

**Автономная некоммерческая общеобразовательная
организация "Физтех-лицей"
(АНОО «Физтех-лицей» им. П.Л. Капицы)**

XX научно-практическая конференция

«Старт в инновации»

**Разработка, изготовление и оценка эффективности
сопла, напечатанного на 3d-принтере**

Выполнил:
Назаренко Дмитрий, 9 класс
Руководитель:
Саканов Д. М.

Московская область, г. Долгопрудный

2021 г.

Содержание

1. Цель исследования	2
2. Основные направления исследования	2
2.1. Ракетный двигатель	2
2.1.1. Корпус двигателя	2
2.1.2. Топливо двигателя	3
2.1.3. Сопло (сверхзвуковое)	4
2.1.4. Заглушка	6
2.2. Варка ракетного топлива	7
2.2.1. Изготовление “умной” варочной поверхности	7
2.2.2. Процесс варки	10
2.3. Испытательный стенд	11
2.3.1. Приемник	11
2.3.2. Передатчик	12
2.3.3. Стенд	16
3. Результат проделанной работы	19
4. Трудности в процессе работы	19
5. Источники идей	20
6. Литература	20
7. Используемые программы	20

1. Цель исследования

Целью исследования данной работы является:

Моделирование, создание, испытание, оценка ракетного двигателя на карамельном топливе, с использованием сопла, напечатанного на 3d принтере.

2. Основные направления исследования

Основные направления исследования состоят из следующих этапов:

- 1) Моделирование, расчёт ракетного двигателя;
- 2) Варка ракетного топлива;
- 3) Испытательный стенд.

2.1.Ракетный двигатель

В исследовании предусмотрено применение ракетного двигателя на твёрдом топливе (РДТТ). Основными частями рассматриваемого двигателя являются:

- 1) Корпус двигателя;
- 2) Топливо;
- 3) Сопло;
- 4) Заглушка.

2.1.1. Корпус двигателя

В работе были предусмотрены следующие основные требования к корпусу двигателя:

- 1) Возможность переносить большое давление (около 30 Атм);
- 2) Возможность переносить большие температуры (1300°C);
- 3) Простота изготовления/покупки.

Рассмотрев возможные доступные варианты, выбор пал на обычную полипропиленовую трубу, которая отлично переносит высокое давление/высокие температуры. Параметры трубы: наружный диаметр 32 мм, внутренний диаметр 21.2 мм, толщина стенки 5.4 мм.



Рис.1. Фото трубы

2.1.2. Топливо двигателя

Основные требования к топливу:

- 1) Простой метод изготовления;
- 2) Относительная безопасность изготовления/использования.

Выбор пал на карамельное топливо, которое состоит из двух компонентов:

- окислитель – калиевая селитра;
- горючие – сахар/сорбит.

Для рассматриваемого топлива есть несколько вариантов “приготовления”- пресс или варка.

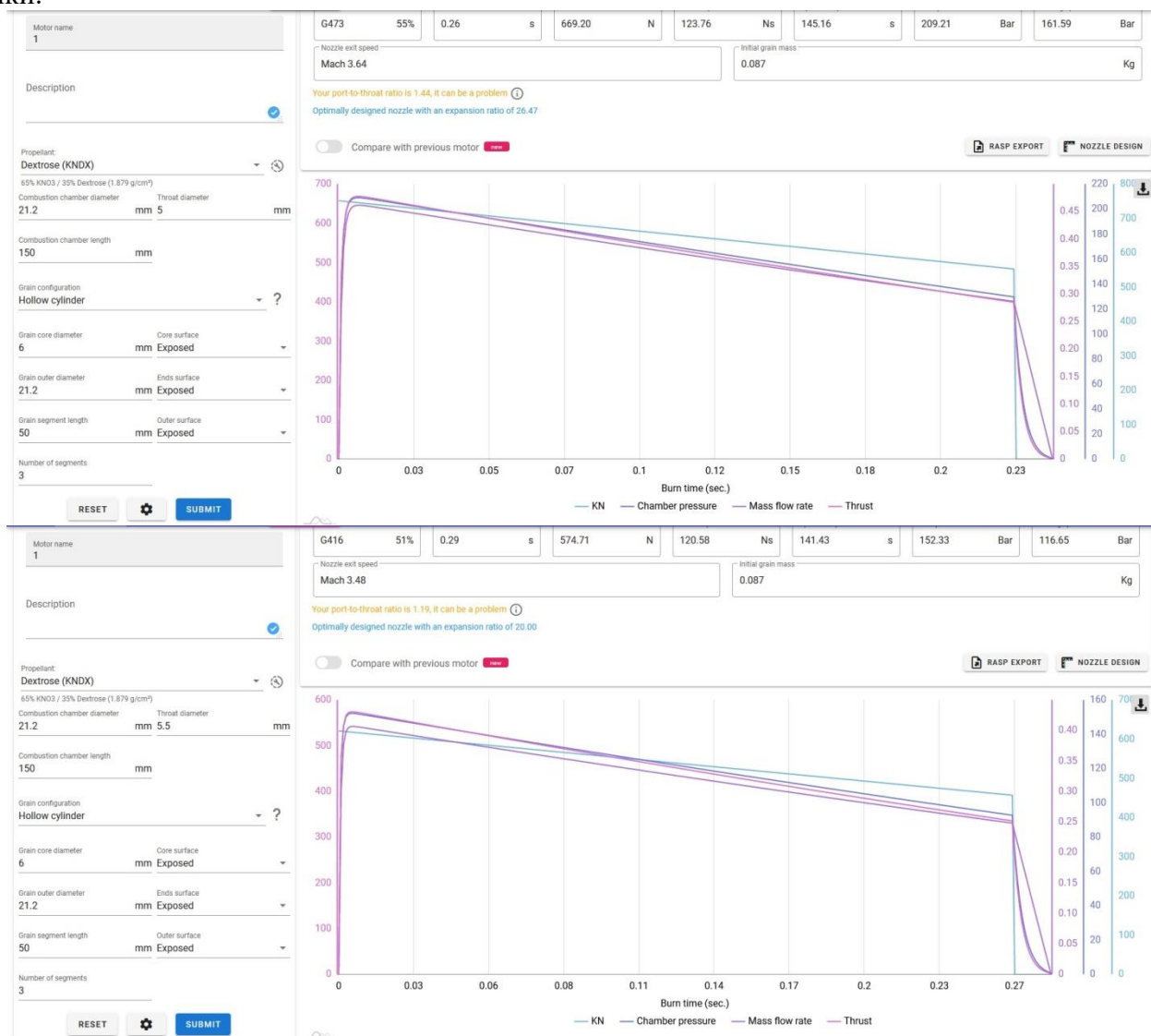
В работе применялась варка, поскольку, данный метод менее затратный и не требует специального оборудования.

Процесс приготовления топлива подробно описан в пункте 2.2. «Варка топлива». Топливо изготавливается в виде шашек, для дальнейшего удобного использования.

