrintMill

## 2.10 SLA и DLP-принтеры

Стереолитография (SLA) и цифровая обработка света (DLP) — две самые распространенные технологии 3D-печати с использованием полимеров. Устройства работающие по данной технологии, т.е. использующие для печат-

ти жидкие полимеры, становятся всё популярней и популярней, за счёт возможности создавать модели высокого качества и точности, которые не боятся внешних воздействий, таких как вода, а также имеют глянцевую поверхность. Ранее данные устройства, а точнее их технология считалась очень сложной, за счёт чего имела высокую стоимость, сегодня же рынок насчитывает огромное количество устройств от разных производителей со своим формфактором, своими программными продуктами, а также индивидуальными техническими решениями, а также часть из них может заинтересовать заманчивой ценой. Хотя эти две технологии могут значительно отличаться, но их суть довольно схожа, так как жидкий полимер для своего затвердевания требует засвета, в случае технологии SLA источником является лазер, DLP –проектор, обе технологии формируют очень тонкие слои смолы, которые слой за слоем формируют трехмерную аддитивную модель. За счёт разных принципов в работе, в процессе печати могут существенно отличаться настройки печати, а также результаты печати. Как работают фотополимерные принтеры

Множество бюджетных стереолитографических трехмерных принтеров имеют ванночку для фотополимерной смолы с прозрачным дном и печатной поверхностью, на которую запекаются слой за слоем, с которого без особого труда можно снять распечатанную модель, пример работы принтера изображен на рисунке 19. Весь процесс печати опирается на то, что рабочая платформа, представляющая как, правило перевернутую плоскость, которая погружается в специальную ванночку до уровня, который означает установленную высоту печати, данная ванночка наполняется жидким полимером. Данная разница между рабочей плоскостью и дном ванночки засвечивается ультрафиолетом на некоторое количество времени, в процессе которого происходит затвердевание слоя.[26] Засвет производится при помощи луча лазера, который подается на два симметричных гальванометра, за счёт которых он попадает в необходимое положение. Таким образом производится запекание модели слой за слоем.

По окончании печати слоя, он поднимается на высоту слоя и заполняется полимером, после чего процесс повторяется и таким образом проходит весь процесс печати.

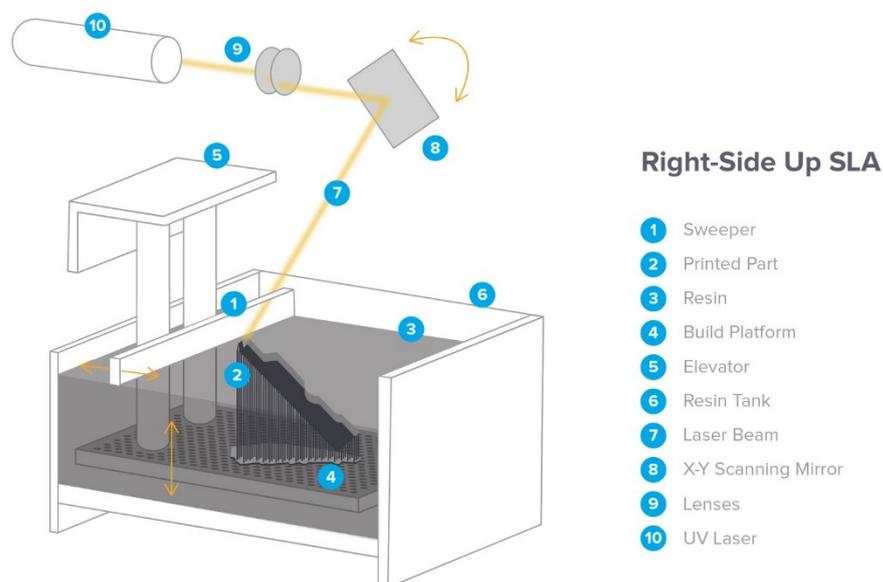


Рисунок 19 – Устройство фотополимерного принтера

## 2.11 Обзор ПО трехмерной печати

Слайсер – это программное обеспечение, основной целью которой, является подготовка трехмерной модели объекта к 3D-печати. Данные программы выполняют разбиение модели на множество фиксированных слоёв. Программа-слайсер выполняет нарезку трехмерной модели на слои заданной толщины, и 3D-принтер, считывая закодированную информацию, печатает нужный объект. От работы слайсера конечный результат печати зависит едва ли не в большей степени, чем от возможностей самого принтера[27].

## 2.12 Ultimaker Cura

Программа Ultimaker Cura, интерфейс изображен на рисунке 20 — это самый популярный на данный момент программный продукт, который достаточно удобный в использовании, к тому же генерирует G-код-файл для использования множества моделей 3D-принтеров. Так как данная программа является ПО со свободным кодом, оно позволяет вносить в себя некоторые коррективы для будущего удобства использования, а также включать множе-

ство сторонних продуктов от других разработчиков, таких, как возможность передавать нарезанные файлы через сеть Wi-Fi. Слайсер Ultimaker Cura в свою очередь имеет огромную поддержку всевозможных форматов трехмерных файлов, таких как OBJ, STL, FBX и т.д. а также поддерживает стандартные форматы растровых изображений. Начиная с 2016 года, программный продукт включил возможность работать с мультиэкструдерными принтерами. С каждым годом программа включает поддержку новейших материалов для печати, которые появляются десятками за год. Поскольку для слайсера Cura сторонними разработчиками создано множество плагинов, специалисты Ultimaker ввели звездочную систему пользовательских оценок, чтобы новые пользователи могли легко оценить удобство плагинов[28].

Достоинства:

- ПО надежного разработчика;
- постоянное обновление слайсера;
- удобный пользовательский интерфейс;
- открытый программный код;
- совместимость с принтерами многих производителей;
- встроенная поддержка печатных материалов известных брендов.

Недостатки:

- не всегда получается очевидно настроить поддержки, для лучшего результата придется разобратся в экспериментальных функциях;
- низкая скорость работы на слабых ПК.

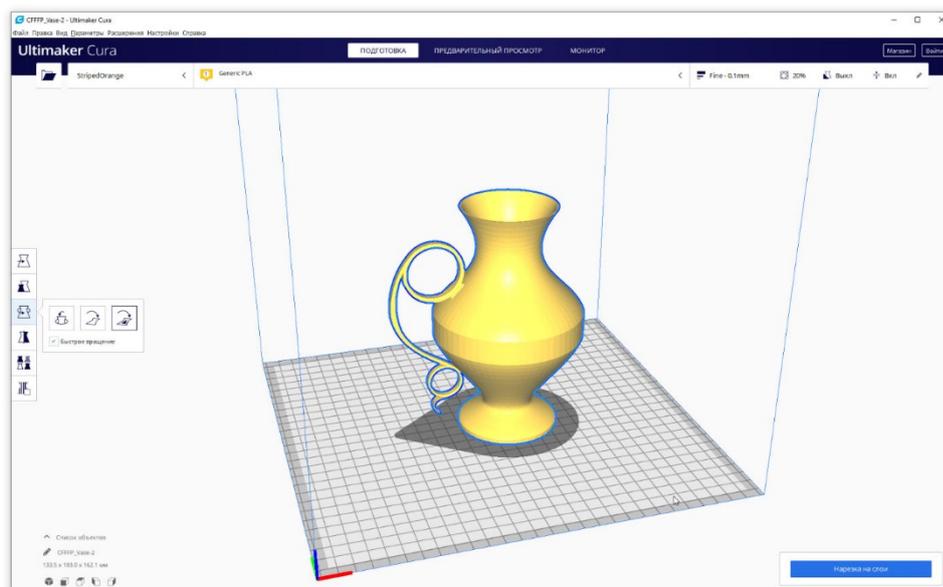


Рисунок 20 – Ultimaker cura

### 2.13 PrusaSlicer

PrusaSlicer (рис. 21) — это мощный продукт от Prusa Research на рынке 3D-слайсеров. Первоначально созданный на основе Slic3r Алессандро Ранелуччи, в 2016 году Prusa представила собственную версию под названием Slic3r PE (Prusa Edition), которая была размещена на GitHub[29]. Благодаря группировке похожих настроек слайсер позволяет очень легко настраивать и сохранять различные профили. Например, пользователь может переключать профили нити накала, не влияя на настройки 3D принтера. А с более чем 110 готовыми профилями легко начать создавать свои собственные. Особенностью данного слайсера является то, что пользователь может не волноваться, какие профили с индивидуальными настройками он использовал в каком проекте, PrusaSlicer позволяет сохранить файл 3MF, в котором хранятся все объекты, настройки, модификаторы и их параметры.

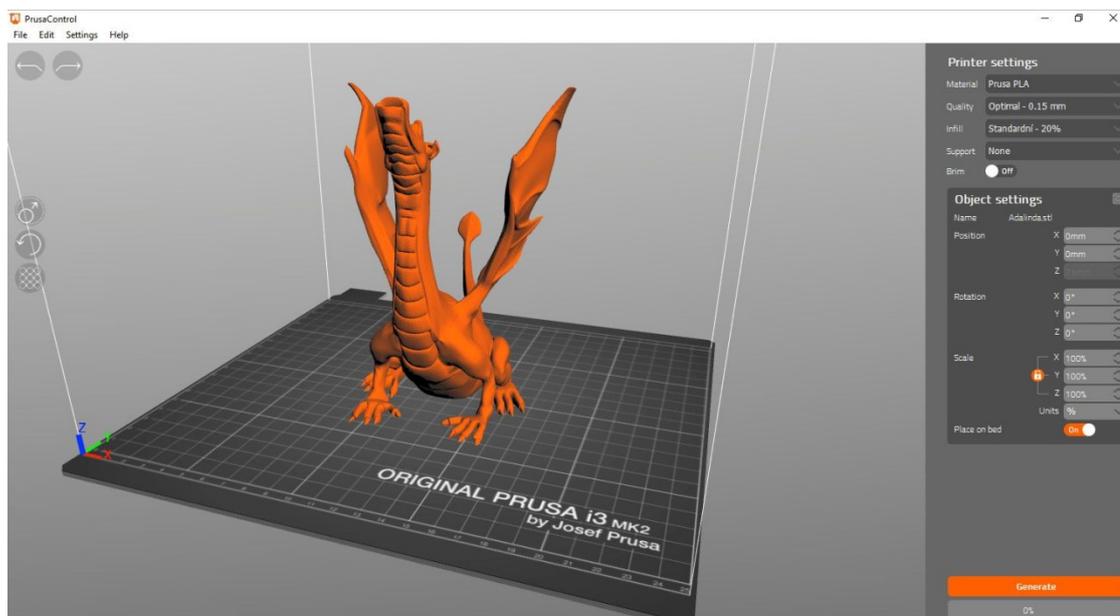


Рисунок 21 – Prusa slicer

Другие примечательные особенности: 55 – MSLA и поддержка функции нескольких материалов; – регулировка плавной переменной высота слоя; – пользовательские суппорты с использованием модифицирующих сеток; – возможность правки моделей через Netfabb (только в Windows); 14 языков. PrusaSlicer предлагает очень удобный GUI. Он включает использование многочисленных инструментов, которые удобно распределены по рабочей области экрана, а также имеет возможность использовать их при помощи хоткеев. Первый запуск программного продукта даст старт некоторого помощника для настройки программ, с помощью которого можно настроить начальные параметры для запуска печати, таких как ввод данных используемого устройства, а также используемого филамента.

