

ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЕКТОВ «БОЛЬШИЕ ВЫЗОВЫ»

***УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЫЛЬЕВ СВОБОДНО
ЛЕТАЮЩЕЙ МОДЕЛИ ПЛАНЕРА***

Беспилотный транспорт и логистические системы

Автор: Литовский Лев, МБОУ «Гимназия №7» г. Брянска Брянской области
11 класс физико-математического профиля

Научные руководители: Степаниденко Александр Иванович, учитель физики
высшей квалификационной категории;

Титивкин Сергей Александрович, неоднократный чемпион СССР и России по
судомоделизму в классе скоростных моделей,

Научный консультант: Симонян Самвел Рафаэлович,
Выпускник факультета «Вертолёт- и самолётостроения» Московского
авиационного института

Брянск 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. ВВЕДЕНИЕ	3
II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	5
III ВЫВОДЫ И АНАЛИЗ РАБОТЫ НАД ПРОЕКТОМ	12
Приложение I: Создание матрицы	15
Приложение II: Моделирование/Создание крыла	16
Приложение III: Эксперименты/Испытания	17
Приложение IV: Проектирование аэродинамической трубы	18
Приложение V: Формовка крыла	19
Приложение VI: Формовка крыла	20
Приложение VII: Финальные испытания	21
Приложение VIII: Результаты экспериментов в аэродинамической трубе. .	22
Приложение IX.....	23
Приложение X: Словарь	24
Словарь некоторых терминов	24

I. ВВЕДЕНИЕ

Аэродинамика интересовала людей с самых давних времён. Очень долго человек смотрел в небо, наблюдая за птицей, пытаясь повторить её полёт. Шли годы, и вот самолёты, вертолёты, планеры и другие воздушные транспортные средства очень плотно вошли в нашу повседневную жизнь. Уже очень трудно представить её без этих чудес инженерной мысли.

Актуальность и важность изучения вопросов, связанных с изготовлением крыла самолёта, определила **цель моей работы**: найти способ упростить процесс изготовления крыла самолёта, не потеряв при этом качества, и улучшить его характеристики.

Задачи: **1.** Изучить различные источники информации по данной теме; **2.** Найти способ изготовить крыло самолёта быстро и эффективно; **3.** Выбрать наилучшую конфигурацию крыла путём экспериментов и испытаний (аэродинамический профиль, форма, длина, ширина, толщина, удлинение и т.д.), чтобы будущий самолёт находился в воздухе как можно дольше; **4.** Изготовить крыло выбранным способом; **5.** Провести ещё ряд экспериментов и испытаний, чтобы убедиться, что выбранная конфигурация крыла является самой лучшей.

Объект исследования – аэродинамические явления: исследование движения воздуха при воздействии твердого предмета (крыло самолета).

Предметом исследования являются крыло планера.

Научная новизна работы отличается новаторством в исследуемой тематике, так как быстрое изготовление самолётов рано или поздно потребует человечеству для обустройства дальних уголков планеты Земля. Были проведены испытания различных аэродинамических профилей. Выявлены параметры контуров, длины, ширины, от которых зависела подъёмная сила крыла. Также были выявлены новые особенности при печати пластика PLA для 3 – D принтера. Была замечена несовместимость грунтовой краски с цапон лаком. Прочностные особенности композитных материалов (стеклоткани, углеткани, углеволокна, кевлара).

Практическая значимость. В наше время все чаще возникает вопрос колонизации людьми других планет. Одной из таких планет является Марс. Рано или поздно у первых колонистов появится острая нужда в передвижении на большие расстояния за небольшой промежуток времени. Один из самых лучших способов – самолёт. Как известно, сделать самолёт подручными средствами, которыми будут обладать первые жители Красной планеты, невозможно. Для этого необходимо специальное оборудование, станки. Постройка завода, который будет производить воздушные транспортные средства, потребует много затрат ресурсов и времени. Я предлагаю использовать в качестве первого «завода» по изготовлению воздушных транспортных средств на Марсе моё устройство. Во-первых, такое устройство будет намного дешевле изготовить на Земле и доставить на Марс, нежели построить целый завод на другой планете, так как оно небольших размеров и массы. Во-вторых, таких устройств можно доставить на поверхность Красной планеты достаточно много. Главное, чтобы хватило мощности ракеты. В-третьих, первым колонистам не нужно полностью знать все тонкости проектирования самолёта. Достаточно иметь минимальные знания по этой дисциплине и навыки пользования моим устройством. Устройство, которое я изготовил в ходе работы над проектом, является уменьшенной копией того, что я предлагаю отправить на Марс первым колонистам. Также в качестве сырья для планеров могут служить пропитанные клеем древесные опилки, пластиковые отходы, которые будут помещаться прямо в моё устройство, так его геометрия это позволяет.

На сегодняшний день по результатам проведённой работы с помощью моего устройства было изготовлено несколько крыльев для свободно летающей модели планера из разных композитных материалов.

Целесообразность проекта: На изготовление устройства в расход ушло около полутора килограмма эпоксидной смолы ЭД-20 и полкилограмма отвердителя. Средняя стоимость этого объёма смолы вместе с отвердителем составила чуть больше 1300 рублей. Также было израсходовано около 20 м квадратных

стеклоткани с толщиной одна десятая миллиметра. Стоимость такого количества стеклоткани составила около 600 рублей. Профильная труба, дсп пластина и деревянные бруски были найдены. То есть, их стоимость составила 0 рублей. Итого общие финансовые затраты составили около 2000 рублей. Потратив всего 2000 рублей, я получил многоразовое устройство, которое при должном обращении прослужит много лет. Эффективность такого устройства составляет примерно один планер в полторы недели (7 дней на крыло, 3-4 дня на изготовление других элементов планера). То есть, моя матрица позволяет ускорить процесс изготовления во много раз.

Методы, используемые во время работы:

1) Изучение сведений об объекте исследования из технической литературы, справочников, статей и журналов, 2) Поиск в Интернете, 3) Анкетирование, 4) Классификация, 5) Сравнение, 6) Наблюдение за объектом исследования, 7) Анализ полученных данных, проведение эксперимента, 8) Систематизация и обобщение полученных результатов.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Гипотеза: Я предполагаю, что существует способ, благодаря которому можно быстро изготовить крыло самолёта в любых условиях при наличии нужных материалов и минимального оборудования, и что подъёмная сила крыла планера зависит от аэродинамического профиля крыла, от его ширины и длины и других параметров.