Прежде чем начать изготавливать сопло, нужно знать характеристики двигателя, который мы хотим получить.

Для этого был использован сайт для расчётов параметров двигателя – METEOR. Задав основные характеристики двигателя (длина двигателя/ширина канала/ширина шашки и т.п), получаем очень информативные график (примерной) работы двигателя.

Зная основные параметры нашего двигателя приступаем к моделированию сопла и заглушки.



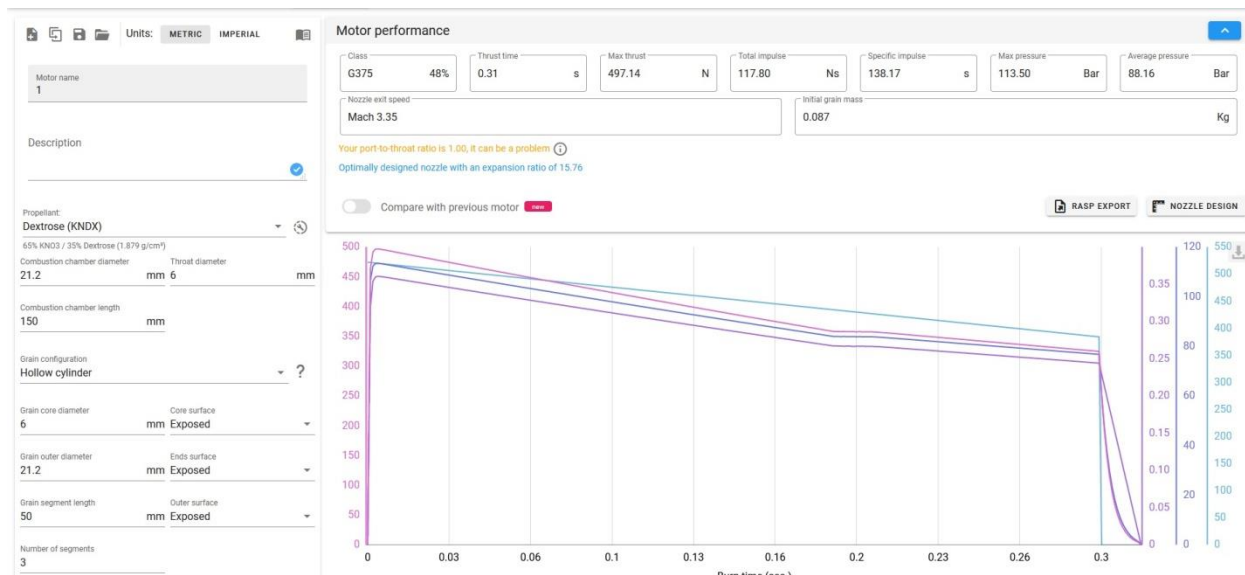


Рис.2 Фото расчётов

2.1.3. Сопло (сверхзвуковое)

Основная задача сопла - повышение энергетики струи за счет использования эффектов сжимаемости.

Сопло РДТТ

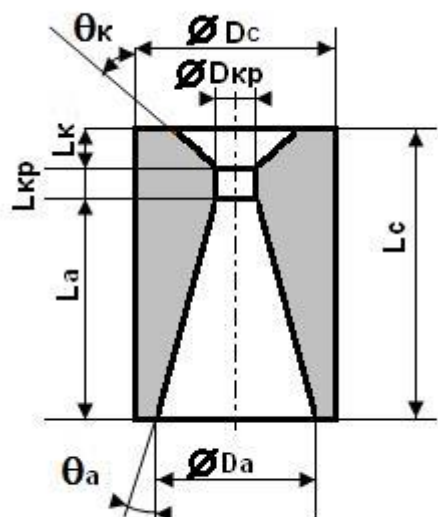


Рис.3 Фото сопла

Для проектирования сопла воспользовались готовыми формулами:

- длина критического канала:

$$L_{кр} \leq 0.5D_{кр};$$

- угол полураствора конфузора:

$$\theta_k = 30-60^\circ;$$

- угол полураствора диффузора:

$$\theta_a = 9-12^\circ;$$

- выходной диаметр:

$$D_a = 1.5-2.5D_{кр}.$$

Моделировались все сопла в программе КОМПАС-3D v19. Поскольку расчёты были сделаны на двигатели одинаковые во всём кроме критического диаметра, то и были смоделированы сопла с разными критическими диаметрами (6/5.5/5 мм).

Сопло устроено так, что точка критического диаметра находится в корпусе двигателя. Сопла разделились на две категории плавное строение/резкое строение. Сопла изготавливаются на 3D-принтере, используя пластик PLA.