## 2.14 Simplify3D

Simplify3D (рис.22) – это программный продукт, созданный для выполнения нарезки трехмерных моделей, чтобы произвести дальнейший процесс трехмерной печати. В ней реализованы все инструменты для управления 3D принтером и процессом трехмерной печати. Simplify3D дает возможность оптимизировать модель для 3D печати. В отличие от конкурентов данный программный продукт настолько оптимизирован, что процесс слайсинга да-

же тяжелых трехмерных моделей занимает считанные секунды. Данная программа имеет огромную базу существующих устройств трехмерной печати.

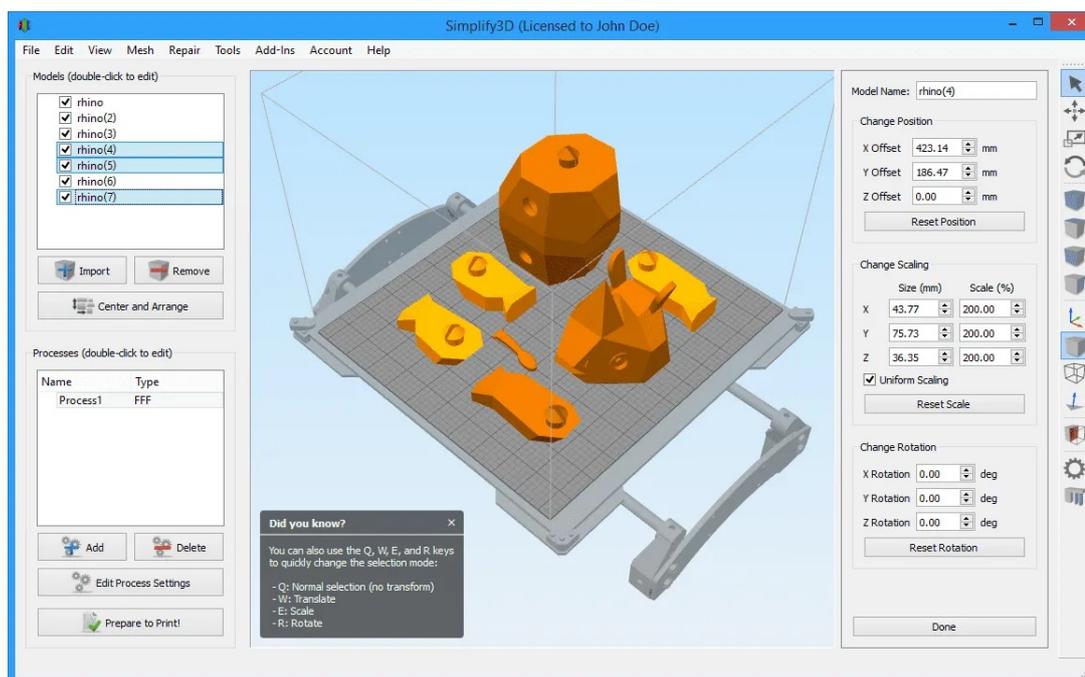


Рисунок 22 – Simplify 3D

Simplify3D доступен для Windows (XP и выше), Mac OS X (10.6 и выше) и Ubuntu Linux (12.10 и выше). Минимальные системные требования: Pentium 4 с 2 Гб RAM. Кроме быстрого слайсинга и поддержки большого количества 3D принтеров, есть и другие достоинства, которые рассмотрены ниже[30]. Одна из самых впечатляющих функций – это превью модели. Вы можете смоделировать весь процесс 3D печати или перейти к отдельному этапу. Можете отобразить только один слой или построить всю модель и показать ее слой за слоем. Simplify3D отображает перемещения печатающей головки. Если хотите, вы можете оценить скорость перемещения на разных участках. Так как вы можете проверить каждый этап 3D печати, это помогает выявить и устранить проблемы и оптимизировать процесс еще до его начала

## 2.15 ChiTuBox

ChiTuBox (рис.23) — слайсер для фотополимерных 3D-принтеров на основе технологий SLA, DLP и LCD. Версия 1.0 была выпущена в 2017 году китайской компанией CBD-Tech. Относительно молодая компания инженеров начала свою деятельность в 2013 году с разработки оборудования для

3Dпечати, в частности плат контроллеров, продаваемых под аббревиатурой ChiTu. CBD-Tech также занимается разработкой программного обеспечения. Одной из ее первых программ была ChiTu DLP Slicer. В конечном итоге оно было переименовано в официальное программное обеспечение для Anycubic Photon, которое почти идентично, за исключением названия и нескольких настроек. Еще одним дополнением к портфолио CBD является ChiTu Cloud, платформа 3D-печати для управления и мониторинга 3D-принтеров. ChiTuBox, пожалуй, самая популярная альтернатива проприетарным слайсерам. Он предлагает отличный контроль над настройками печати, сохраняя при этом простой и удобный интерфейс, поддержку Windows, Mac и Linux и совершенно бесплатно. Платная (Pro) версия в настоящее время находится в разработке. В настоящее время ChiTuBox официально поддерживает более 20 фотополимерных принтеров, включая Anycubic Photon, Phrozen Shuffle, WanHao D7 и D8, Sparkmaker и Elegoo Mars. Кстати, ChiTuBox поддерживает большое количество форматов экспорта, включая STL, ZIP и собственные форматы (\*.chitubox и \*.cbddlp). Слайсер ChiTuBox — это программа, предоставляющая пользователю множество инструментов. Как упоминалось ранее, он дает пользователю контроль над процессом печати, например, необычные настройки «Скорость подъема» — скорость, с которой платформа поднимается из резервуара между слоями, «Задержка выключения» — общее количество времени действия УФсвета. остается включенным. будет отключен между слоями, что позволит правильно сформировать новый слой. Одной из самых популярных функций ChiTuBox является возможность выдавливания импортированных моделей и прodelывания дренажных отверстий. Этот процесс очень распространен в 3D-принтерах SLA для экономии материала, поскольку фотоотверждаемые смолы довольно дороги. С помощью полого инструмента определяют общую толщину стенки и освобождают от материала внутренний материал модели. С другой стороны, дренажные отверстия позволяют смоле вытекать изнутри во время печати, оставляя только отвержденную оболочку модели. С помощью инструмента Dig Hole вы мо-

жете указать размер и вручную найти дренажные отверстия. Иногда полая часть может стать слишком хрупкой, или вам нужно запланировать определенную твердость отпечатка. ChiTuBox может генерировать шаблоны заполнения, очень похожие на то, что делают ползунки FDM. Это довольно необычная функция для слайсеров SLA. Здесь пользователь может выбрать процент заполнения и толщину стенки[31].

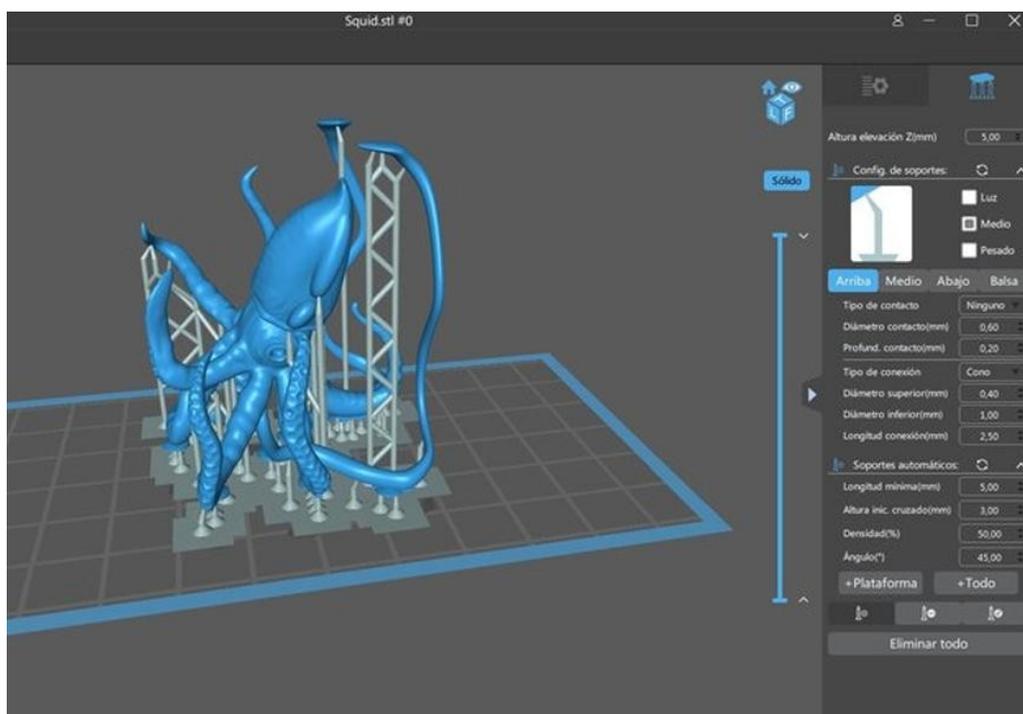


Рисунок 23 – ChiTuBox

## 2.16 Обоснование выбора слайсера

Среди рассмотренных слайсеров больше всего выделяется Ultimaker Cura, так как у программы есть ряд преимуществ: – русский язык и еще множество других языков разной степени локализации, на русский язык программа переведена полностью; – бесплатность. Полная бесплатность программы без каких-либо оговорок и ухищрений разработчиков; – множество полезных функций, позволяющих при должном ознакомлении, гибко управлять процессом трехмерной печати. Также багаж функций растёт с каждым обновлением, включая множество смелых и своеобразных функций, которых другие слайсеры не имеют. Ultimaker Cura имеет достаточно дружелюбный интерфейс и низкий порог вхождения для осуществления 3D-печать

## 3 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ

### 3.1 Алгоритм создания моделей

Принимая во внимание конструктивные особенности исследуемых объектов, для их физического макетирования можно использовать следующий алгоритм.

Во-первых, раннее произведенный анализ позволяет выделить ряд универсальных элементов:

- опорная подставка, состоящая из рельефного изображения Земли и ракетного пламени;
- блок сопел и стабилизаторов;
- блок баков первой и второй ступеней;
- головной обтекатель 1-го типа.

Во-вторых, помимо перечисленных элементов, образующих в совокупности макет корабля «Спутник», для модификации кораблей «Восток» и «Восход» необходимо дополнительно реализовать 3D-модели соответствующих им пилотируемых модулей.

В-третьих, для макета корабля «Союз» должен быть использован головной обтекатель 2-го типа, а также соответствующую модель пилотируемого модуля.

Таким образом, общая линейка моделируемых кораблей будет опираться на использование компьютерных моделей. Общее число компонентов – значительно меньше их физически реализуемых аналогов.

- «Спутник» – 5;
- «Восход» – 6;
- «Восток» – 6;
- «Союз» – 7.

### 3.2 Трехмерное компьютерное моделирование

Моделирование космических кораблей происходит при помощи примитивов, работа в основном будет проходить на уровне геометрии. Создание

примитивов полисеток обычно начинается путем добавления объектов в Объектном режиме. Некоторые свойства объекта, такие как размер, положение и ориентация в пространстве могут быть изменены в Объектном режиме. Так же объектный режим позволяет объединять и группировать несколько полисеток.

Для начала нам необходимо добавить примитив, если посмотреть на ракету, то можно выделить цилиндр, он подходит для этой работы больше всего (рис.24).