Аэродинамические явления, возникающие при полёте самолёта.

Аэродинамика (от [др.-греч.](#) ἀήρ — воздух и δύναμις — сила) — раздел [механики сплошных сред](#), в котором целью исследований является изучение закономерностей движения [воздушных](#) потоков и их взаимодействия с препятствиями и движущимися телами. Более общим разделом механики является *газовая динамика*, в которой изучаются потоки различных газов. Традиционно к газовой динамике относят по сути задачи аэродинамики при движении тел со скоростями, близкие или превышающие [скорость звука](#) в воздухе. При этом важно учитывать сжимаемость воздуха.

Изначально, занимаясь в техническом кружке «Авиамоделирование», я столкнулся с необходимостью научиться делать качественные планеры для

успешного участия в соревнованиях по планерам в классе HGL 450. Для достижения этой цели вся работа была разделена на следующие этапы:

1). Установить связь между величинами, от которых зависит полёт планера.

Для достижения этой задачи необходимо было придумать такой способ, чтобы измерять воздействие аэродинамических сил, возникающих при полёте планера. Теоретический расчёт сразу отошёл на второй план, потому что это было почти невозможно, так как данный подход требовал наличия как знаний по соответственной теме – аэродинамике, так и базы высшей математики. Тогда по совету **научного консультанта** было принято решение сделать **аэродинамическую трубу**, чтобы установить связь эмпирически. **Аэродинамическая труба** —техническое устройство, предназначенное для моделирования воздействия среды на движущиеся в ней тела. После обсуждения нами был изготовлен 3 макет (приложение IV рис.1). На макете можно увидеть следующие элементы:

Весы для регистрации подъёмной силы; **Нагнетательный аппарат***, в качестве которого выступает вентилятор; **Спрямяющий аппарат***; **Окно**, чтобы наблюдать за показаниями весов; **Труба**, в качестве которой выступает коробка из гофрокартона.

Главным элементом в нашей аэродинамической трубе является спрямяющий аппарат. Для создания потока воздуха необходимо его нагнетать. Для достижения этой задачи прекрасно подходит вентилятор. Но главной проблемой такого способа нагнетания воздуха является то, что офисный вентилятор создаёт очень **турбулентный поток***, из-за воздействия которого будет очень сложно дать объективную оценку испытаниям. Для решения этой проблемы необходимо было изготовить **спрямитель***, который делал бы этот поток более **ламинарным***. Был создан чертёж спрямяющего аппарата, по которому он был изготовлен (приложение IV рис.2-3.). После подготовки всех элементов была произведена сборка аэродинамической трубы. Процесс сборки изображен в приложении V, рис.5. Вид трубы изнутри можно увидеть

в приложении IV, рис.6). Теперь собранную трубу можно было использовать в экспериментах.

Эксперимент №1 (Аэродинамическая труба):

Главная задача эксперимента: установить связь между определёнными параметрами, характеризующие аэродинамические явления, от которых зависит подъёмная сила, предположительно зависящая от *аэродинамического профиля** крыла и *угла атаки**. Регулировка угла атаки изображён в приложении III, рис.4). Турбулентность оценивалась по амплитуде колебаний *аэродинамический полосок**, предварительно приклеенных на крыло. Результаты эксперимента см. Приложение № VIII, таблицы №1 и № 2.

Исходя из полученных результатов **1 эксперимента**, можно сделать следующие **выводы:**

Выводы эксперимента № 1:

- 1) Подъёмная сила крыла зависит от её поперечного аэродинамического профиля (таблица №1).
- 2) При увеличении угла атаки возрастает подъёмная сила крыла (таблица №1).
- 3) При увеличении угла атаки усиливается турбулентность (таблица № 2).
- 4) Постоянно увеличивать угол атаки не имеет смысла, так как поток воздуха становится слишком турбулентным, что, исходя от данных таблицы № 1, препятствует увеличению подъёмной силы.

Также был отмечен довольно странный факт, что крыло с плоским профилем имело какую-то тягу, хотя по предположению её не должно быть. Посоветовавшись с научным консультантом, мы пришли к выводу, что турбулентный поток, созданный вентилятором, не выпрямился до конца, что и послужило возникновению ненулевой аэродинамической силы. Далее мы решили провести испытания на улице, в реальных условиях, где и будет летать планер.

Эксперимент № 2 (Улица):

Перед началом эксперимента необходимо было подготовить модели для испытаний.

Ознакомившись с конструкцией *планера**, я решил указать основные элементы этого аппарата:

***Крыло**, *Пилон**, *Хвостового оперения**.**

На основе изученной информации было сделано много моделей (см. приложения III, рис.1, рис.2). Планеры отличались формой крыла, профилем крыла, размахом крыла, шириной крыла, удлинением крыла, длиной хвостовой балки, конфигурацией хвостового оперения. Во время испытаний забыло мечено, что модели с V - образным крылом вели себя более устойчивее, чем модели без V - образного крыла. Планеры с длинной хвостовой балкой (около 20 см) вели себя более устойчиво, чем аппараты с менее длинной хвостовой балкой (около 15 см).

Выводы эксперимента №2:

Планер, который летал лучше всех, обладал следующими характеристиками:

1) Форма крыла эллипсовидное; **2)** Длина хвостовой балки 20 см; **3)** Высота установки крыла относительно плоскости горизонтального хвостового стабилизатора 3 см; **4)** Угол установки крыла на фюзеляже относительно плоскости горизонтального хвостового стабилизатора около 1 градуса.

Наличие небольшой V-образности крыла (около 3 градусов); **5)** Хвостовое оперение (горизонтальный стабилизатор и вертикальный стабилизатор) имело форму эллипса; **6).** Планер, который обладал трапециевидным крылом, также не уступал эллипсовидному.

Итог: Проанализировав полученные данные, я пришел к выводу, что самым трудоёмким элементом в конструкции планера является крыло, так как

а) от качества поверхности крыла напрямую зависело его качество полёта. Достижение высокого качества поверхности является очень трудозатратным процессом; **б)** от аэродинамического профиля поперечного сечения крыла очень зависел полёт планера. Каждый раз делать крыло вручную, надеясь, что аэродинамический профиль будет геометрически правильным, непродуктивно. Подведя итоги первого этапа, можно было приступить к выполнению следующего этапа:

2) Придумать/найти способ для быстрого изготовления крыльев планера.