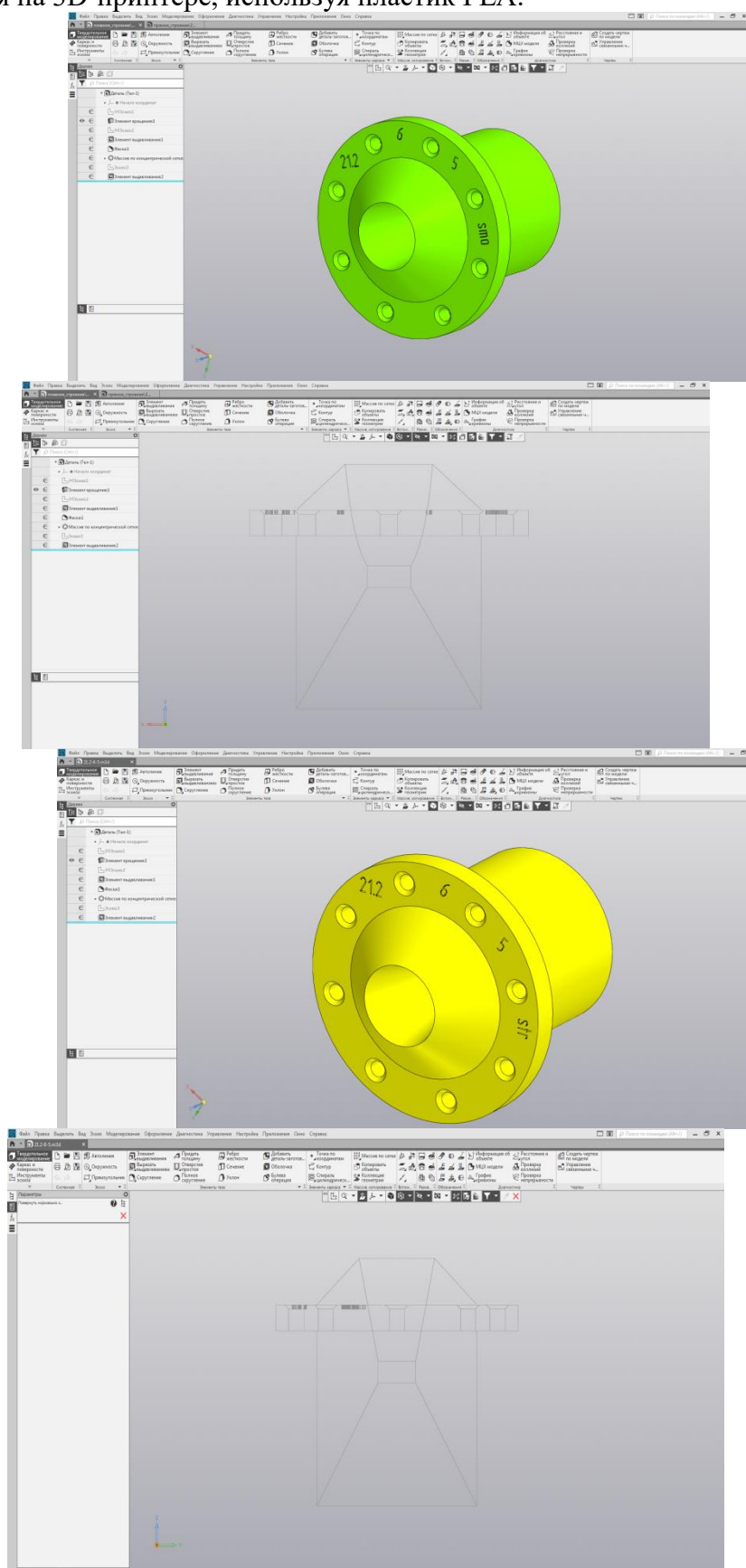


Рис.4 Фото моделей сопел плавное/резкое строение.

2.1.4. Заглушка

Затгушка необходима для защиты ракеты/аппаратуры и направление продуктов в нужном направлении. И сопло и заглушка крепятся к корпусу с помощью 8 шурупов (для этого в них предусмотрены отверстия), закрученных в стенку корпуса.

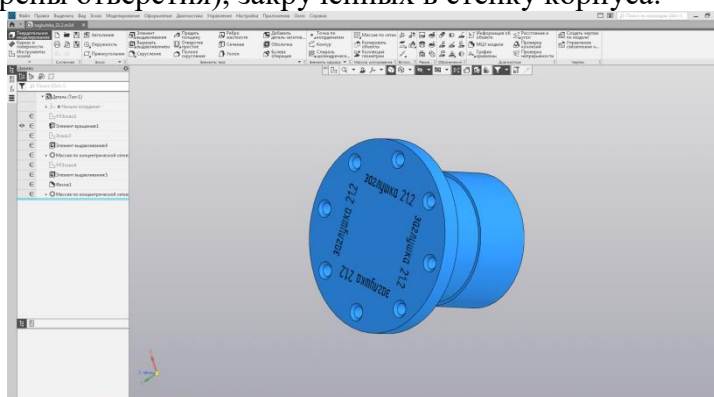


Рис.5 Фото заглушки

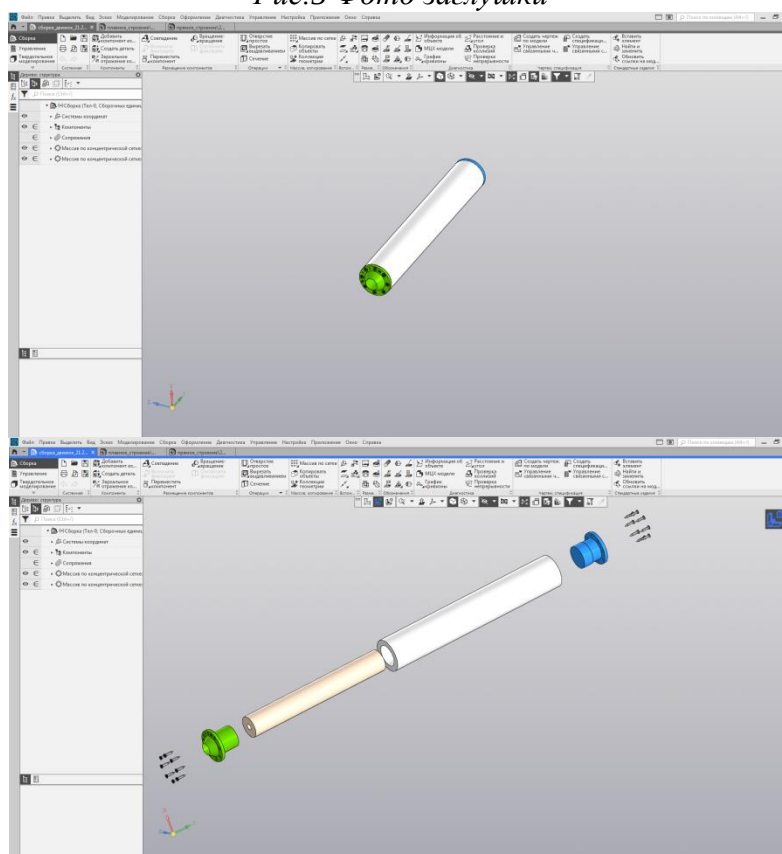


Рис.6 Общая сборка ракетного двигателя

2.2. Варка ракетного топлива

Данный этап работы состоит из следующих пунктов:

- изготовление «умной» варочной поверхности;
- процесс варки топлива.

2.2.1. Изготовление «умной» варочной поверхности

Одним из важных критериев при варке топлива является точный контроль температуры.

В работе применялась бытовая электрическая одноконфорочная варочная плитка. Поскольку обычные варочные поверхности очень инертны, то топливо необходимо варить на песочной бане (вместо песка можно использовать мелкоизмельчённую соль). Для этого была создана установка – «умная» плитка, состоящая из следующего оборудования:

- 1) Arduino UNO – мозг нашей установки, который контролирует температуру;
- 2) OLED дисплей – средство вывода информации (температура сейчас/нужная);
- 3) Реостат – для точного контроля нужной температуры;
- 4) Термопара – средство измерения температуры;
- 5) Бытовая электрическая одноконфорочная варочная плитка;
- 6) Реле – для включения и выключения плиты;
- 7) Форма для выпекания – для организации песочной бани;
- 8) Выпарительная чаша – для выпаривания воды из топливной смеси;
- 9) Электрокофемолка – для тщательного измельчения всех компонентов топлива;
- 10) Дополнительное оборудование – перчатки, упаковка, формы/бронировки для топливных шашек.

Этапы изготовления варочной поверхности:

1. Для работы была выполнена доработка электрической плитки, исключены некоторые детали.





