

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Проектирование и эксплуатация автомобилей

(наименование)

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Автомобили и автомобильный сервис

(направленность (профиль)/специализация)

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Оптимизация конструкции спортивного болида Formula Student

Обучающийся

Т.И. Хафизов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент Л.Л. Чумаков

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

## **Аннотация**

В бакалаврской работе оптимизирована конструкция спортивного болида Formula Student. Проанализирована конструктивная особенность гоночного болида.

Проведен обзор работ по конструктивным решениям характеристик болида. Выбраны оптимальные характеристики и внедрены улучшения ходовой и несущей системы, аэродинамические элементы, педальный узел и система впуска.

Основной целью работы является: оптимизация конструкции спортивного болида Formula Student.

Представлена 3D-модель общей компоновки автомобиля с акцентом на проектирование элементов несущей системы, подвески, тормозной системы, системы впуска и аэродинамических элементов, выполненной в программных пакетах Компас 3D, Ansys, Lotus Suspension Analysis.

## Содержание

Введение .....	4
1 Проект Formula Student .....	5
1.1 Проект Formula Student, как научно-технический проект ТГУ, актуальность и задачи проекта .....	5
1.2 Параметры и характеристики гоночного болида Formula Student.....	6
2 Основы проектирования гоночного болида.....	9
2.1 Несущая система гоночного болида.....	9
2.2 Аэродинамические элементы гоночного болида.....	20
2.3 Ходовая гоночного болида. ....	29
2.4 Блок педалей.....	38
2.5 Система впуска .....	44
3 Компьютерная модель гоночного болида.....	47
Заключение .....	49
Список используемой литературы и используемых источников .....	50

## Введение

Гоночные болиды спроектированы для участия в кольцевых гонках. Гонки по кольцевой трассе – один из самых зрелищных видов гонок. Не редко в соревнованиях участвуют студенты ВУЗов и колледжей.

Formula Student – это проект гоночного болида студентов ТГУ. Впервые проект начал реализовываться в 2007 году. За все этапы своего существования автомобиль перетерпел множество изменений. В 2020 году был создан восьмой гоночный болид «Red Scorpion G3». Он успешно выступил на соревнованиях «Formula Student Russia 2020». Также в 2020 году команда Togliatti Racing Team стала трехкратным чемпионом России.

Гоночный болид помимо своих скоростных характеристик должен отвечать требованиям безопасности. Кольцевые гонки очень динамичные и высокоскоростные, поэтому безопасность пилота – это основной критерий которым должен обладать спортивный болид. Во время гонок автомобили часто сталкиваются с препятствиями или друг с другом. В связи с этим необходимо снабдить болид защищающими от столкновения элементами. Ими могут служить энергопоглощающие элементы, установленные на бампера автомобиля. Они способны забрать на себя основную силу удара и защитить пилота от травм.

Основной целью работы является: оптимизация конструкции спортивного болида Formula Student.

Задачами работы являются:

- рассмотреть актуальность и основные понятия,
- спроектировать несущую систему автомобиля,
- спроектировать аэродинамические элементы автомобиля,
- спроектировать ходовую часть спортивного болида,
- спроектировать педальный узел,
- спроектировать систему впрыска.

Объектом исследования является спортивный болид Formula Student.

## **1 Проект Formula Student**

### **1.1 Проект Formula Student, как научно-технический проект ТГУ, актуальность и задачи проекта**

«В Европейских странах одним из важнейших направлений является развитие активных методов обучения и международное сотрудничество на уровне реализации новых образовательных программ и признания их результатов. В связи с этим одной из задач в рамках реализации инновационной образовательной программы ТГУ является построение конкурентоспособной образовательной программы подготовки инженеров международного уровня.

Реализация концепции создания мастерской образовательных, спортивных и инженерных проектов «Formula Student» в Институте машиностроения (ИнМаш) не только создаст стартовый импульс к реализации новых подходов и технологий при обучении инженерным специальностям, но и позволит отработать форму взаимодействия сотрудников ИнМаш и инженеров промышленных предприятий, описать новый способ организации обучения. Помимо прочего, участие студентов ТГУ в проекте «Formula Student» при организации SAE (Сообщество автомобильных инженеров, США), позволит не только понять и привести в процесс обучения новые требования к инженерным технологиям и обучению, но и позиционировать ТГУ как участника международного рынка образовательных услуг.