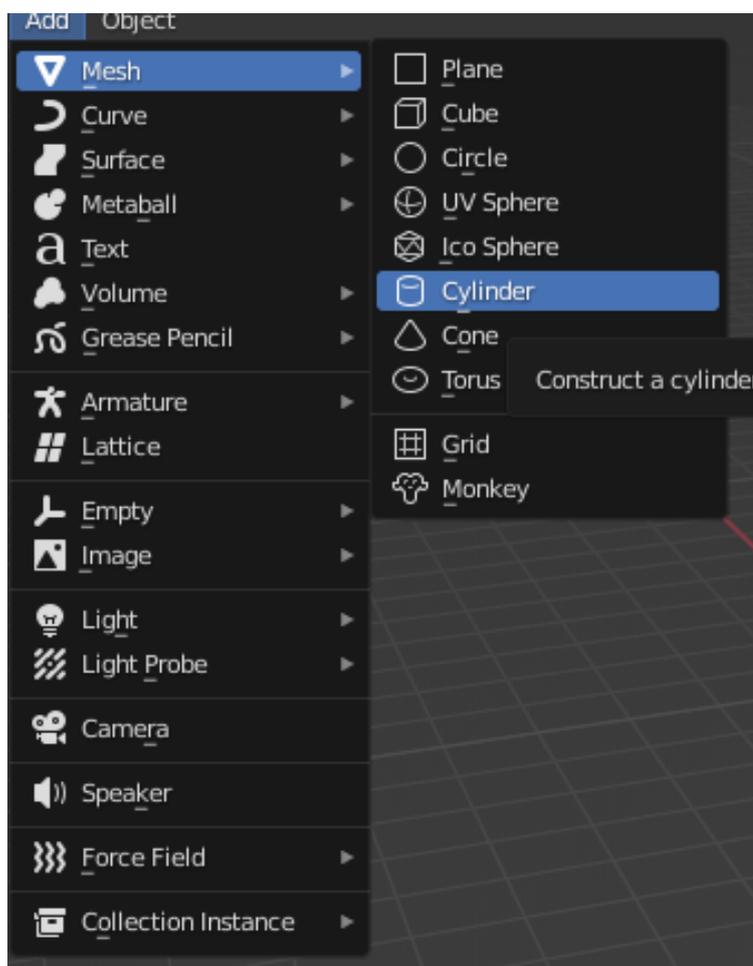


Рисунок 24 – Интерфейс Blender

После нажатия на цилиндр, он появится в вьюпорте (это видимая пользователю область веб-страницы, то, что может увидеть пользователь, не прибегая к прокрутке) и по стандарту будет включен объектный режим, который изображен на рисунке 25. После того как он появился с ним можно производить различные манипуляции: передвигать, поворачивать, масштабировать.

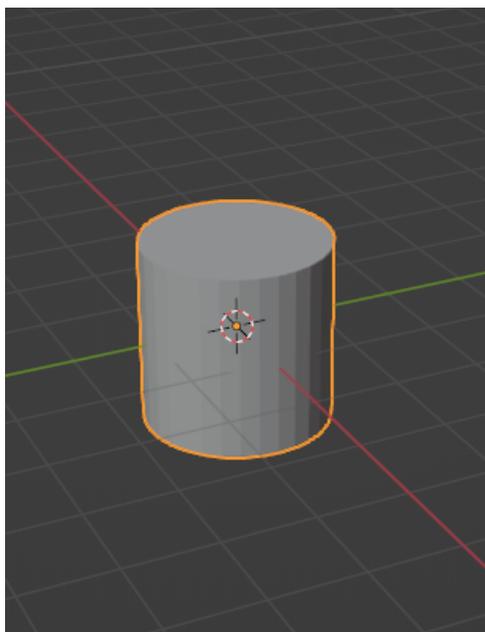


Рисунок 25 – Цилиндрическая заготовка

Одного цилиндра будет недостаточно и придется создать массив цилиндров и уже с ними производить детальное моделирование (рис. 26).

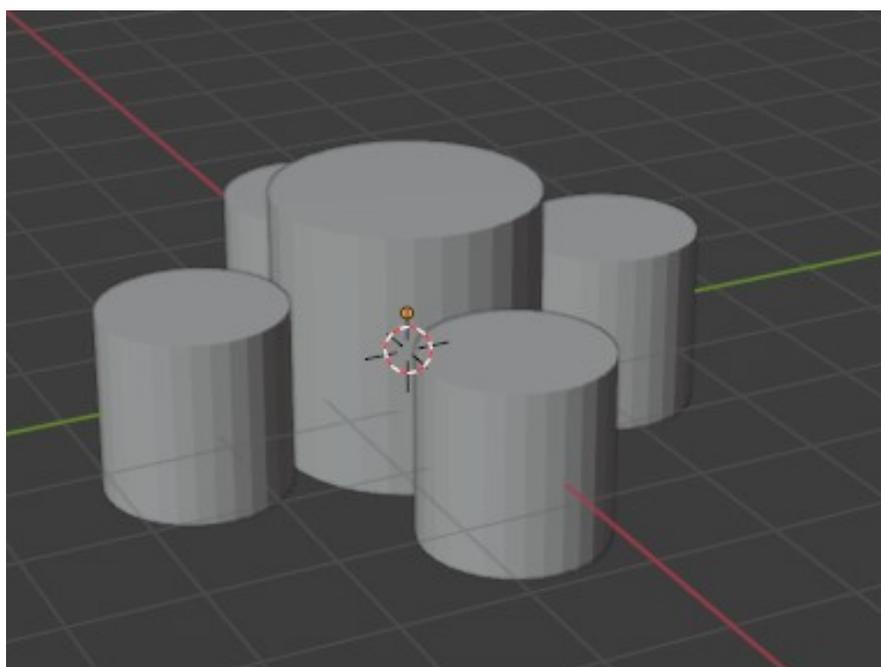


Рисунок 26 – Группа цилиндров

Более детальное редактирование полисетки модели происходит в Режиме редактирования. В этом режиме можно работать с отдельными вершинами. Базовые трансформации (перемещение, вращение, масштабирование) в режиме редактирования работают аналогично объектному. Однако здесь операции применяются по отношению к вершинам, ребрам и граням. Опера-

ции в этом режиме затрагивают только геометрию объекта, но не глобальные свойства, например, местоположение или вращение в пространстве. Промежуточный этап, базовая модель, изображенная на рисунке 27.

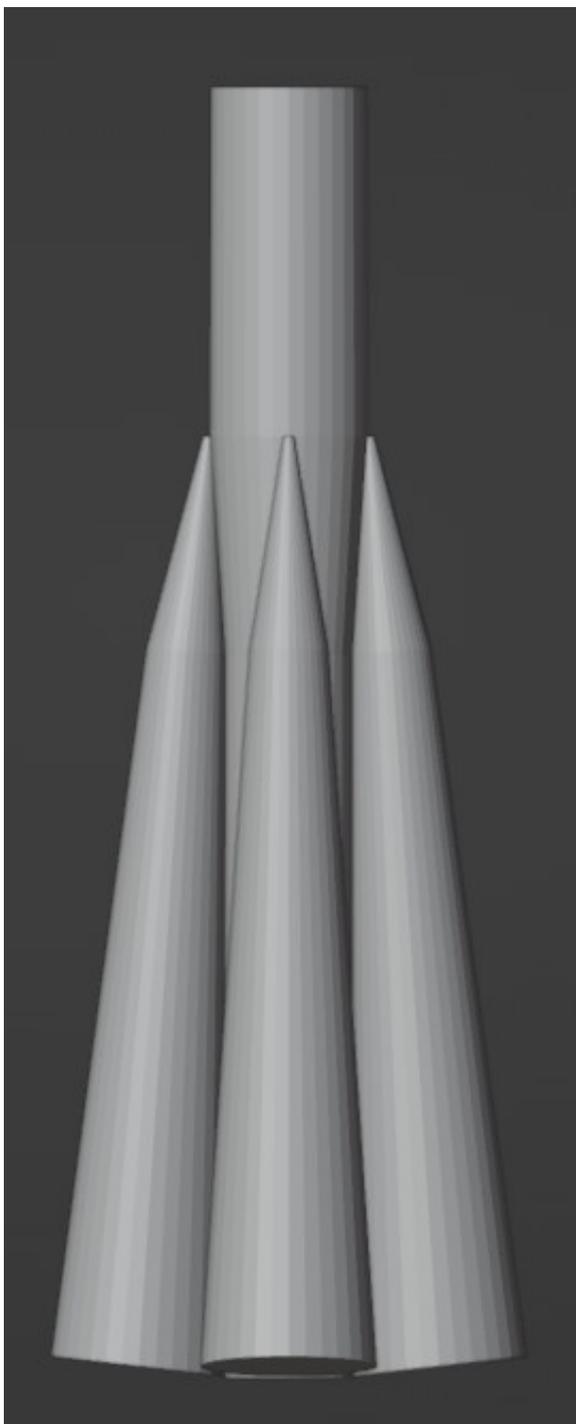


Рисунок 27 – Базовая модель

После создания базовой модели происходит этап детализации, в котором отражаются подробности каждой из ракет. Детализированная модель ракеты «Восток» представлена на рисунке 28.

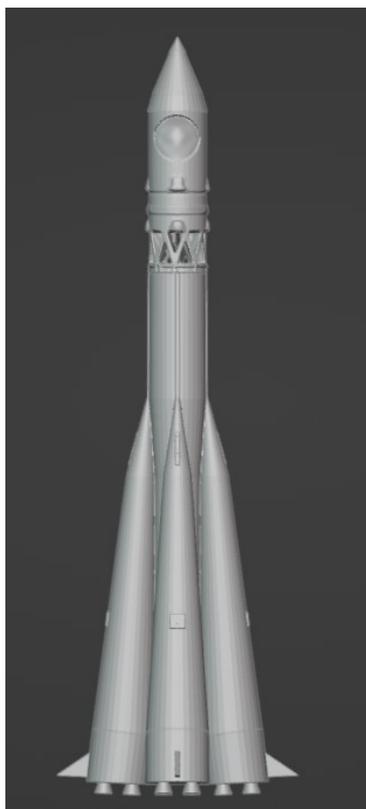


Рисунок 28 – Детализированная модель ракеты «Восток», вид спереди

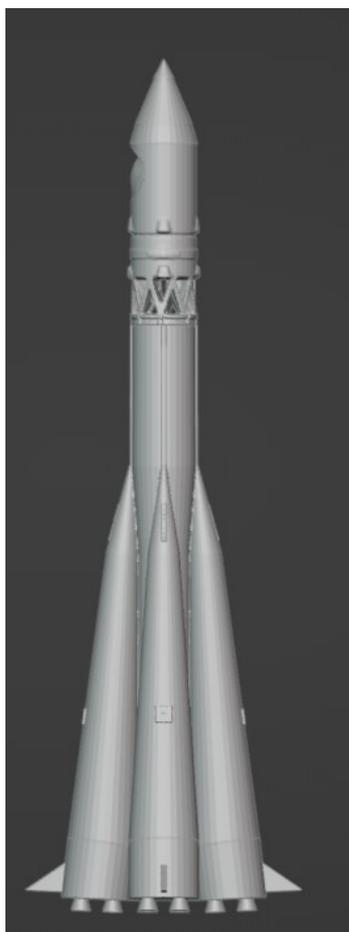


Рисунок 29 – Детализированная модель ракеты «Восток», вид сбоку

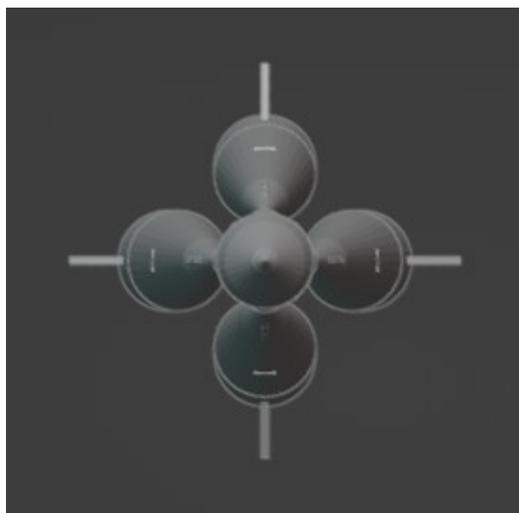


Рисунок 30 – Детализированная модель ракеты «Восток», вид сверху

Моделирование подставки происходило при помощи режима скульптинг (это разновидность компьютерного 3Dмоделирования объектов из виртуального материала, напоминающего глину, путем его растягивания, сжатия, разглаживания и других манипуляций. Он позволяет создавать высокополигональные (до сотен миллионов полигонов) трехмерные модели с высоким уровнем детализации.). Например, деталь огня, которая была создана для соединения ракеты и подставки была сделана при помощи комбинированной техники режима редактирования и скульптинга, представлена на рисунке 31.