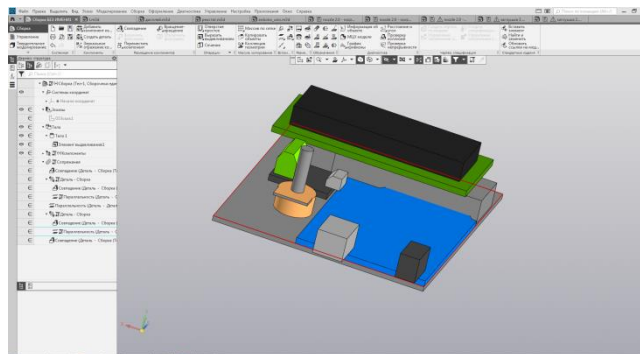
Рис.7 Фото доработанной плитки

2. Следующим этапом работы была сборка электроники на макетной плате, затем - программирование Ардуина, проверка точности выводимых данных температуры с помощью кипяченой воды (100 оС), вскипятив воду и посмотрев максимальную температуру измерений. Погрешность оказалась в пределах допустимого = 2%.



Рис.8 Фото установки

3. Затем смоделировали корпус для электроники.



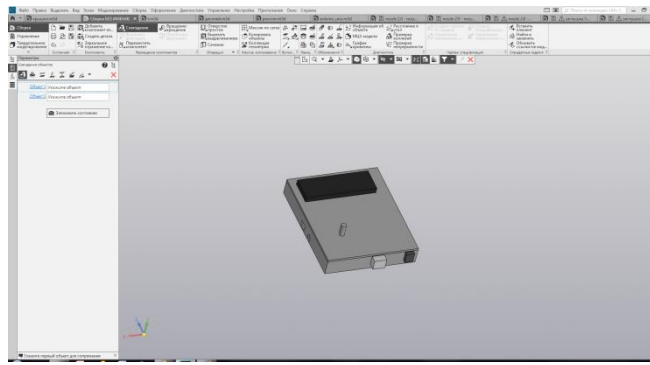


Рис.9 Фото модели корпуса для варки

4. Распечатали корпус и все его составляющие на 3D-принтере.

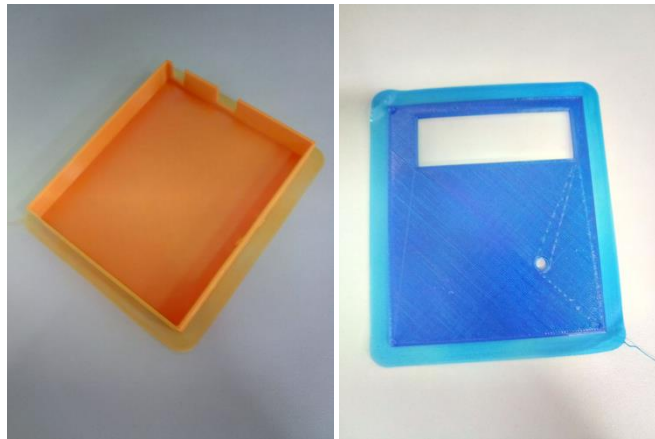


Рис.10 Фото напечатанного корпуса

5. Спаяв всю электронику, поместил в корпус. Проверил работоспособность итоговой установки.

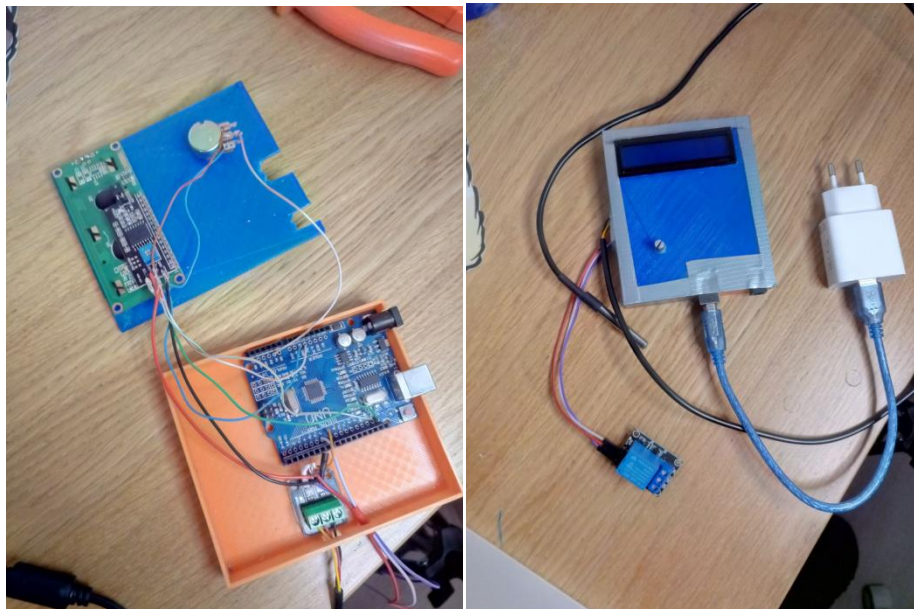


Рис.11 Фото установки в итоге + пайка

В конечном итоге получили точную, надёжную, дешёвую “умную” варочную поверхность.

2.2.2. Процесс варки

В работе применялась калиевая селитра, купленная в садово-огородном отделе. Измельчаем все компоненты по отдельности в электрокофемолке (сахар, калиевая селитра). Затем насыпаем эти вещества в пропорции 65% калиевой селитры и 35% сахара (по массе). Далее добавляем воду, перемешиваем, ставим этот раствор на заранее разогретую до 100°C плитку.



Рис.12 Фото песочной бани + варка

Вода начинает выкипать, а мы помешиваем смесь, когда вода полностью выкипит, то у нас будет некое аморфное вещество, которое пока теплое очень хорошо лепиться. Не теряем время зря и начинаем потихоньку утрамбовывать формы для топлива этим веществом. Топливо очень быстро остынет, получатся шашки.

Теперь это – ракетное топливо, которое загорается только при +300°C. Топливо очень гигроскопично, так что нужно сразу упаковывать его в герметичные пакеты. При изготовлении топлива не забываем про технику безопасности.

Несмотря на относительную его безопасность, по сравнению с другими составами, карамельное топливо требует таких же мер предосторожности при использовании, как и любое другое ракетное топливо, так как является высокоэнергетическим составом.

Сначала сварили немного топлива, для проверки рецепта/способа варки. Тестовая партия была – 15 грамм. Сварили, поместили в пробирку, упаковали в герметичный пакет, оставили это топливо на испытание. При серийной варки нужно соблюдать одно правило – все компоненты всё время должно быть одинаково перемолоты, пропорции соблюдены, время выпаривания всё время - одинаковое. В данном деле стабильность – залог того, что двигатели будут работать стабильно.

2.3. Испытательный стенд

Испытательный стенд состоит из трех основных частей:

- 1) Приёмник;
- 2) Передатчик;
- 3) Стенд.

2.3.1. Приёмник

Основными функциями приемника являются:

- 1) Принятие/обработка сигнала и обратная связь;
- 2) Организация воспламенения запала;
- 3) Считывание данных с датчика веса (тяги);
- 4) Запись полученных значений на SD карту.