Реализация поставленной задачи была разбита на несколько этапов:

1) Печать крыла на 3-D принтере. 2) Фрезеровка крыла на станке с ЧПУ

3) Создание Матрицы консолей крыла.

Следующим шагом стало определением подходящего способа изготовления крыльев из вариантов, предоставленных выше.

В таблице № 1, расположенной в приложении IX, указаны плюсы и минусы каждого из способов. Был сделан вывод, что создание крыльев с помощью матрицы является самым оптимальным вариантом. Ознакомившись с дополнительной информацией, мы разбили процесс создания матрицы на этапы: 1) Создание «болванки» для матрицы; 2) Создание самой матрицы

Матрица из стекловолокна - это такая же деталь, только “вывернутая наизнанку” (лицевой поверхностью внутрь). Внутренняя поверхность матрицы копирует форму поверхности модели («болванки»). Поэтому деталь, “склеенная” в матрице, будет точной копией нашей модели. «Болванкой» для матрицы служит крыло.

Перед созданием матрицы, надо было определиться с крылом. Права на ошибку не было, так как на создание одной матрицы требуется много материалов и времени.

Посоветовавшись с научным консультантом, мы пришли к выводу, что аэродинамический профиль крыла должен быть выпукло-вогнутым для наилучшей подъёмной силы, возникающей во время полёта. Воспользовавшись «Атласом профилей», мы выбрали профиль **B-8405-b** (см. приложение II, рис.1), так как он специально был разработан для свободнолетающих моделей.

Форму крыла мы выбрали трапециевидную, так как такая геометрическая форма почти не уступала другим крыльям с другими геометрическими формами крыльев, а изготовить идеальное эллипсовидное крыло очень сложно и не стоит затраченных трудов для каких-то долей секунд полёта.

Определившись с крылом, мы приступили к изготовлению «болванки» для создания матрицы. Далее в программе САПР «КОМПАС 3-D» были сделаны чертёж и 3-D модель крыла (см. приложение II, рис.2, рис.3, рис.4, рис.6). Следующим шагом была печать на 3-D принтере необходимых для крыла профилей. Всего профилей было 2: профиль центроплана, профиль на законцовки. Далее напечатанные заготовки были приклеены к торцам бальзового бруска. Бальзовый брусок обтачивался по контуру напечатанных профилей. В результате обточки получились ровные элементы крыла: 2 центроплана, 2 законцовки. Далее бальзовые заготовки подвергались лакокрасочной обработке. В итоге получились покрашенные сегменты крыла с качественной поверхностью. Далее эти сегменты собирались в целое крыло на ранее подготовленной площадке (склеенные между собой куски ДСП под нужным углом) (см. приложение II, рис.5). Когда «болванка» была сделана, мы приступили к изготовлению самой матрицы. Но перед началом работы мы всю площадку с крылом покрыли разделителем. Далее на верхнюю плоскость «болванки» нанесли первый декоративный слой эпоксидной смолы (приложение I рис.2). Этот слой служит для лучшей повторяемости поверхности крыла. Далее мы наносили пропитанную стеклоткань слой за слоем (см. приложение I рис.3). Под конец, когда уже был создан слой из стеклопластика достаточной толщины, решили укрепить всю конструкцию, добавив сверху конструкции профильную трубу в качестве ребра жёсткости (см. приложение I рис.6). Все выше описанные операции были выполнены и на нижней плоскости (консоли) «болванки». Далее половинки матрицы должны были хорошо просохнуть, дабы её не повело от внутренних напряжений, возникающих при полимеризации эпоксидной смолы. Период просушки длился примерно 2 месяца. После просушки в матрице были сделаны центровочные отверстия, которые также были усилены алюминиевыми шайбами. Дальше половинки матрицы были разъедены, чтобы оценить поверхность внутри матрицы. К сожалению, болванка не уцелела, но

это никак не сказалось на рабочей поверхности матрицы (см. приложение I, рис.7).

Финальным этапом работы стало тестирование устройства. В матрицу мы положили пропитанную эпоксидной смолой «Ларит» угольную ткань и карбон/кевларовую ткань (см. приложения V, рис 3). Далее каждая из половинок матрицы по отдельности была помещена в вакуумный полиэтиленовый мешок, предварительно на рабочие плоскости был уложен перфорированный полиэтилен с ветошью (см. приложение V, рис.4, рис.5, рис.6). Далее из полиэтиленового мешка был откачен воздух. Из-за вакуума на половинки матрицы давило атмосферное давление, что вынуждало излишки эпоксидной смолы выходить из угольных волокон через перфорированный полиэтилен и впитываться в ветошь (см. приложение V, рис.7). В таком состоянии матрица находилась сутки, чтобы эпоксидная смола затвердела. После этого две половинки склеивались между собой (см. приложение V рис.2, рис.3). Склеиваемые поверхности были предварительно механически обработаны в месте склеивания. В таком состоянии матрица находилась ещё неделю, чтобы прошла полная полимеризация эпоксидной смолы. После раскрытия матрицы с изделия были убраны лишние куски угольной ткани. В конце готовое изделие протиралось пропитанной растворителем ветошью, чтобы убрать разделитель. Формовка крыла из стеклоткани проходил чуть-чуть по другому сценарию. На матрицу размещалась стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой «Ларит». Далее на матрице формировался *силовой набор** из углеволокна, который также пропитывался эпоксидной смолой «Ларит» (см. приложение №VI, рис 5). Вакуумная формовка не применялась, так как количество эпоксидной смолы в полостях стеклоткани было без избытка. Подержав смолу около одного часа, чтобы она стала густой, проводилась подготовка к склеиванию: на поверхность помещались «петачи» из пенопласта, чтобы лучше связать нижнюю и верхнюю консоли (см. приложение VI, рис 6). Далее половинки склеивались (см. приложение VI, рис.3). Подождав около недели, чтобы эпоксидная смола полностью

полимеризовалась, матрица раскрывалась полуготовое изделие обтачивалось (см. приложение VI, рис 7, рис 8). Далее крыло было установлено на пилон, который был приклеен к хвостовой балке. На балку было приклеено хвостовое оперение. Фотография собранного планера в приложении VII (рис. 1).

Выполнив этап, связанный по поиску способа быстрого изготовления крыльев, теперь можно было переходить к выполнению финального этапа:

3) Испытать крылья, полученные этим способом.