Рисунок 31 – Подставка в виде струи пламени

При моделировании подставки пришлось обращаться к топографическим картам амурской области, для того чтобы передать правильный рельеф. Подставка показана на рисунке 32.

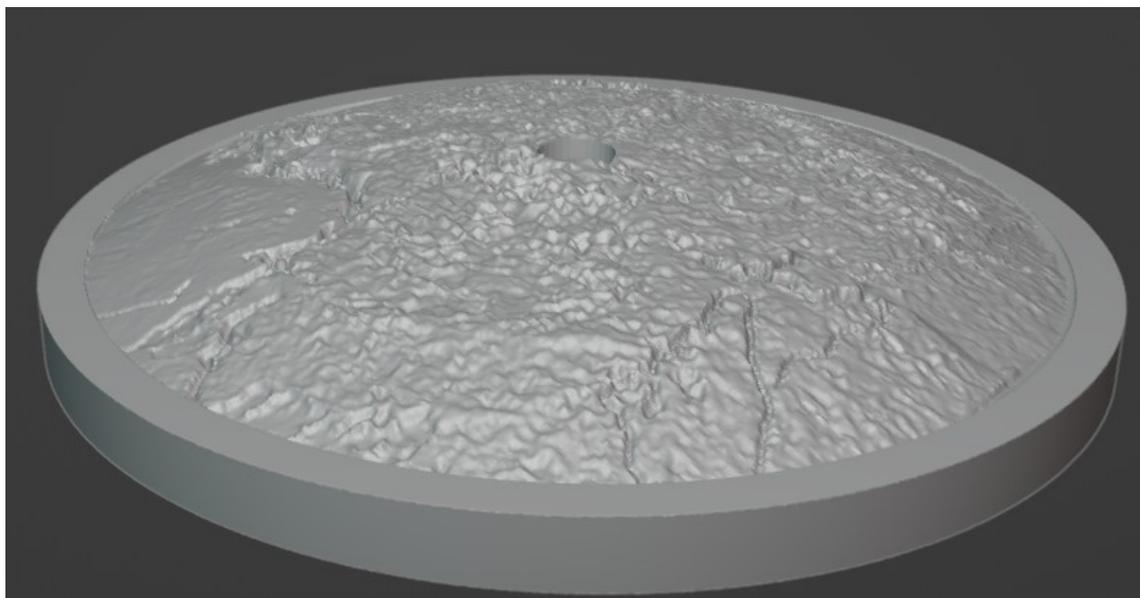


Рисунок 32 – Рельефная подставка, изометрический вид

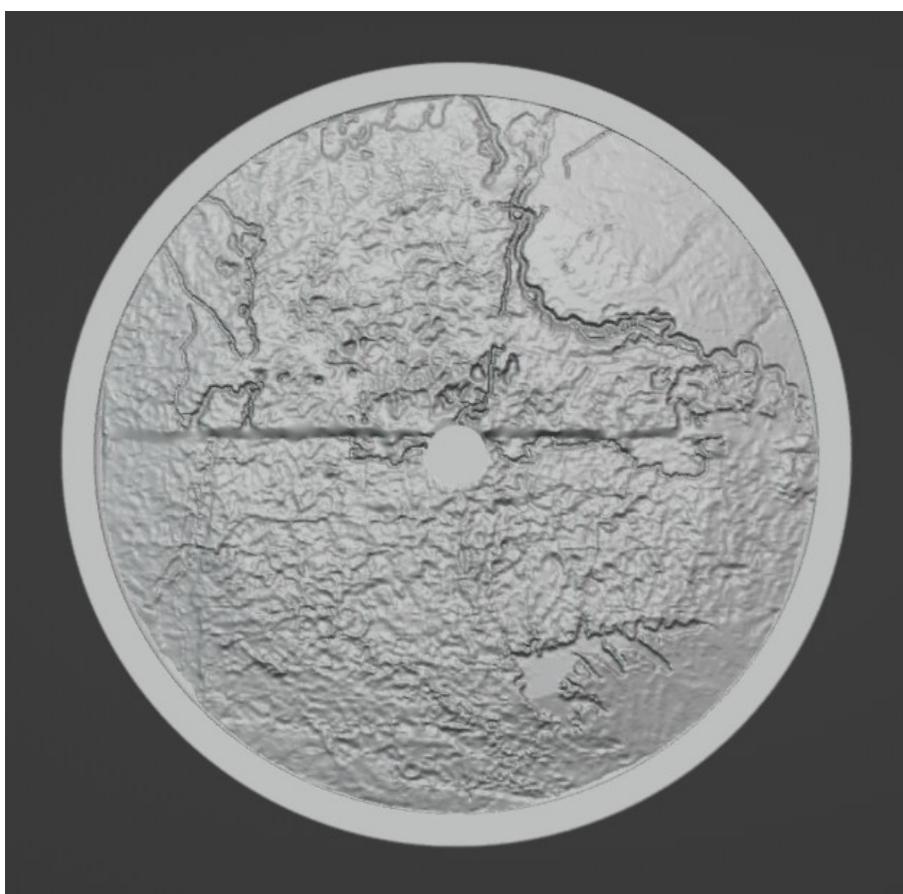


Рисунок 33 – Рельефная подставка, вид сверху

В конечном итоге мы имеем разбитую ракету на несколько объектов, (это сделано для того, чтобы было проще моделировать объект). На рисунках ниже представлены все части каждой из ракет отдельно.

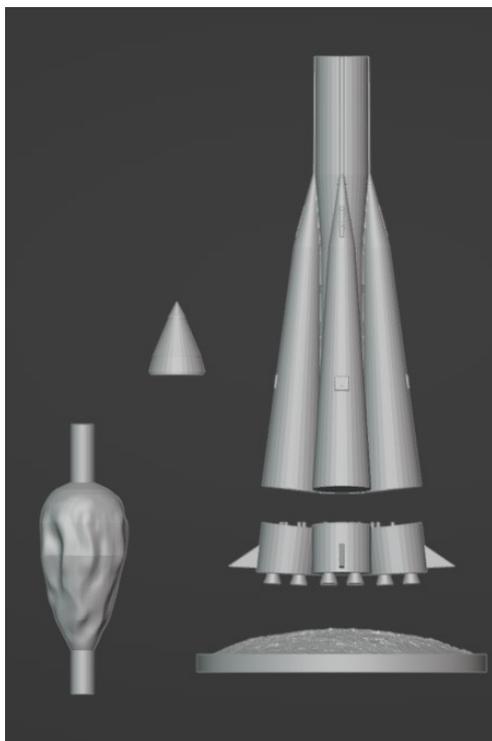


Рисунок 34 – Части ракеты «Спутник»

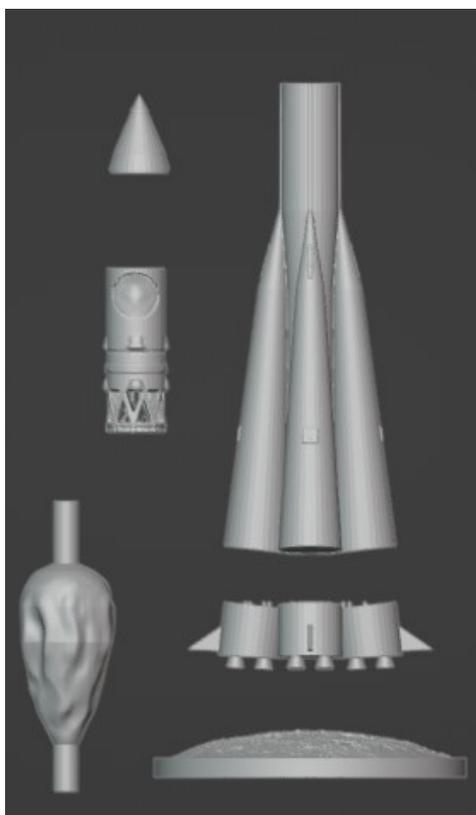


Рисунок 35 – Части ракеты «Восход»

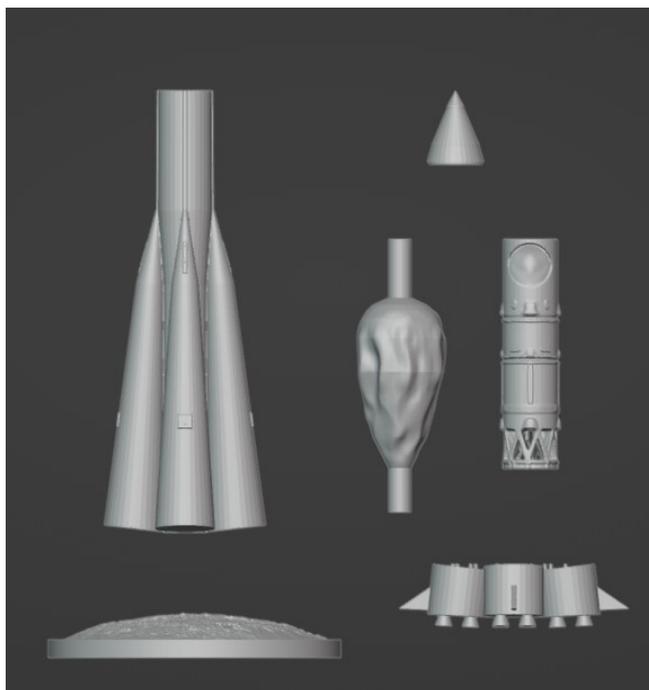


Рисунок 36 – Части ракеты «Восток»