Для приёмника нам понадобятся:

- 1) Arduino Nano – обработка данных радиопередачи, обработка данных с тензометра;
- 2) Тензометр – датчик веса, считывание показаний тяги двигателя;
- 3) nrf24l01 – радиомодуль, для осуществления связи между приёмником и передатчиком;
- 4) Модуль SD карты – запись данных на SD карту;
- 5) SD карта;
- 6) Аккумулятор 18650 (высоковольтный, для поджига запала) и холдер для него;
- 7) Повышающий до 5В модуль – стабильное питание для Arduino;
- 8) Выключатель.

Для создания корпуса приемника и определения его точных габаритов было выполнено моделирование всех его деталей.

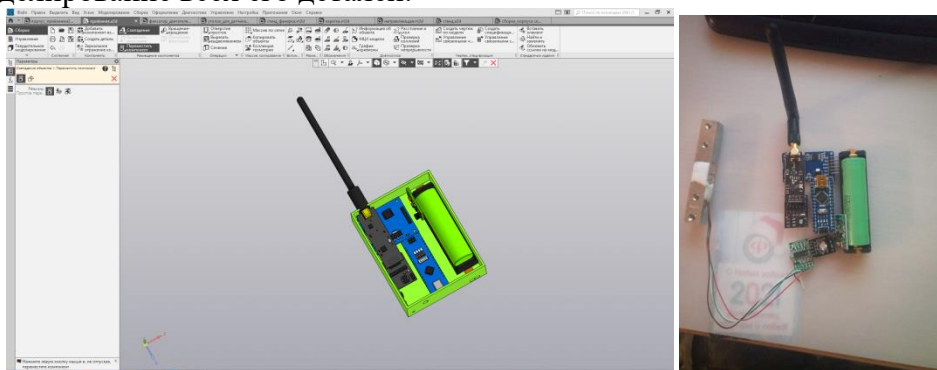


Рис.13 Фото корпуса со всеми деталями

После моделирования корпуса приёмника была выполнена его печать на 3D-принтере.

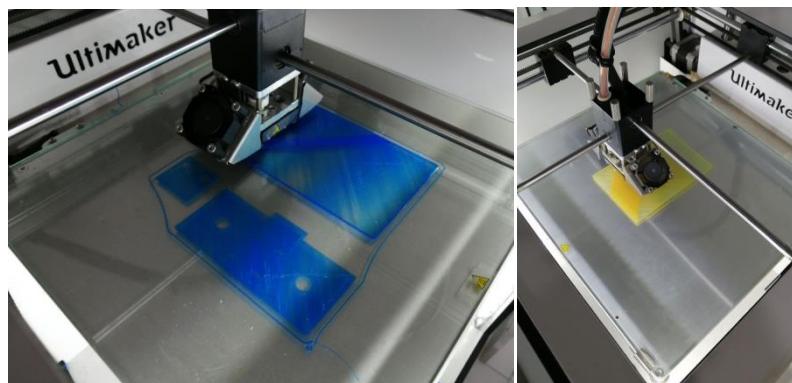


Рис.14 Фото напечатанного корпуса

Следующим этапом была сборка тестового стенда электроники.

Код для Arduino можно разделить на две части – запись показаний тензометра на SD карту и радиосвязь между приёмником и передатчиком.

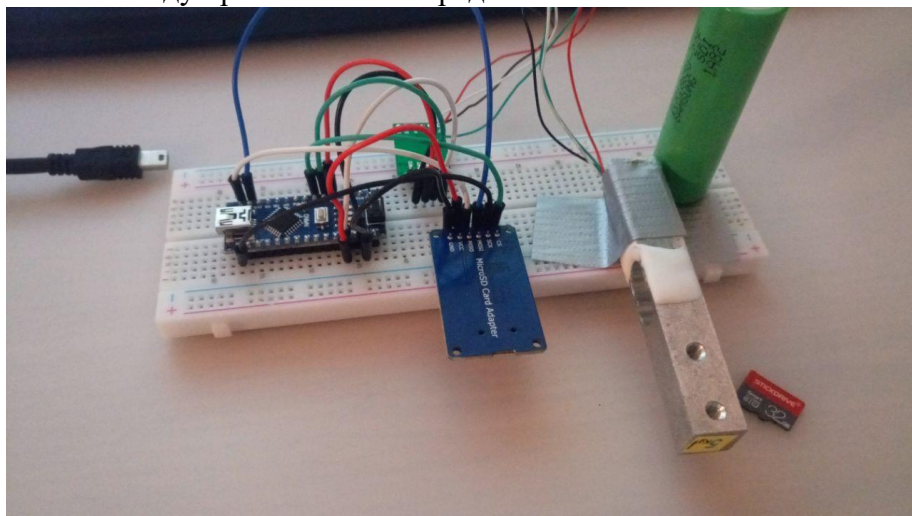


Рис.15. Фото пример записи на SD карту, калибровка тензометра

Спаяв все компоненты и проверив их работоспособность поместили в корпус.

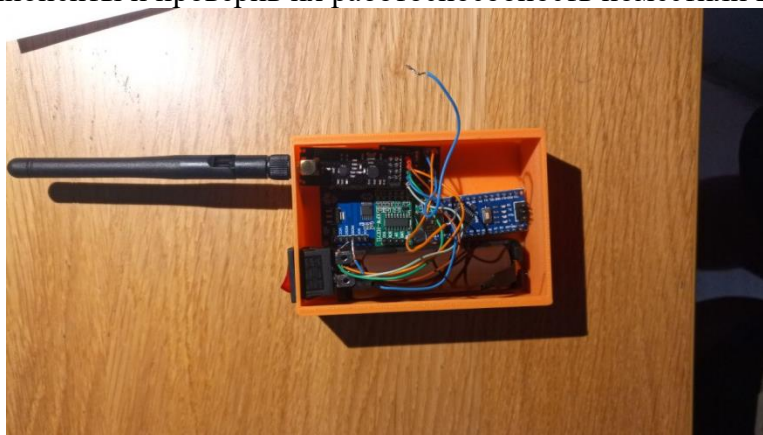


Рис.16. Фото приёмника с электроникой внутри

2.3.2. Передатчик

Основными функциями передатчика являются:

- 1) Передача данных на приёмник;
- 2) Обработка обратной связи приёмника;
- 3) Индикация работы;
- 4) Защита от ложного срабатывания.

Для передатчика нам понадобятся:

- 1) Arduino Nano – обработка данных радиопередачи, обработка данных с кнопок;
- 2) nrf24l01 – радиомодуль, для осуществления связи между приёмником и передатчиком;

- 3) Аккумулятор 18650 и холдер для него;
- 4) Повышающий до 5В модуль – стабильное питание для Arduino;
- 5) Защита на аккумулятор;
- 6) Кнопка с подсветкой;
- 7) Светодиод и маленькая кнопка.

Для создания корпуса передатчика и определения его точных габаритов было выполнено моделирование всех его деталей.