Во время работы над проектом, с помощью матрицы было сделано три крыла из стеклоткани и одно крыло из углеткани. С помощью весов определили массу каждого крыла и пришли к выводу, что **1)** крылья из стеклоткани были намного легче крыла из карбона около на 7-10 грамм. **2)** крыло из карбона было намного жёстче крыльев из стеклоткани. Так крылья были все идентичные друг другу с геометрической точки зрения, то не было значения, с каким из них можно было проводить финальные эксперименты. Первый финальный эксперимент (эксперимент № 3) проводился в аэродинамической трубе. Результаты экспериментов приведены в следующих таблицах:

Исходя от данных, приведённых в таблицах № 1, 2, 3, 4 (см. Приложение VIII) можно сделать **вывод**, что, как и ожидалось, у крыла с **вогнуто-выпуклым крылом наибольшая подъёмная сила**. Дальше проводили второй финальный эксперимент (эксперимент № 4) на улице, дабы оценить полёт планера с крылом из матрицы с полётами планеров с произвольными аэродинамическими профилями. Процесс проведения эксперимента изображён в приложении № VII, рис. 3, рис.4, рис.5, рис.6. Исходя из результата эксперимент № 4, планера и крыльями из матрицы летали намного лучше, чем планера с произвольными аэродинамическими профилями. Лучшая попытка полёта у самолёта из матрицы длилась около 1 минуты, у самолёта с произвольным аэродинамическим профилем около 25 секунд.

III ВЫВОДЫ И АНАЛИЗ РАБОТЫ НАД ПРОЕКТОМ

Была проделана большая работа, в процессе которой было получено много новой, интересной, полезной информации о планерах, их характеристиках,

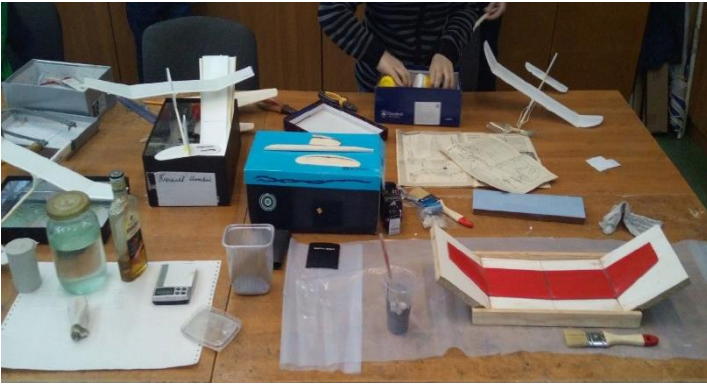
особенностях поведения планеров с точки зрения физики. Были усовершенствованы навыки обращения с композитными материалами, проектирования в программах по 3D-моделированию и управлению 3D принтером. В результате работы были достигнуты цели проекта: спроектировано и создано рабочее устройства/приспособления для создания крыльев свободнолетающей модели. Также во время работы над проектом были дополнительно исследованы аэродинамические явления, возникающие при полёте планера. Были выполнены все задачи, поставленные перед началом работы. **Словарь некоторых терминов** (в тексте отмечены курсивом со звёздочкой) в приложении X.

Список источников информации по проекту

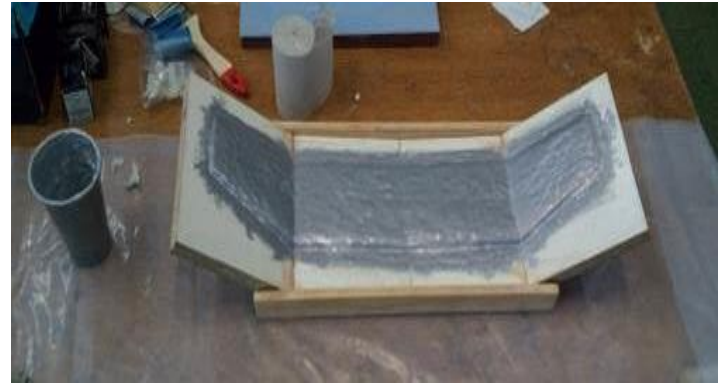
- 1) Аэродинамический профиль/ портал Википедия [Электронный ресурс] Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%8D%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%84%D0%B8%D0%BB%D1%8C
- 2) HGL 450 планер чертёж / портал Паркфлаер [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.parkflyer.ru/ru/blogs/view_entry/10056/
- 3) Чипурной Дмитрий Евгеньевич. Прочностные свойства углепластиковых материалов./ «АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ. Выпускная квалификационная работа (бакалаврская работа). 2019г. 61 страниц.
- 4) Справочник Авиационных Профилей/Справочник – 79 стр. Режим доступа: https://kipla.kai.ru/liter/Spravochnic_avia_profiley.pdf

5) Металка – свободнолетающая модель/ портал rcdesign [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://forum.rcdesign.ru/f37/thread201527.html>

Приложение I: Создание матрицы



(Рис.1). Приготовления перед работой.



(Рис.2). Первый слой (декоративный)



(Рис.3). Остальные слои



(Рис 5). Готовая матрица (в сборе)



(Рис.4). Готовая матрица (в разборе)



(Рис. 6) Завершение создания одной половинки матрицы (установка ребра жесткости (профильной трубы))



(Рис.7). Использованная «Болванка»

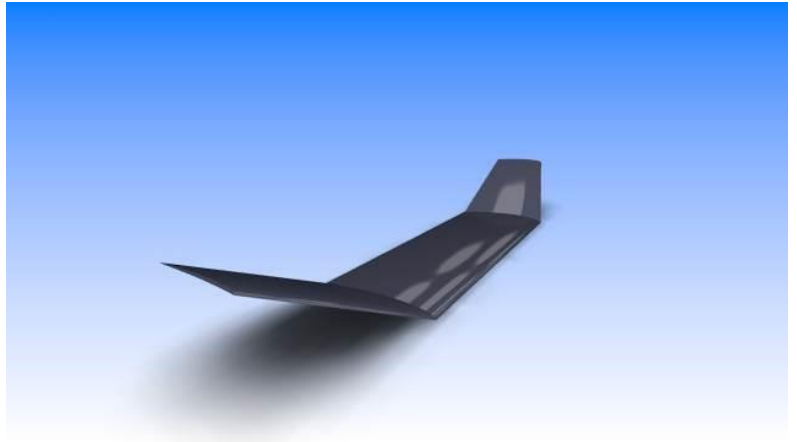
Приложение II: Моделирование/Создание крыла