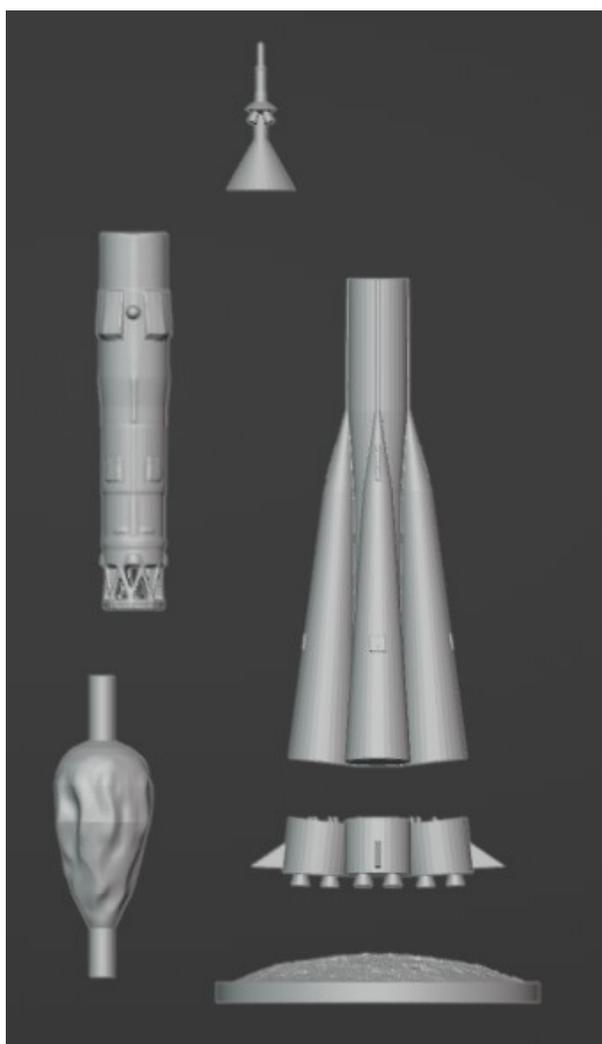


Рисунок 37 – Части ракеты «Союз»

По принципу описанному выше были выполнены остальные модели ракет королевской серии и представлены на рисунке 38.

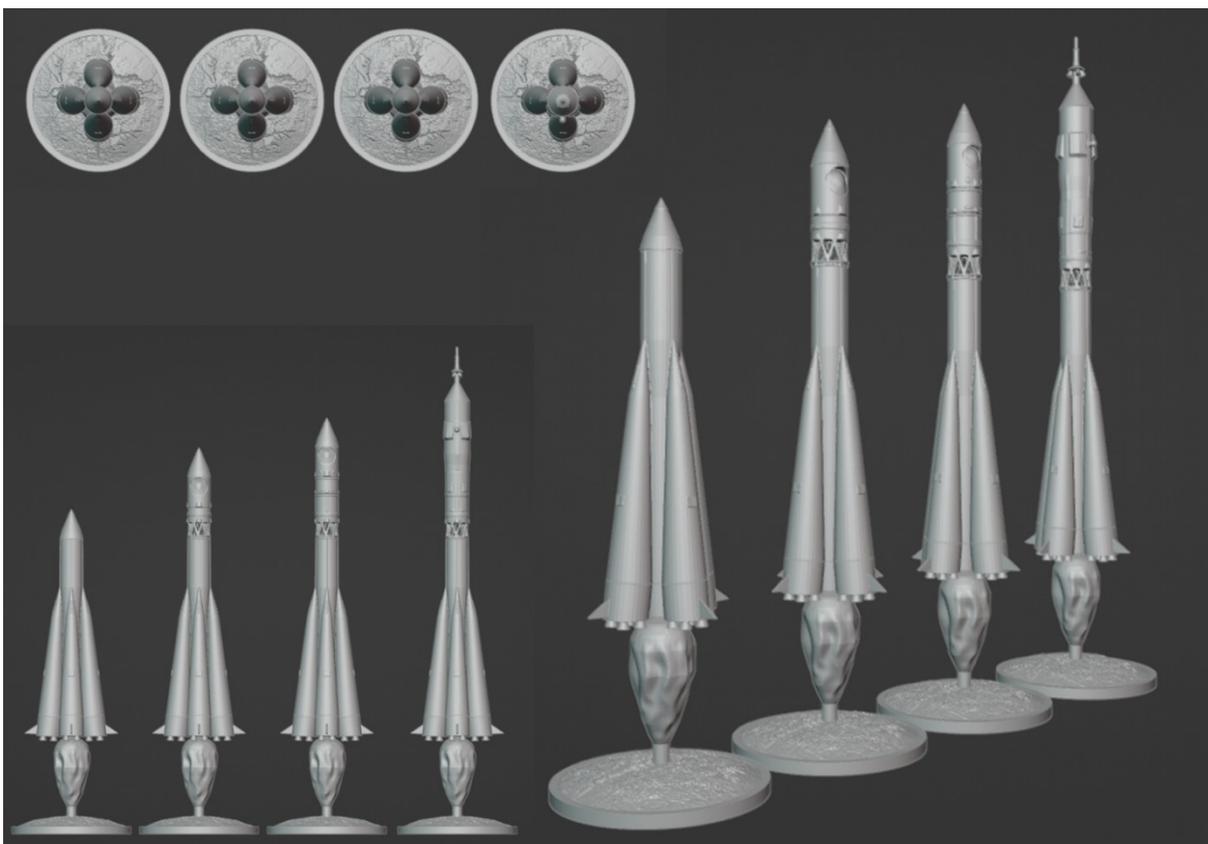


Рисунок 38 – Набор из четырех моделей ракет

### 3.3 Практическая 3D-печать

Для 3D-печати был использован принтер – 3D Systems CubePro Trio.

В таблице 1 представлены характеристики устройства.

Таблица 1 – Технические характеристики 3D-принтера

Название характеристики	Значение
Модель	CubePro Trio
Технология 3D-печати	FDM
Область печати	185×273×241 мм
Скорость печати	15 мм <sup>3</sup> /сек
Количество печатающих головок	3
Толщина слоя	75 мкм
Точность позиционирования по оси XY	0,02 мм
Точность позиционирования по оси Z	0,1 мм

Название характеристики	Значение
Диаметр сопла	0,4 мм
Диаметр нити	1,75 мм
Температура экструдера	До 280 °С
Поддерживаемые материалы	ABS, Nylon, PLA
Напряжение питания	110-220 В
Потребляемая мощность	до 300 Вт
Размеры принтера	578×578×591
Вес принтера	38,5 кг

Принцип формирования фигуры с трехмерной печати называют аддитивным (от слова Add (англ.) – добавлять). Для начала создается компьютерная модель будущего объекта. Это можно сделать либо с помощью трехмерного графического редактора САD-системы (3D StudioMax, blender), либо просканировав полностью объект в 3D-пространстве. Затем, с помощью специального программного продукта разбивает просканированный объект на слои и происходит генерация набора команд, которая определит последовательность, в которой будут наноситься слои материала при печати. Далее, 3D принтер послойно формирует объект, нанося постепенно порции материала. Располагая печатающую головку в системе двух координат X и Y, принтер наносит материал слой за слоем по смоделированной электронной схеме. При перемещении платформы на шаг вдоль оси Z начинается построение нового уровня объекта.

Для того чтобы произвести печать физической модели необходим пластик. На данный момент существует большое количество видов пластика, как под конкретную задачу, так и универсальные. Рассмотрим некоторые виды пластика для трехмерной печати:

- акрилонитрилбутадиенстирол (ABS);
- полилактид (PLA);

- поливиниловый спирт (PVA);
- поликарбонат (PC);
- имитаторы (древесины, металлов, песчаника).

Для печати был выбран полилактид PLA, потому что этот пластик – неприхотливый в эксплуатации материал, отлично подходящий для печати крупногабаритных и мологабаритных изделий, а также деталей, для которых важно досконально передать геометрические размеры. В отличие от вида пластика ABS, PLA не требует специальных условий для работы с ним. Нет необходимости в подогреваемом столе или термостабилизационной камере. Кроме того, PLA пластик не имеет неприятного запаха, что позволяет использовать его в условиях дома, офиса или учебного заведения. Так же не маловажный факт, что изделия из него отличаются стойкостью к механическим повреждениям, влаге, маслам, кислотам. Легко поддаются постобработке: шлифовке, сверлению, окраске.

Для 3D-печати необходимо несколько вспомогательных инструментов. Очевидно, что у нас есть 3D-модель и 3D-принтер, но между этими двумя пунктами есть еще один важный элемент головоломки. Программное обеспечение для 3D-печати выступает в качестве посредника между 3D-моделью и принтером. Слайсер для 3D-печати подготавливает 3D-модель для 3D-принтера путем генерации G-кода.

В данном исследовании был выбран слайсер Cura 3D – программа с дружелюбным пользовательским интерфейсом, до такой степени дружелюбным, что многие и не подозревают, что именно она делает. Использовать этот слайсер довольно просто, нужно загрузить модель, выбрать качество печати и нажать на кнопку.

Cura переводит 3D-файлы STL или OBJ в формат, который понимает и обрабатывает принтер и нарезает их на слои. Пример представления 3D-модели в понятном для принтера формате в виде слоев, изображен на рисунке 39. Технология такой печати называется FFF (Fused filament fabrication – наплавление расплавленной нити).

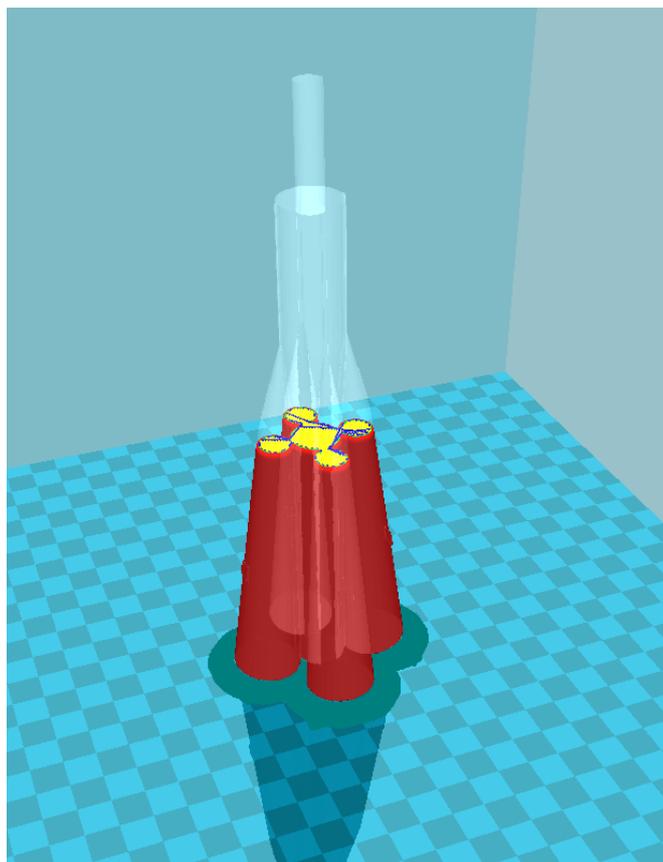


Рисунок 39 – Цифровой прототип космического корабля

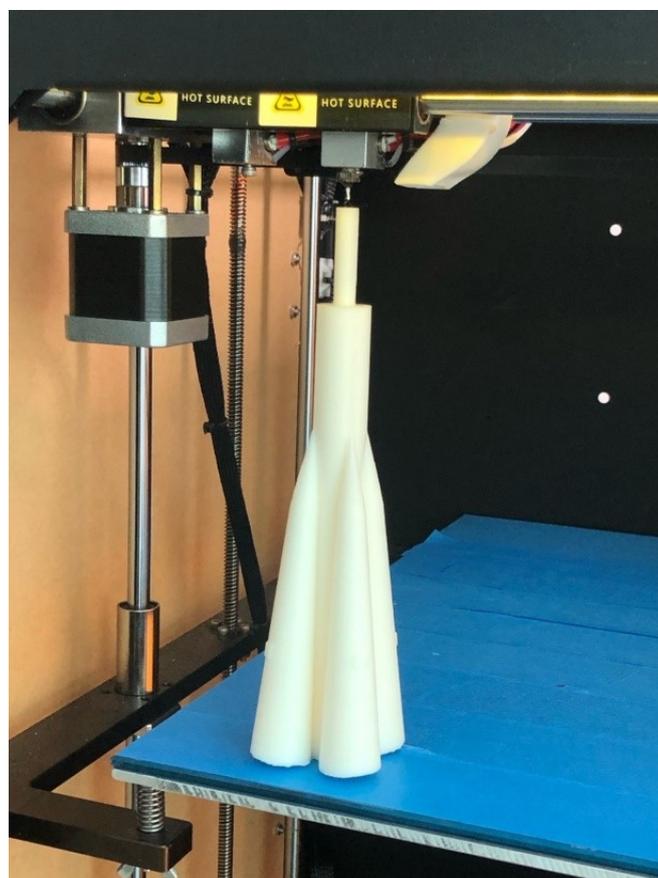


Рисунок 40 – Физический прототип космического корабля

После конвертирования всех 3D-моделей в формат пригодный для печати каждую из моделей отдельно по частям печатаем в физическую форму. Универсальные части печатаем в нескольких экземплярах. Конкретные модули в единственном экземпляре.