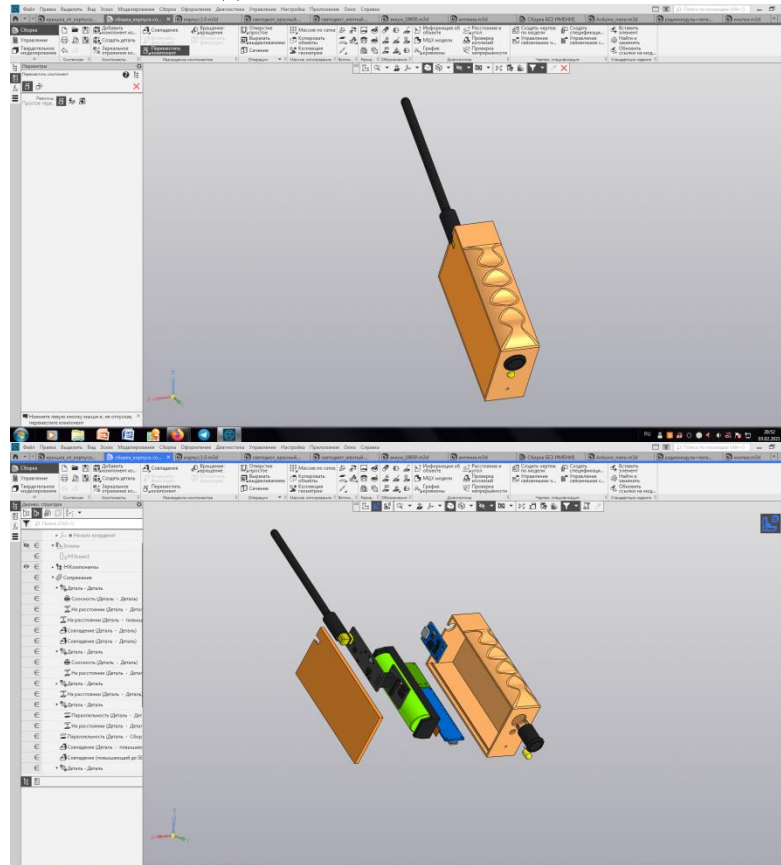


Рис.17. Фото модели передатчика

После моделирования корпуса передатчика была выполнена его печать на 3D-принтере.



Рис.18. Фото напечатанного корпуса

Следующим этапом была сборка тестового стенда электроники, написание кода для радиопередачи между Arduino.

Рис.19. Фото тестовый стенд + код

Спаяв все компоненты и проверив их работоспособность поместили в корпус.

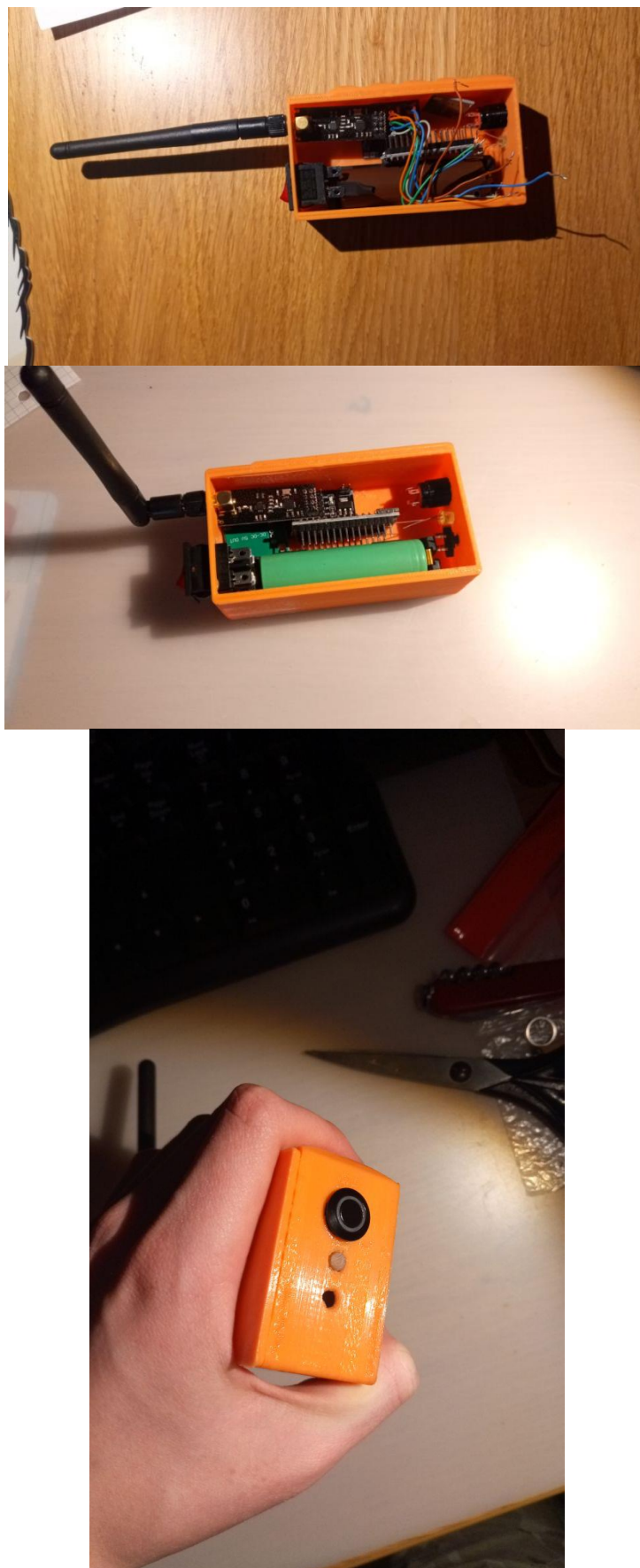


Рис.20. Фото передатчика + электроника

Когда приёмник и передатчик готовы, то после их испытаний можно осуществлять доработку прошивки/электроники.

2.3.3.Стенд

Основные функции стенда:

- 1) Возможность передвижения каретки с двигателем по направляющей;
- 2) Возможность измерения тяги двигателя;
- 3) Прочность конструкции.

Для изготовления стенда понадобятся:

- 1) Каретка с направляющей;
- 2) Фанера и лазерный станок по дереву;
- 3) Детали, напечатанные на 3D-принтере;
- 4) Винтики и гаечки различных размеров.

Для начала, как обычно, моделируем все составляющие установки. Создаём модель основания, которое будет состоять из нескольких слоёв фанеры.