Профиль В-8405-в

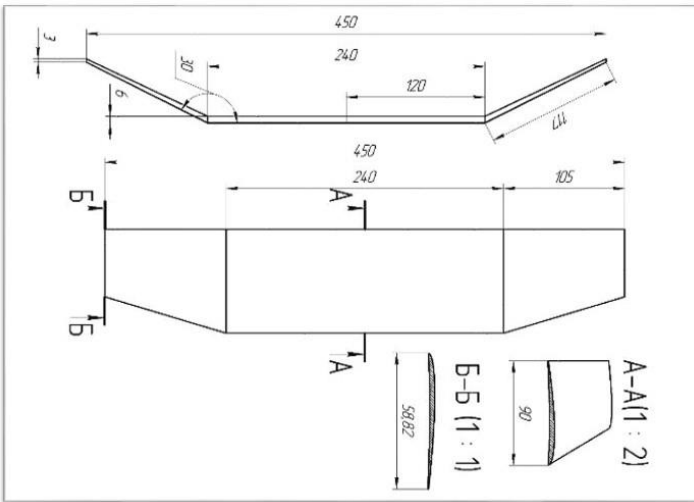


Геометрические характеристики			Аэродинамические характеристики			
X	Y _в	Y _н	α°	C _y	C _x	C _m
0	0,01	0,01				
0,0125	0,0285	0				
0,025	0,039	0,001				
0,05	0,054	0,0035				
0,075	0,065	0,0055				
0,1	0,0745	0,0075				
0,15	0,086	0,011				
0,2	0,0935	0,014				
0,25	0,0975	0,018				
0,3	0,0995	0,021				
0,4	0,097	0,0255				
0,5	0,0895	0,029				
0,6	0,079	0,028				
0,7	0,0645	0,024				
0,8	0,0465	0,0185				
0,9	0,029	0,01				
0,95	0,0195	0,005				
1	0,007	0				

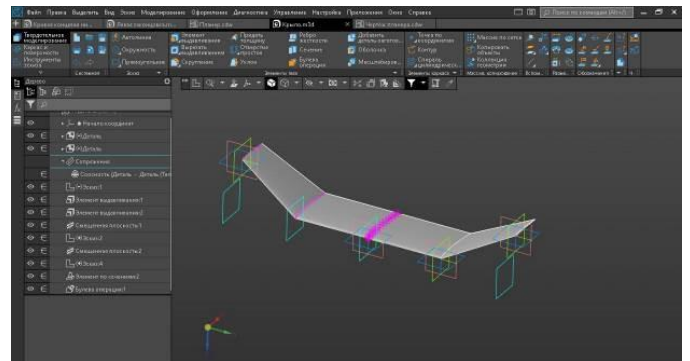
(Рис.1). Авиационный профиль крыла модели планера (чертёж)



(Рис.3). 3-D Визуализация крыла (изометрия).



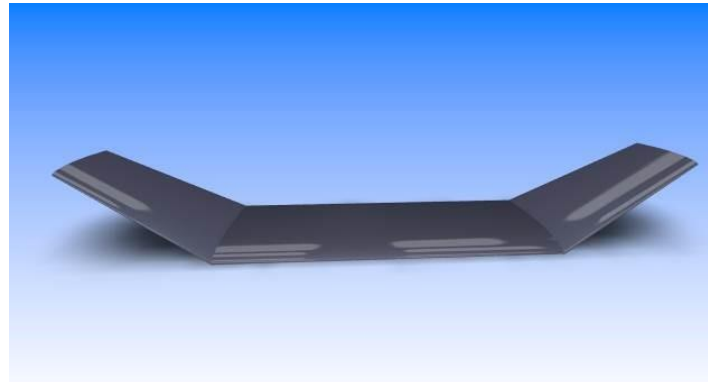
(Рис.2). Чертёж крыла



(Рис.4). Процесс моделирования



(Рис.5). Подготовленная «Болванка» перед началом создания матрицы

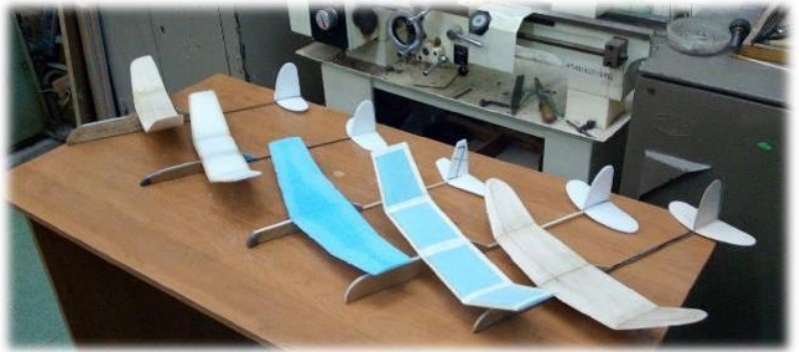


(Рис.6). Рис.1. 3-D Визуализация крыла (Вид спереди)

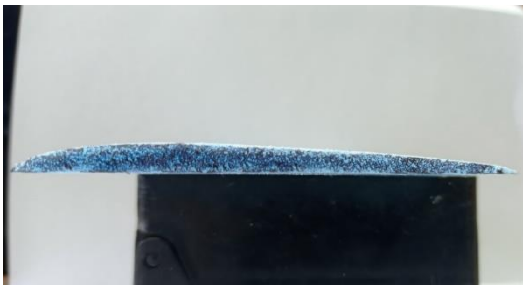
Приложение III: Эксперименты/Испытания



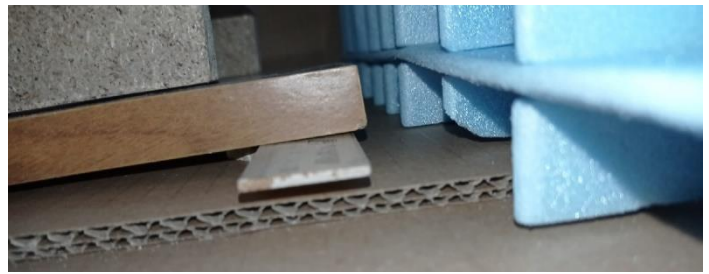
(Рис.1). Прототипы 1.