Для разных частей используем пластик своего цвета.

- пламя – оранжевый цвет;
- рельефная подставка – зеленый цвет;
- части ракеты – белый цвет.

После печати мы получаем набор из 6 частей, которые собираются одна в другую последовательно, от низа к верху.

Сборный набор ракеты союз представлен на рисунке 41.

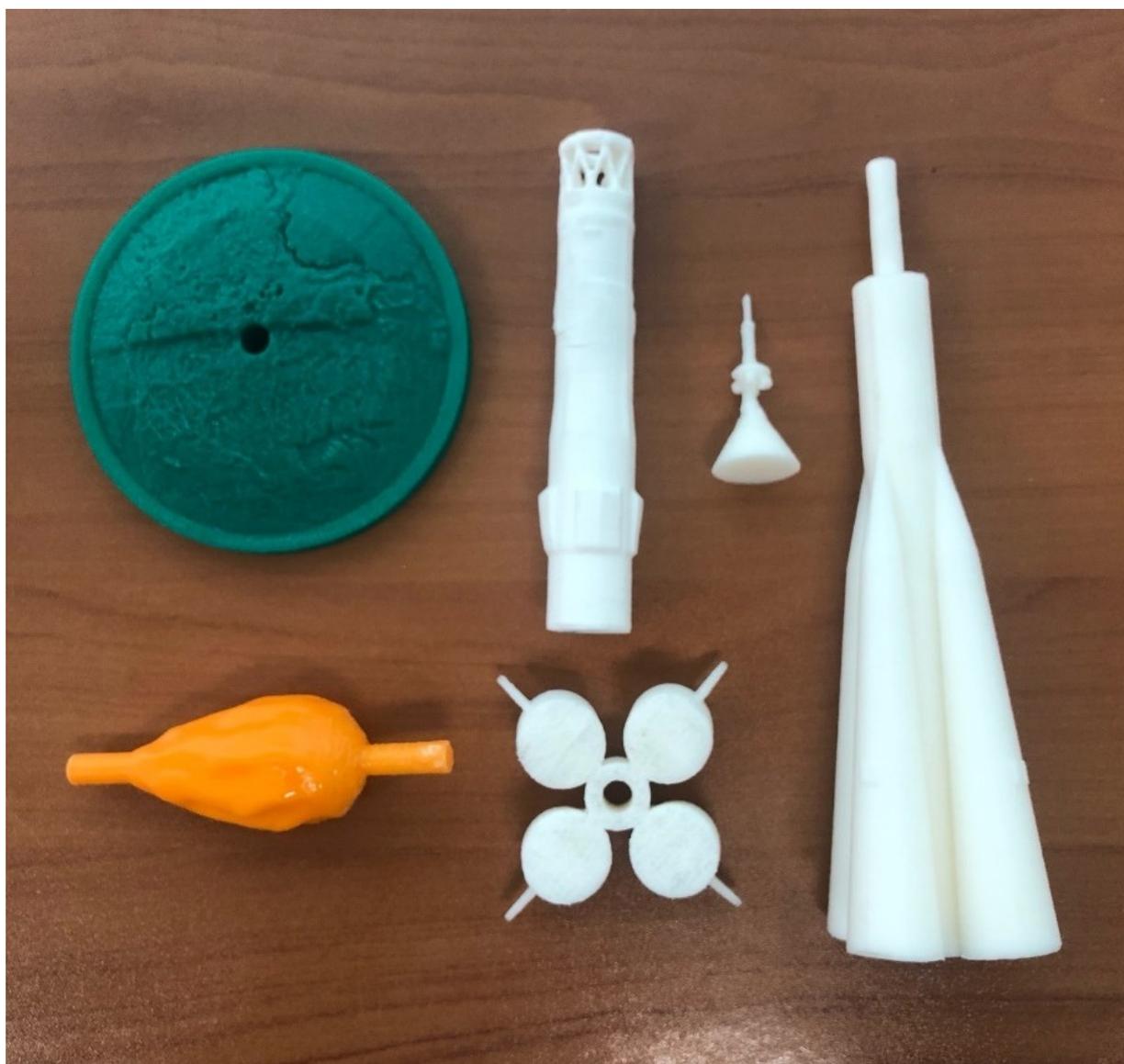


Рисунок 41 – Набор частей ракеты Союз



Рисунок 42 – Финальный набор космических кораблей

### 3.4 Оценка общей рентабельности проекта

Далее необходимо рассчитать себестоимость полного набора ракет с целью определения рентабельности создания макетов в описанном формате.

Для оценки себестоимости набора ракет, выделим следующие критерии, влияющие на цену:

- стоимость материалов;
- стоимость электроэнергии, затраченных на изготовление партии из четырех ракет.

Пластик для выплавления фасуется бобинами массой один килограмм.

Для изготовления моделей требуется пластик из трёх видов цветов: белого, зеленого и оранжевого. Стоимость пластика белого цвета – 1298 р/кг, зеленого и оранжевого 1188 р/кг.

Для оценки затраченной электроэнергии сложим время на изготовление всех деталей. На рисунках 43-50 представлены детали ракет с временными затратами на их изготовление, а также их весовые характеристики.