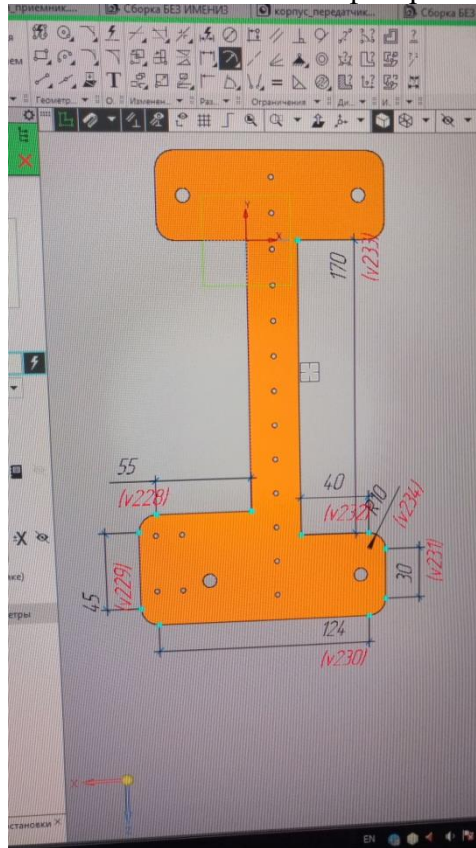


Рис.21. Фото модели основания

Создаём модели уголков (крепление тензометра к основанию), модели крепления двигателя к каретке.

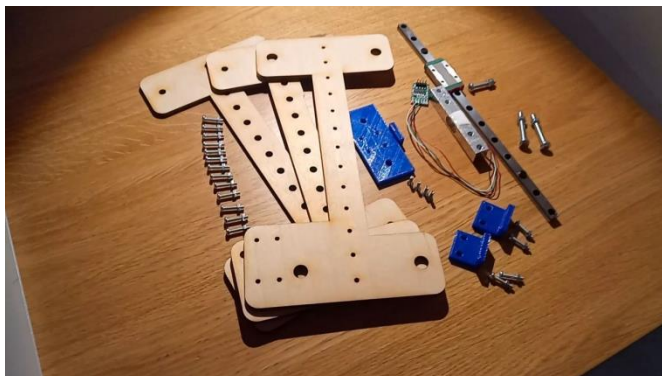


Рис.22. Фото моделей уголков + крепление к двигателю

Производим печать всех деталей на 3D-принтере.

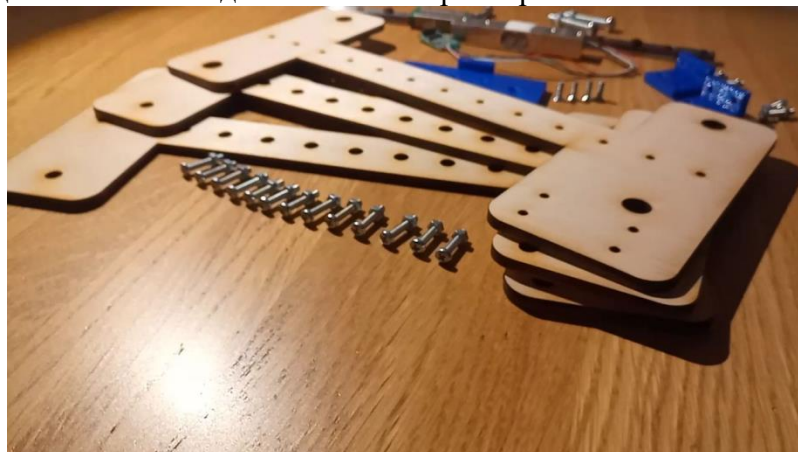


Рис.23. Фото деталей, напечатанных на принтере

Изготавливаем вырезанные на фанере слои для основания.

Производим сборку стенда.

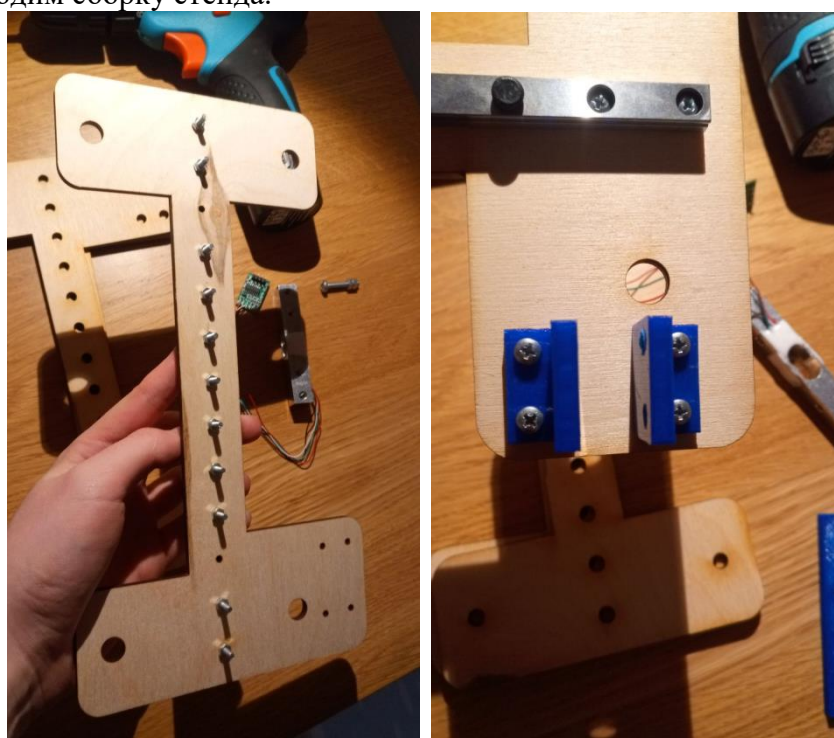


Рис.25. Фото сборки

Производим склеивание слоёв фанеры между собой с помощью ПВА клея и струбцин.

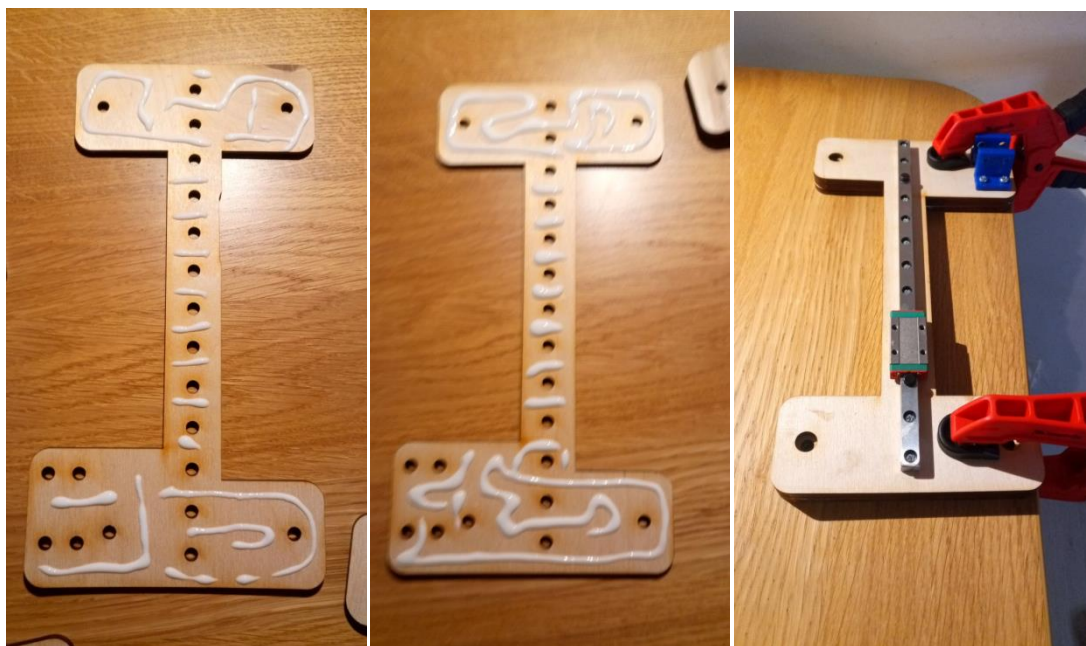


Рис.26. Фото склеивания+зажатие в струбцинах
 Когда слои хорошо проклеились, заканчиваем сборку стенда.