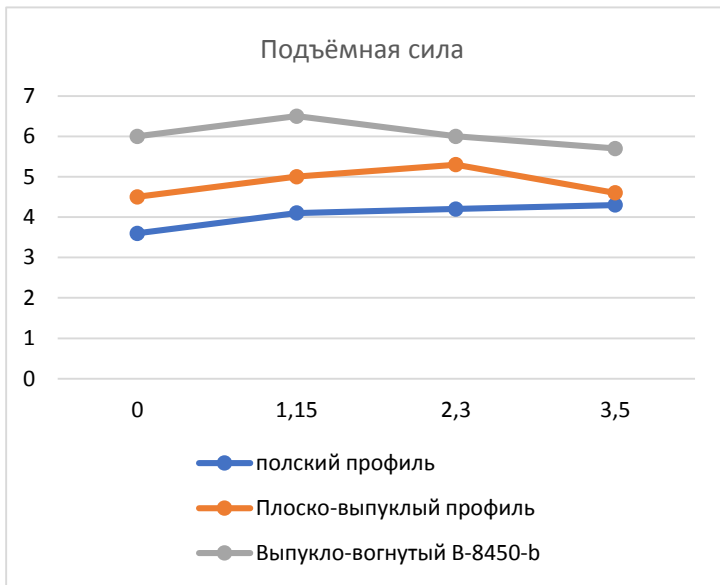
(Рис. 2). Прототипы 2.



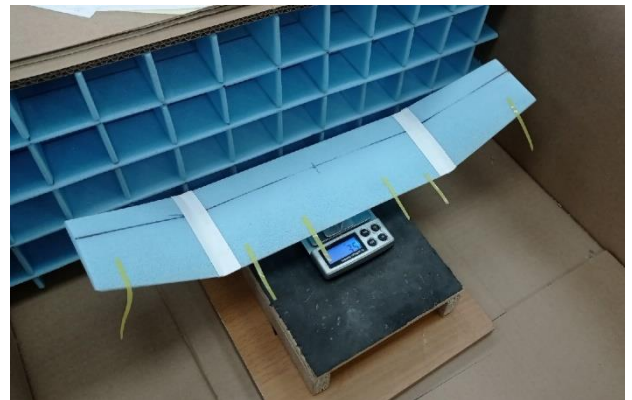
(Рис.3). Произвольный аэродинамический профиль (платно-выпуклый)



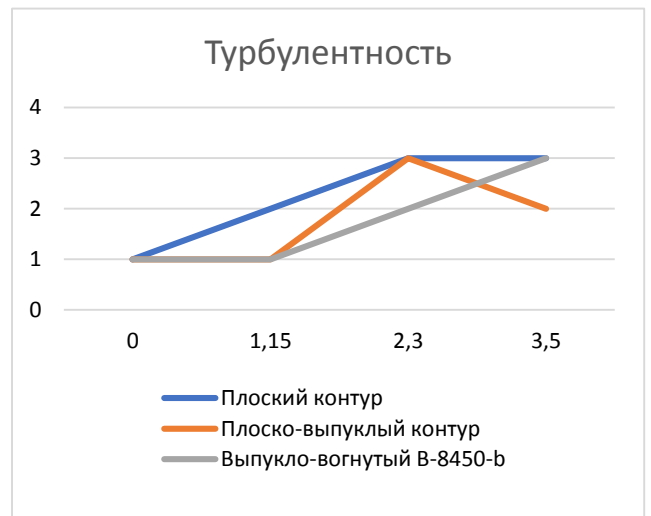
(Рис.4). Регулировка угла атаки (специальными деревянными плашками определённой длины)



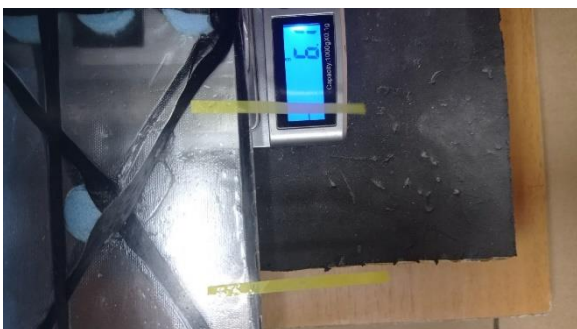
(Рис.5). График подъёмной силы (по вертикали подъёмная сила в граммах, по горизонтали угол атаки в градусах).



(Рис.6). Снятие показаний.

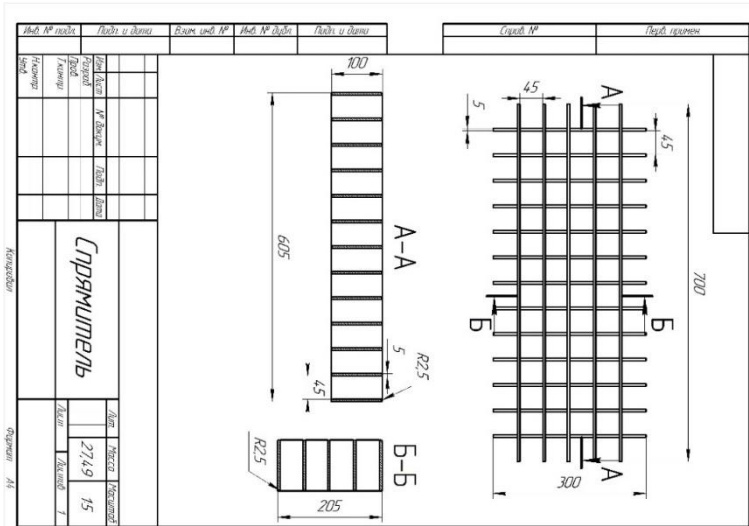


(Рис.7). График турбулентности потока воздушных масс (по вертикали амплитуда колебаний в мм, по горизонтали угол атаки в градусах)

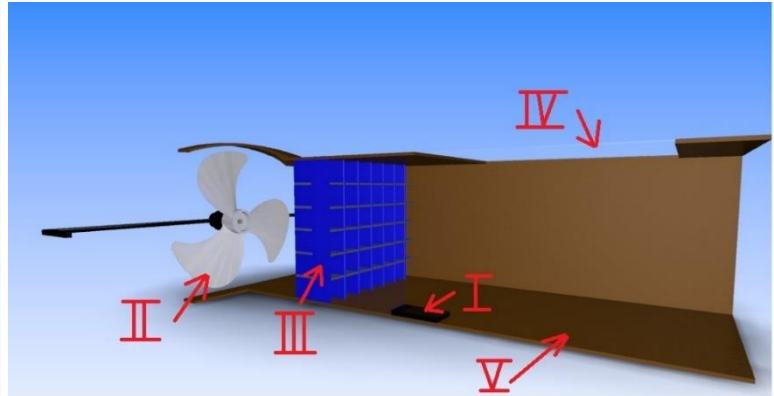


(Рис.8). Снятие показаний.