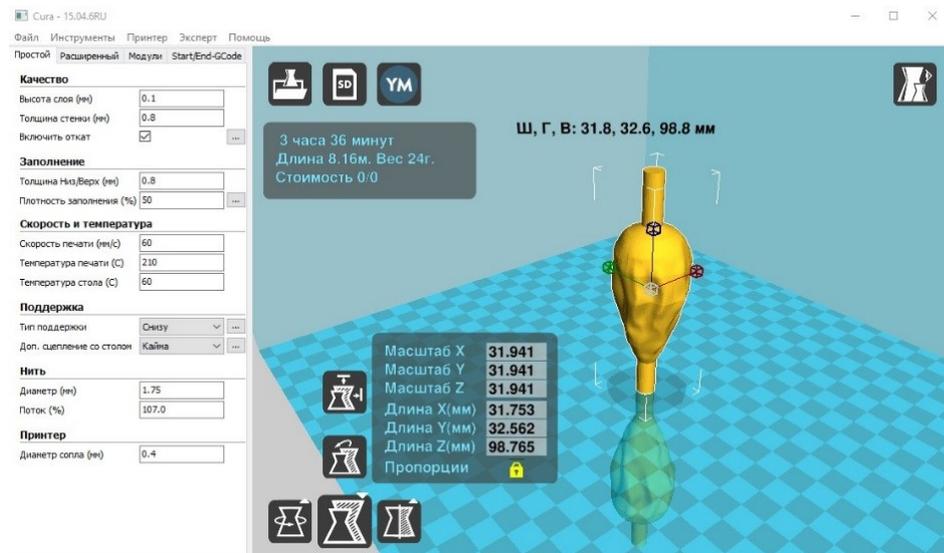


Рисунок 43 – Характеристики части подставки – ракетное пламя

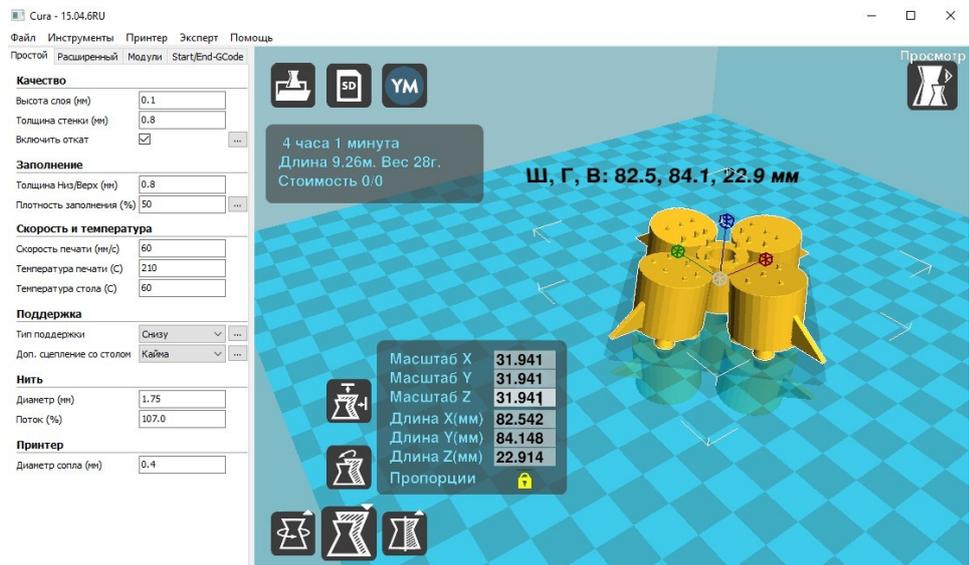


Рисунок 44 – Характеристики блока сопел и стабилизаторов

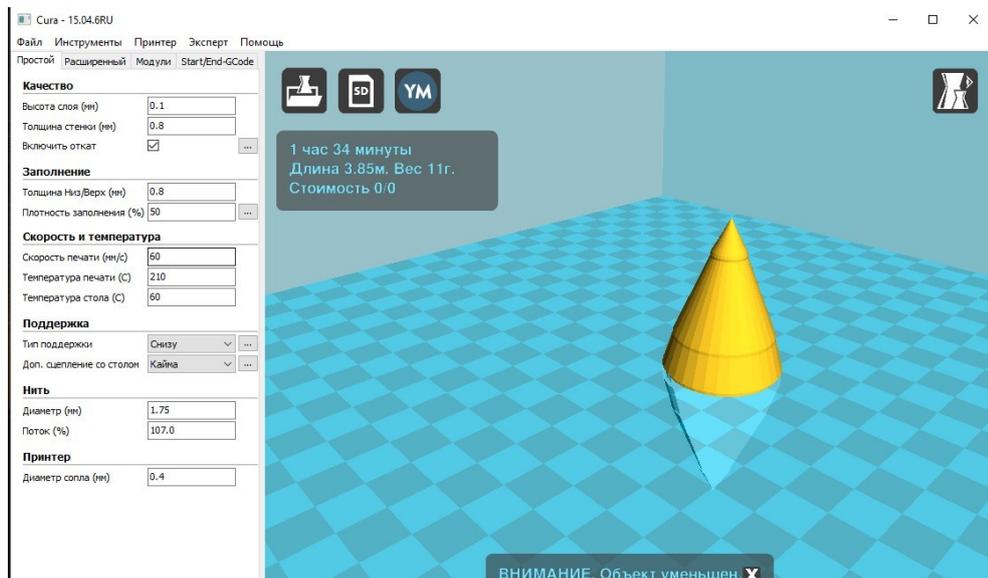


Рисунок 45 – Характеристики головного обтекателя 1-го типа

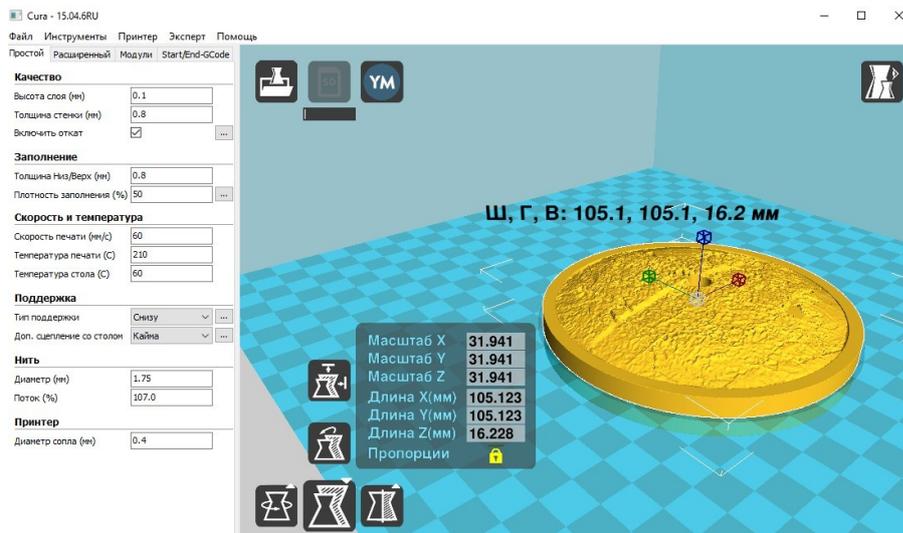


Рисунок 46 – Характеристики части подставки – рельефное изображение  
ЗЕМЛИ

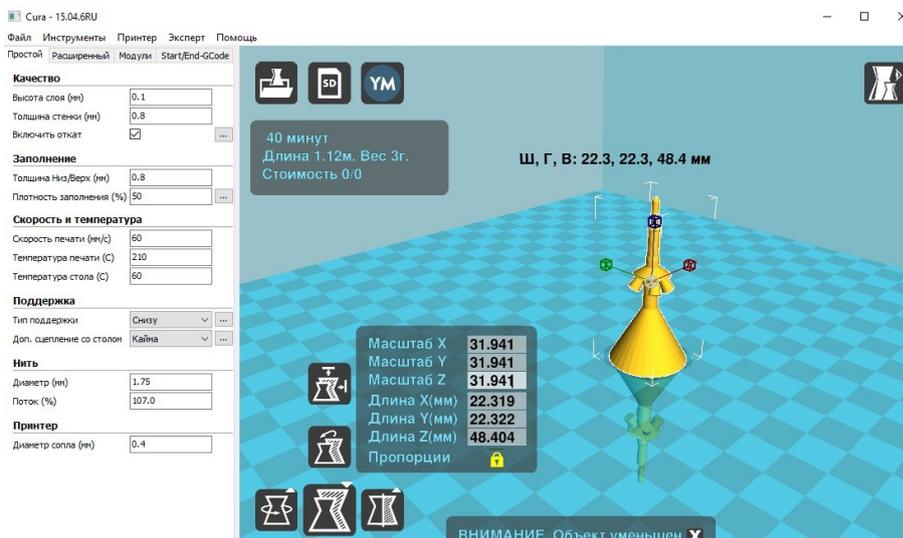


Рисунок 47 – Характеристики головного обтекателя 2-го типа

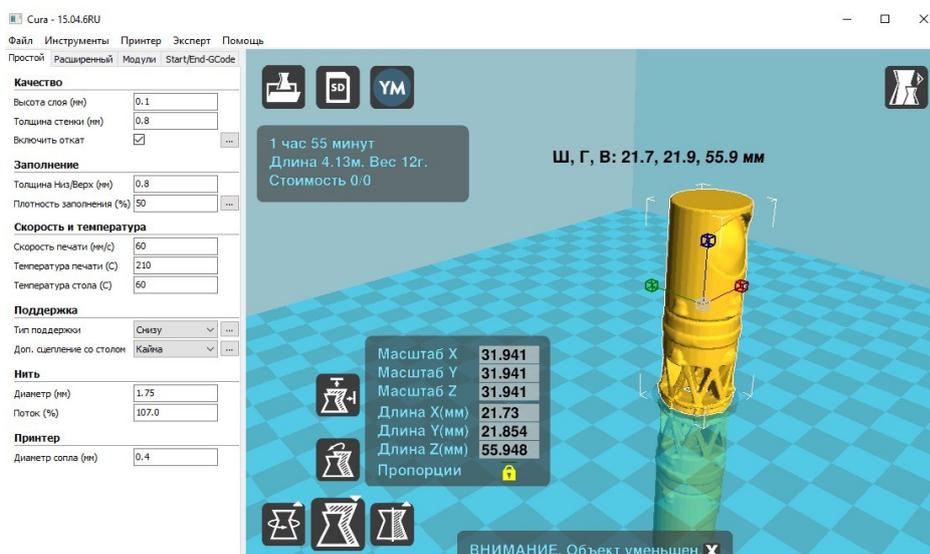


Рисунок 48 – Характеристики пилотируемого модуля корабля «Восход»

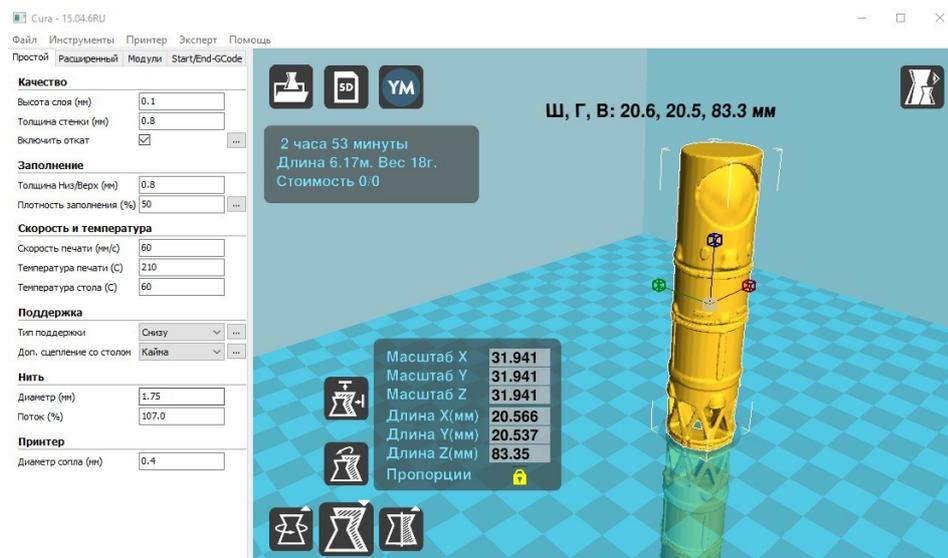


Рисунок 49 – Характеристики пилотируемого модуля корабля «Восток»

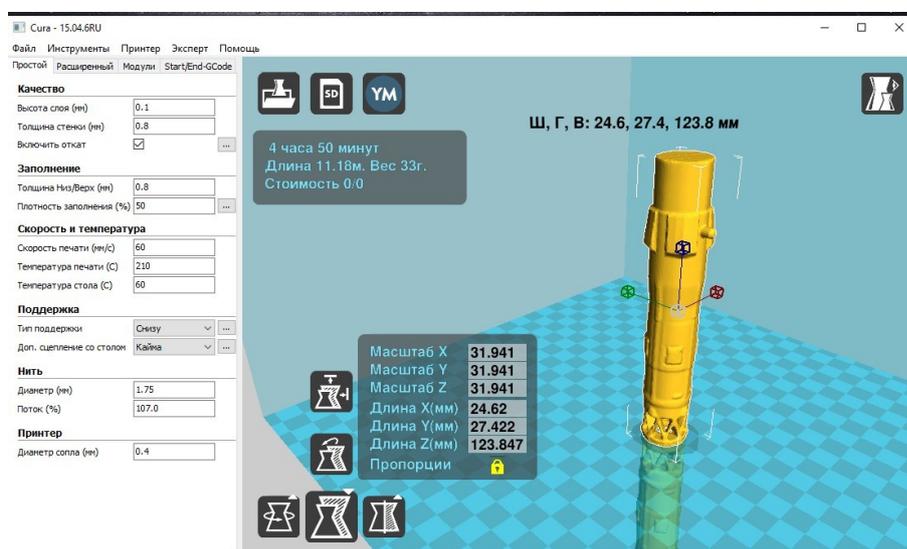


Рисунок 50 – Характеристики пилотируемого модуля корабля «Союз»

Перечислим модули и суммарно затраченное время на их изготовление.

- блок баков 1-й и 2-й ступеней (4 шт.) – 49 ч 28 мин;
- ракетное пламя (4 шт.) – 14 ч 24 мин;
- блок сопел и стабилизаторов (4 шт.) – 16 ч 4 мин;
- головной обтекатель 1-го типа (3 шт.) – 4 ч 42 мин;
- рельефное изображение земли (4 шт.) – 16 ч 16 мин;
- головной обтекатель 2-го типа (1 шт.) – 40 мин;
- пилотируемый модуль корабля «Восход» (1 шт.) – 1 ч 55 мин;
- пилотируемый модуль корабля «Восток» (1 шт.) – 2 ч 53 мин;
- пилотируемый модуль корабля «Союз» (1 шт.) – 4 ч 50 мин.

Суммарное время на изготовление всех деталей – 111 ч 12 мин.

При средней потребляемой мощности принтера в 250 Вт получим, что общая затраченная мощность будет равна 27,8 кВт. Возьмем цену одного кВт/ч средней по городу на 2023 г равной 3,2 руб. Перемножив затраченную мощность на цену, получим, что общие затраты электроэнергии равняются 89 рублям.

Далее необходимо рассчитать затраты материалов на изготовление набора моделей.

На основе характеристик, представленных выше, посчитаем затраты пластика определенного цвета.

- блок баков 1-й и 2-й ступеней (4 шт.) – 356 г белого цвета;
- ракетное пламя (4 шт.) – 96 г оранжевого цвета;
- блок сопел и стабилизаторов (4 шт.) – 112 г белого цвета;
- головной обтекатель 1-го типа (3 шт.) – 33 г белого цвета;
- рельефное изображение земли (4 шт.) – 100 г зеленого цвета;
- головной обтекатель 2-го типа (1 шт.) – 3 г белого цвета;
- пилотируемый модуль корабля «Восход» (1 шт.) – 12 г белого цвета;
- пилотируемый модуль корабля «Восток» (1 шт.) – 18 г белого цвета;
- пилотируемый модуль корабля «Союз» (1 шт.) – 33 г белого цвета.