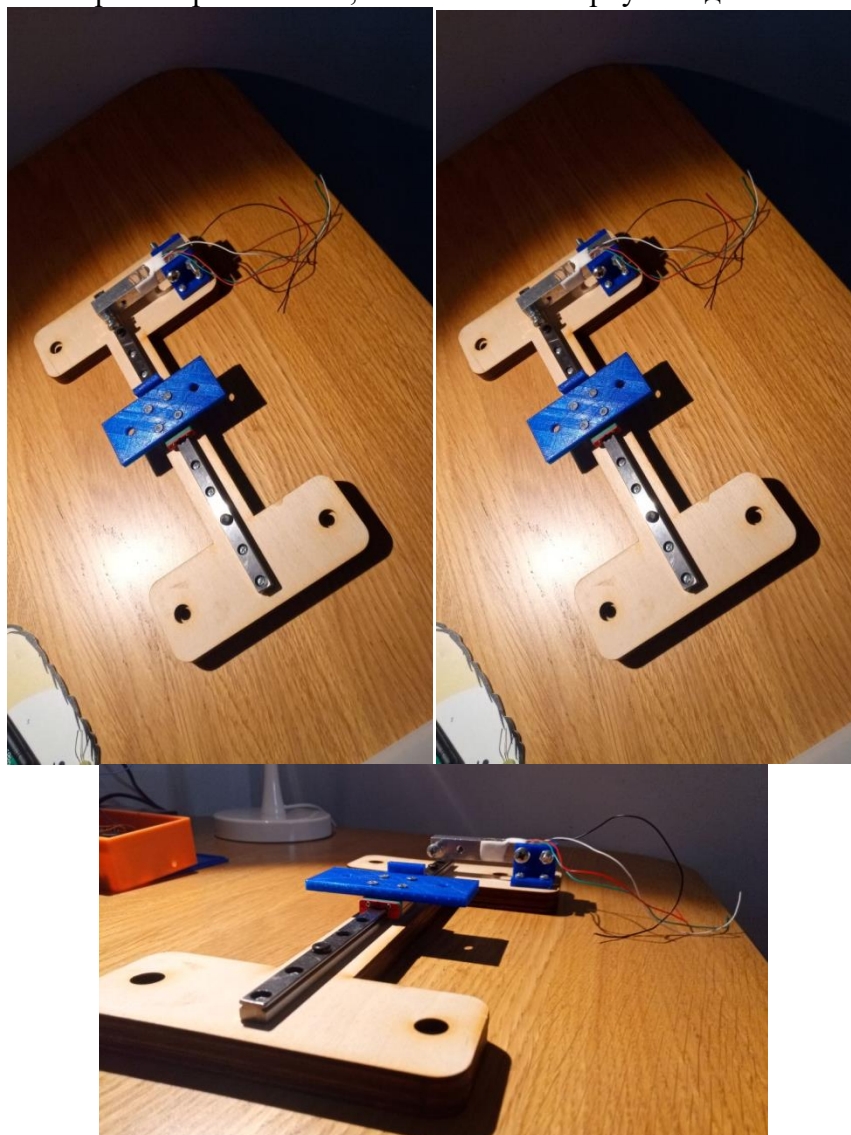


Рис.27. Фото стенда в итоге
 В итоге мы получили крепкий и надёжный стенд для испытания на нём двигателей.

3. Результат проделанной работы

Основными результатами работы являются:

- 1) Приёмник/передатчик/стенд в полной сборки и готовности к испытаниям;
- 2) Расчеты и модели сопел;
- 3) Проработан способ приготовления ракетного топлива;
- 4) Пробник топлива и его испытание.

Испытания ракетных двигателей были отложены на более теплый период времени, т.к. при низких температурах изменяется скорость горения топлива.

4. Трудности в процессе работы

В процессе выполнения работы были выявлены следующие трудности:

- 1) При варке, долгий прогрев выпаривательной чаши. Решение – более тонкостенная чаша;
- 2) При варке, из-за долгого прогрева термopapa повредила свою изоляцию. Решение – погружать термopapa в соль только её железной частью;
- 3) При печати на 3D-принтере, усадка пластика в отверстиях. Решение – изменение размеров отверстий на стадии моделирования или допиливание отверстий с помощью наждачки и напильника;
- 4) При программировании тензометра, калибровка и создание кода, в библиотеки примеры не работают. Решение – написание собственного кода почти с нуля;
- 5) При программировании радиомодулей nrf24l01, непонимание их работы. Решение – углубление в тему, чтение литературы по этому направлению.

5. Источники идей

Варка топлива - <http://kia-soft.narod.ru/interests/rockets/fuel/rcandy/rcandy.htm>

Варку топлива – Амперка <https://habr.com/ru/company/amperka/blog/509510/>

Проектирование сопла - <http://kia-soft.narod.ru/interests/rockets/theory/nozzle/nozzle.htm>

Радиомодули nrf24l01 и код для них – <https://github.com/AlexGyver/nRF24L01>

Модуль SD карты - <https://arduino-master.ru/datchiki-arduino/podklyuchenie-sd-karty-k-arduino/>

OLED дисплей - <https://github.com/amperka/QuadDisplay>

Пример стенда, как идея - <https://youtu.be/To-jdOF7cbc>

Форум и советы - <http://forums.airbase.ru/viewforum.php?id=23>

Как огромный источник информации - <http://www.nakka-rocketry.net/>

6. Литература

1. Лавров Л.Н. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе https://www.studmed.ru/lavrov-ln-konstrukcii-raketnyh-dvigatelay-na-tverdom-toplive_350409889d3.html

2. Липанов, Алексей Матвеевич - Проектирование ракетных двигателей твердого топлива - <https://search.rsl.ru/ru/record/01001713692>

7. Используемые программы

Все модели были сделаны в программе КОМПАС-3D v19.

Весь скетч был написан в Arduino IDE.

Расчёты ракетного двигателя были проведены в программе METEOR - <https://meteor.open-sky.fr/#/motorDesign>.