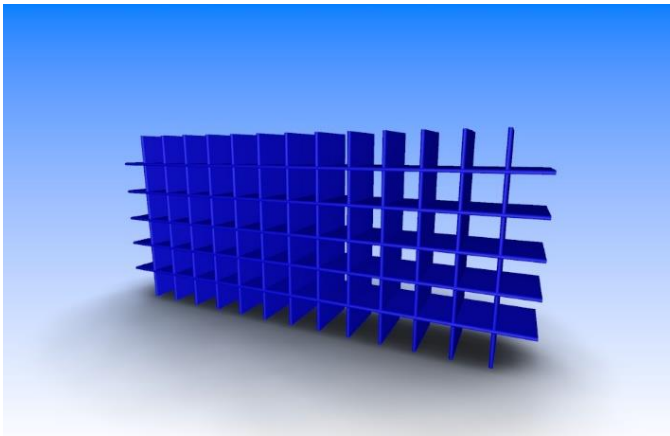
Приложение IV: Проектирование аэродинамической трубы



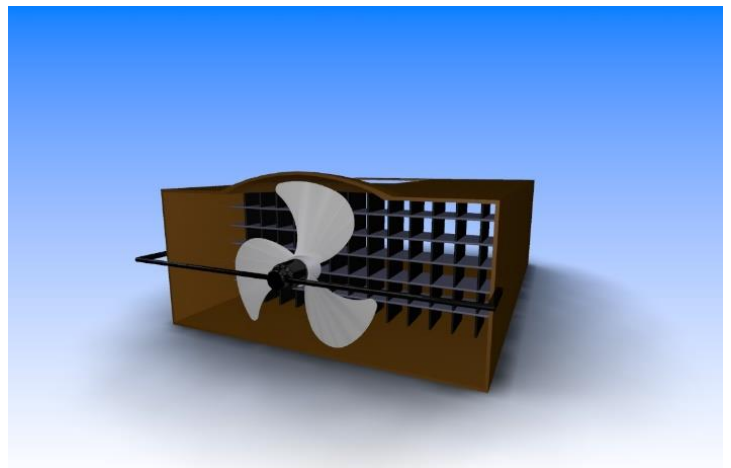
(Рис. 2). Чертеж спрямителя.



(Рис. 1). I-весы, II-Нагнетательный аппарат, III-спрямляющий аппарат, IV –окно для наблюдений показаний, V –труба.



(Рис.3). 3-D визуализация спрямляющего аппарата.



(Рис.4) 3-D визуализация аэродинамической трубы



(Рис.5) Процесс сборки аэродинамической трубы



(Рис.6.) Аэродинамическая труба (вид изнутри)

Приложение V: Формовка крыла



(Рис.1). Подготовленные материалы перед формовкой крыла. (Карбон (уголь), карбон/кевлар, угольное волокно)



(Рис.2). Пропитка материалов эпоксидной смолой



(Рис.3). Прижим материалов к матрице



(Рис.4). Подготовка к вакуумной формовке



(Рис.5). Подготовка к вакуумной формовке



(Рис.6). Начало вакуумной формовки

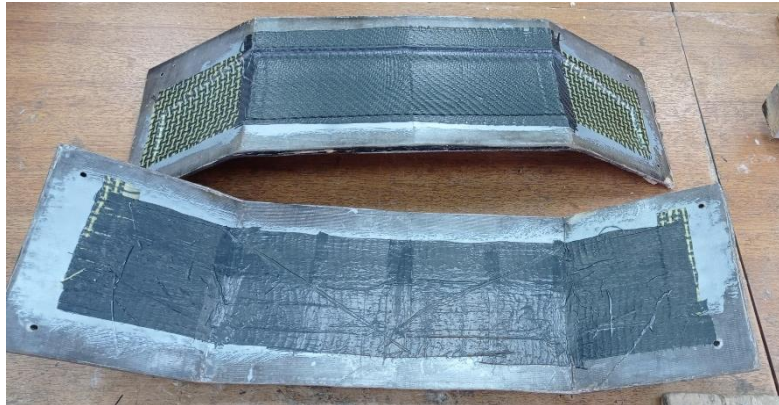


(Рис.7). Вакуумная формовка (создание вакуума)



(Рис. 8). Показания манометра (давление в полиэтиленовом мешке меньше атмосферного давления.)

Приложение VI: Формовка крыла



(Рис.1). Полимеризованный карбон/кевлар



(Рис. 2). Подготовка к склеиванию половинок (консолей)



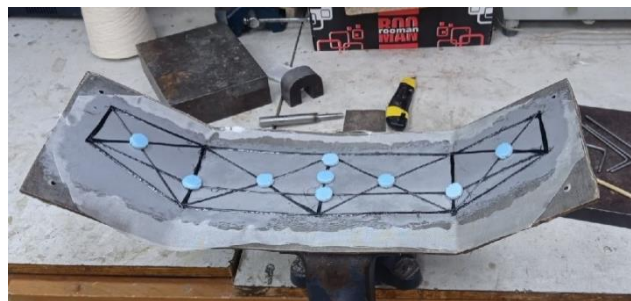
(Рис.3). Склеивание двух половинок в матрице



(Рис.4). Полуготовое изделие из углеткани и кевлара



(Рис.5). Укладка силового набора.



(Рис.6). Подготовка к склеиванию консолей



(Рис.7). Полуготовое изделие из стеклоткани



(Рис.8). Готовое изделие из стеклоткани

Приложение VII: Финальные испытания



(Рис.1). Собранная модель планера



(Рис.2). Процесс проведения эксперимента в аэродинамической трубе с крылом из матрицы



(Рис.3). Перед испытаниями



(Рис.4). Процесс запуска модели



(Рис.6). Первые секунды полёта (набор высоты за счёт приобретённого начального импульса)



(Рис.5). Полёт планера

Приложение VIII: Результаты экспериментов в аэродинамической трубе.

Таблица № 1

Угол атаки (в градусах)	Подъёмная сила (в граммах)	
	Плоский профиль	Плоско-выпуклый профиль
~ 0,00°	~ 3,6 г.	~ 4,5 г.
~ 1,15°	~ 4,1 г.	~ 5,0 г.
~ 2,30°	~ 4,2 г.	~ 5,3 г.
~ 3,50°	~ 4,3 г.	~ 4,6 г.