Суммарно было затрачено: 567 г пластика белого цвета, 100 г пластика зеленого цвета и 96 г пластика оранжевого цвета. Умножив полученные массы на стоимость материала, получим, что стоимость пластика белого цвета – 736 руб, зеленого – 119 руб, оранжевого – 114 руб. Итоговая стоимость материала равна – 1014 руб.

Итоговая стоимость изготовления набора моделей равна 1103 руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогресс в развитии материалов и технологий позволяет искать новые более эффективные способы моделирования, проектирования и создания объектов реального мира. Цифровой подход к моделированию ускоряет разработку, позволяет оперативно вносить изменения в проект, масштабировать и дорабатывать их. В целом изменяя подход процессов создания макетов.

В рамках данной научно-исследовательской работы была достигнута поставленная цель, выполнены все задачи в полном объеме. Был произведен анализ текущего состояния области моделирования ракет, рассмотрены существующие варианты моделей, выявлены их преимущества и недостатки. Далее рассмотрены существующие программные и аппаратные средства для моделирования и создания объектов в пластике. Была спроектирована 3D-модель в редакторе, на основе которой с помощью принтера были распечатаны физические модели.

Полученные модели ракет королевской серии являются точными уменьшенными в масштабе копиями существовавших ракетоносителей. Полученные модели можно использовать в процессе обучения, научной деятельности, а также для продвижения военно-патриотической тематики.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1 К.Э. Циолковский. Труды по ракетной технике. – М.: Либроком, 2010. – 350 с.
- 2 История развития отечественной космонавтики [Электронный ресурс : офиц. сайт. – Режим доступа: <https://pandia.ru/text/77/272/58755.php> – 22.05.23
- 3 История развития отечественной космонавтики [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://kakizobreli.ru/istoriya-razvitiya-otechestvennoj-kosmonavtiki/> – 10.04.23
- 4 Шаталов, В. А. Космонавты СССР / В. А. Шаталов, М. Ф. Ребров. – 4-е изд, доп. – Москва : Просвещение, 1987. – 383 с., [16] л. ил. : ил.
- 5 Ярослав Голованов. Королев. Хроника. – М.: Молодая гвардия, 1973. – 256 с.
- 6 Черток Б.Е Книга 4. Ракеты и люди. Лунная гонка : Машиностроение, 1999 – 575 с.
- 7 Ракеты Королевской серии [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://www.bostonkrugozor.com/show/rakets.2563.html> – 17.04.23
- 8 Космонавтика. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1970. – 592 с.
- 9 Страницы советской космонавтики. – М.: Машиностроение, 1975. – 352 с
- 10 История развития отечественной космонавтики [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://mks-onlain.ru/istoriya-razvitiya-otechestvennoy-kosmonavtiki-kratko-samoye-glavnoye-astronomiya-doklad/> – 10.04.23
- 11 Черток Б.Е Книга 4. Ракеты и люди. Лунная гонка : Машиностроение, 1999 – 575 с.
- 12 Ракета-носитель «Р-7» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/206926/> – 10.05.23

13 Ракета-носитель «Восток» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/29990/> – 12.05.23

14 Ракета-носитель «Восход» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим до-ступа: <https://www.roscosmos.ru/462/> – 12.05.23

15 Ракета-носитель «Союз» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим до-ступа: <https://www.roscosmos.ru/35248/> – 13.05.23

16 Википедия [Электронный ресурс] : Blender. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Blender>. – 24.05.2021.

17 Технология трехмерного моделирования в Blender 3d : учебное пособие / А. А. Кузьменко, А. Д. Гладченков, Л. Б. Филиппова [и др.]. – Москва : ФЛИНТА, 2018. – 79 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/113463> (дата обращения: 12.04.2021).

18 Технология трехмерного моделирования и текстурирования объектов в Blender 3d и 3d Max : учебное пособие / А. А. Кузьменко, А. Д. Гладченков, В. А. Шкаберин [и др.]. – Москва : ФЛИНТА, 2019. – 142 с. – ISBN 978-5-9765-4216-7. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/125515> (дата обращения: 11.04.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

19 Горелик, А.В. Самоучитель 3Ds Max 2020: учебное пособие / А.В. Горелик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. – 544 с.

20 Ключко, Д.В. Макетирование и трехмерное компьютерное моделирование деталей и узлов верхнего строения многоцелевых гусеничных и колесных машин: учебное пособие / Д.В. Ключко. – Минск: Инфра–М, 2015. – 349 с.

21 Альба, Р. ZBrush для начинающих: учебное пособие / Р. Альба, М. Хоссейн. – Москва: ДМК Пресс, 2021. – 873 с.

22 Келлер, Э. Введение в ZBrush 4: учебное пособие / Э. Келлер. – Москва: ДМК Пресс, 2018. – 754 с.

23 Королев.А.Л Компьютерное моделирование. Лабораторный практикум. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015. – 296 с.

24 Лабораторный практикум по курсу «3D-моделирование и прототипирование изделий»: учеб.-метод. пособие / А. Н. Сергеев [и др.]. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – 162 с.

25 Горьков, Д.В. 3D-печать с нуля: учебное пособие / Д.В. Горьков. – СПб.: Издательский Дом СПбГУ, 2005. - 400 с.

26 Холмогоров, В.К. 3D-печать с нуля / В.К. Холмогоров., Горьков Д.А. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2020. – 256 с.

27 Никонов В. В. Компас-3D: создание моделей и 3D печать / В. В. Никонов. – Питер. : Наука, 2010. – 208 с.

28 Меженин, А. В. Технологии разработки 3D-моделей : учебное пособие / А. В. Меженин. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2018. – 100 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/136470> (дата обращения: 22.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

29 Обзор Prusa Slicer [Электронный ресурс] // 3dradar. – Режим доступа: <https://3dradar.ru/post/47992/> - 05.04.2022

30 Обзор Simplify3D: лучшая программа для слайсинга? [Электронный ресурс] // 3D Print Story. – Режим доступа: <https://3dprintstory.org/obzor-simple3d-luchshaya-programma-dlya-slaisinga/>. – 05.05.2022

31 Обзор слайсера ChiTuBox для 3D печати [Электронный ресурс] // 3DMall. – Режим доступа: <https://3d-m.ru/obzor-slajsera-chitubox-dlya-3d-pechati/>. – 06.05.2022.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Альба, Р. ZBrush для начинающих: учебное пособие / Р. Альба, М. Хоссейн. – Москва: ДМК Пресс, 2021. – 873 с.
- 2 Википедия [Электронный ресурс] : Blender. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Blender>. – 24.05.2021.
- 3 Горелик, А.В. Самоучитель 3Ds Max 2020: учебное пособие / А.В. Горелик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. – 544 с.
- 4 Горьков, Д.В. 3D-печать с нуля: учебное пособие / Д.В. Горьков. – СПб.: Издательский Дом СПбГУ, 2005. - 400 с.
- 5 История развития отечественной космонавтики [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – Режим доступа: <https://pandia.ru/text/77/272/58755.php> – 22.05.23
- 6 История развития отечественной космонавтики [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://kakizobreli.ru/istoriya-razvitiya-otechestvennoj-kosmonavtiki/> – 10.04.23
- 7 История развития отечественной космонавтики [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://mks-onlain.ru/istoriya-razvitiya-otechestvennoy-kosmonavtiki-kratko-samoje-glavnoye-astronomiya-doklad/> – 10.04.23
- 8 Келлер, Э. Введение в ZBrush 4: учебное пособие / Э. Келлер. – Москва: ДМК Пресс, 2018. – 754 с.
- 9 Клютко, Д.В. Макетирование и трехмерное компьютерное моделирование деталей и узлов верхнего строения многоцелевых гусеничных и колесных машин: учебное пособие / Д.В. Клютко. – Минск: Инфра-М, 2015. – 349 с.
- 10 Королев.А.Л Компьютерное моделирование. Лабораторный практикум. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015. – 296 с.
- 11 Космонавтика. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1970. – 592 с.

- 12 К.Э. Циолковский. Труды по ракетной технике. – М.: Либроком, 2010. – 350 с.
- 13 Лабораторный практикум по курсу «3D-моделирование и прототипирование изделий»: учеб.-метод. пособие / А. Н. Сергеев [и др.]. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – 162 с.
- 14 Меженин, А. В. Технологии разработки 3D-моделей : учебное пособие / А. В. Меженин. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2018. – 100 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/136470> (дата обращения: 22.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
- 15 Никонов В. В. Компас-3D: создание моделей и 3D печать / В. В. Никонов. – Питер. : Наука, 2010. – 208 с.
- 16 Обзор Prusa Slicer [Электронный ресурс] // 3dradar. – Режим доступа: <https://3dradar.ru/post/47992/> - 05.04.2022.
- 17 Обзор Simplify3D: лучшая программа для слайсинга? [Электронный ресурс] // 3D Print Story. – Режим доступа: <https://3dprintstory.org/obzor-simple3d-luchshaya-programma-dlya-slaisinga/>. – 05.05.2022
- 18 Обзор слайсера ChiTuBox для 3D печати [Электронный ресурс] // 3DMall. – Режим доступа: <https://3d-m.ru/obzor-slajsera-chitubox-dlya-3d-pechati/>. – 06.05.2022.
- 19 Ракета-носитель «Восток» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/29990/> – 12.05.23
- 20 Ракета-носитель «Восход» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим до-ступа: <https://www.roscosmos.ru/462/> – 12.05.23
- 21 Ракета-носитель «Р-7» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим досту-па: <https://habr.com/ru/articles/206926/> – 10.05.23
- 22 Ракета-носитель «Союз» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим до-ступа: <https://www.roscosmos.ru/35248/> – 13.05.23
- 23 Ракеты Королевской серии [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://www.bostonkrugozor.com/show/rakets.2563.html> – 17.04.23

24 Страницы советской космонавтики. – М.: Машиностроение, 1975. – 352 с

25 Технология трехмерного моделирования в Blender 3d : учебное пособие / А. А. Кузьменко, А. Д. Гладченков, Л. Б. Филиппова [и др.]. – Москва : ФЛИНТА, 2018. – 79 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/113463> (дата обращения: 12.04.2021).

26 Технология трехмерного моделирования и текстурирования объектов в Blender 3d и 3d Max : учебное пособие / А. А. Кузьменко, А. Д. Гладченков, В. А. Шкаберин [и др.]. – Москва : ФЛИНТА, 2019. – 142 с. – ISBN 978-5-9765-4216-7. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/125515> (дата обращения: 11.04.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

27 Холмогоров, В.К. 3D-печать с нуля / В.К. Холмогоров., Горьков Д.А. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2020. – 256 с.

28 Черток Б.Е Книга 4. Ракеты и люди. Лунная гонка : Машиностроение, 1999 – 575 с.

29 Шаталов, В. А. Космонавты СССР / В. А. Шаталов, М. Ф. Ребров. – 4-е изд, доп. – Москва : Просвещение, 1987. – 383 с., [16] л. ил. : ил.

30 Ярослав Голованов. Королев. Хроника. – М.: Молодая гвардия, 1973. – 256 с.