Таблица № 2

Угол атаки (в градусах)	Турбулентность (амплитуда колебаний на плоскости <i>центроплана*</i> <i>аэродинамических полосок*</i> в мм.)	
	Плоский профиль	Плоско-выпуклый Профиль
~ 0,00°	~ 1 ± 0,5 мм.	~ 1 ± 0,5 мм.
~ 1,15°	~ 2 ± 0,5 мм.	~ 1 ± 0,5 мм.
~ 2,30°	~ 3 ± 1,0 мм.	~ 3 ± 1,0 мм.
~ 3,50°	~ 3 ± 1,0 мм.	~ 2 ± 0,5 мм.

Таблица № 3

Угол атаки (в градусах)	Подъёмная сила (в граммах)		
	Плоский	Плоско-выпуклый	Вогнуто-выпуклый
~ 0,00°	~ 3,6 г.	~ 4,5 г.	~ 6,0 г.
~ 1,15°	~ 4,1 г.	~ 5,0 г.	~ 6,5 г.
~ 2,30°	~ 4,2 г.	~ 5,3 г.	~ 6,0 г.
~ 3,50°	~ 4,3 г.	~ 4,6 г.	~ 5,7 г.

Таблица № 4

Угол атаки (в градусах)	Турбулентность (амплитуда колебаний на плоскости <i>центроплана*</i> <i>аэродинамических полосок*</i> в мм.)		
	Плоский	Плоско-выпуклый	Вогнуто-выпуклый
~ 0,00°	~ 1 ± 0,5 мм.	~ 1 ± 0,5 мм1.	~ 1 ± 0,5 мм
~ 1,15°	~ 2 ± 0,5 мм.	~ 1 ± 0,5 мм.	~ 1 ± 0,5 мм
~ 2,30°	~ 3 ± 1,0 мм.	~ 3 ± 1,0 мм.	~ 2 ± 0,5 мм.
~ 3,50°	~ 3 ± 1,0 мм.	~ 2 ± 0,5 мм.	~ 3 ± 1,0 мм.

Приложение IX

Таблица № 1

Устройство (способ производства крыла)	Принцип работы	Плюсы	Минусы
<ul style="list-style-type: none"> ● Фрезерный станок с ЧПУ 	<ul style="list-style-type: none"> ● Заготовка из бальзы (дерево) фрезеруется 	<ul style="list-style-type: none"> ● Крыло получалось очень качественным 	<ul style="list-style-type: none"> ● Затраты электроэнергии ● Занимало много времени ● Станок требовал постоянного контроля во время работы ● Сложная и долгая настройка оборудования перед работой
<ul style="list-style-type: none"> ● 3-D принтер 	<ul style="list-style-type: none"> ● Крыло постепенно печаталось по слоям 	<ul style="list-style-type: none"> ● Быстрая настройка оборудования перед настройкой ● Не требовало контроля 	<ul style="list-style-type: none"> ● Напечатанное крыло было очень тяжёлое ● Крыло было деформировано кручением из-за особенности печати ● Занимало много времени ● Затраты электроэнергии
<ul style="list-style-type: none"> ● Матрица 	<ul style="list-style-type: none"> ● Две консоли крыла ● формируются в матрице, а после склеиваются друг с другом 	<ul style="list-style-type: none"> ● Крыло получалось достаточно лёгким относительно своей прочности ● Не требует контроля 	<ul style="list-style-type: none"> ● Долгое изготовление матрицы (2месяца)

Словарь некоторых терминов
(в тексте отмечены курсивом со звездочкой)

Нагнетательный аппарат – устройство, предназначенное для увеличения потока воздушных масс в аэродинамической трубе.

Спрямяющий аппарат – элемент аэродинамической трубы, предназначенный для выравнивания потоков воздушных масс в аэродинамической трубе.

Турбулентный поток - характеризуется неупорядоченным движением частиц газа, при котором скорость в каждой точке потока меняется по направлению и по величине. Для турбулентного потока характерно наличие пульсаций скорости, давления, температуры и концентрации вещества.

Ламинарный поток — однонаправленный поток воздуха, в котором скорости воздуха вдоль параллельных линий тока одинаковы.

Центроплан - центральная часть крыла (или оперения) самолёта, соединяющая правую и левую полуплоскости крыла (оперения).

Аэродинамическая полоска – полоска из скотча, прикрепляемая к крылу для визуализации поведения потока воздушных масс после обтекания поверхности крыла.

Угол атаки – это угол между *хордой крыла** и вектором набегающего потока воздуха.

Хорда (от греч. *chorde* - струна) **крыла** - длина отрезка линии, ограниченного носиком и хвостиком сечения **крыла** вертикальной плоскостью в направлении полета. Обычно концевая **хорда крыла** самолета меньше корневой.

Аэродинамический профиль — форма поперечного сечения крыла, лопасти (пропеллера, ротора или турбины), паруса или другой гидроаэродинамической конструкции.

Силовой набор – конструкционные элементы, предназначенные для повышения жёсткости крыла. Обычно к таким элементам относятся *нервюра*, *лонжерон**, *передняя* и *задняя кромки**.

Удлинение крыла - (λ) — относительный геометрический параметр, определяемый как отношение: $\lambda = \frac{l}{b}$, где l — длина крыла, b — длина хорды крыла.

Нервюра (франц. *nervure*, лат. *nervus* — «жила, сухожилие») — элемент поперечного силового набора каркаса крыла, оперения и других частей летательного аппарата (или космического судна), предназначенный для придания им формы профиля.

Лонжерон (фр. *longeron*, от *longer* — идти вдоль) — основной силовой элемент конструкции многих инженерных сооружений (самолётов, автомобилей, вагонов, мостов, кораблей и другого), располагающийся по длине конструкции.

Крыло—несущая поверхность, имеющая в сечении по направлению потока профилированную форму и предназначенная для создания аэродинамической подъёмной силы.

Пилона -несущая обтекаемая конструкция для установки вынесенных агрегатов летательного аппарата (крыла, двигателя)

Хвостовое оперение:

1.Киль-поверхность, предназначенная для обеспечения устойчивости по углу скольжения летательного аппарата.

2.Стабилизатор - поверхность, предназначенная для обеспечения продольной устойчивости летательного аппарата.

3.Хвостовая балка

Планер - безмоторный летательный аппарат тяжелее воздуха, поддерживаемый в полёте за счёт аэродинамической подъёмной силы, создаваемой на крыле набегающим потоком воздуха.