Апробация предлагаемой модели образовательного процесса, обеспечит непрерывное формирование компетенций студентов применительно к решению перспективных производственных задач, связанных с инжинирингом конструкций, технологий, материалов, востребованных в ближайшие 5-10 лет или обозримом будущем.» [1]

Проект разделен на несколько частей. В первой части происходит взаимодействие кафедры ТГУ и студенческих научных сообществ, на втором этапе подключаются отделы ТГУ, на завершающем лаборатория университета. Это взаимодействие помогает довести проект до логического финала, представив опытный образец болида. Проект направлен, в том числе на повышение рейтинга университета, путем стимулирования научно-технической работы студентов.

## **1.2 Параметры и характеристики гоночного болида Formula Student**

«Основные требования к конфигурации болида проекта Formula Student, согласно техническому регламенту:

- болид должен быть одноместным,
- болид должен иметь четыре открытых колеса, вынесенных за пределы кокпита,
- кокпит болида должен быть открытым,
- колёса с каждой стороны болида не должны находиться на одной прямой.» [12]

«К требованиям конфигурации болида с открытыми колёсами относят следующие требования (рисунок 1):

- для каждого из колёс определяется вертикальная зона, в котором находится колесо, на 75 мм больше наружного диаметра соответствующего колеса. В данной зоне запрещено размещение иных конструктивных элементов болида;
- при осмотре болида сверху верхняя половина колеса (180° поверхности колеса) не должна перекрываться иными конструктивными элементами болида;

- при осмотре болида сбоку колёса должны быть полностью видны - никакие иные конструктивные элементы болида не должны их перекрывать;
- управляемые колёса должны иметь положение, соответствующее прямолинейному движению болида.» [6]

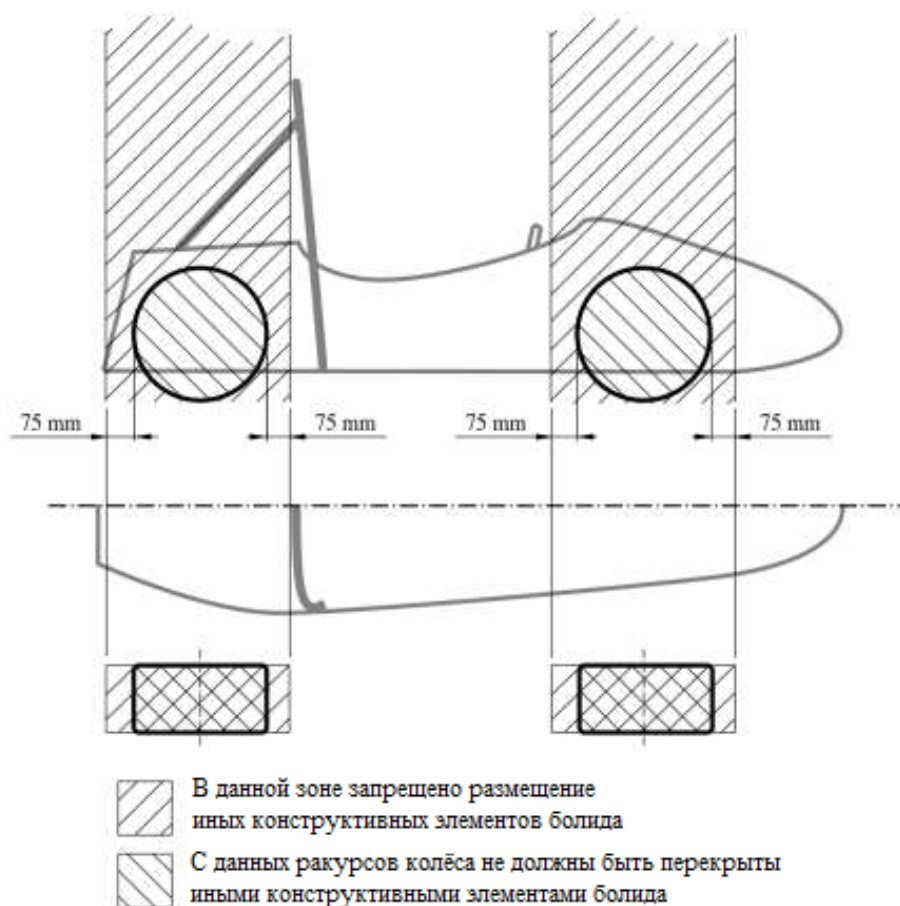


Рисунок 1 – Болид с колесами открытого типа

«Колёсная база болида, определяемая как расстояние между центром пятна контакта передней шины и центром пятна контакта задней шины, должна составлять не менее 1525 мм. Все четыре колеса болида должны иметь строго прямолинейное направление.» [2]

Колейность колес разделена пропорционально, меньшая колея должна составлять  $\frac{3}{4}$  размера большей колеи.

Клиренс не должен быть высоким, так как это способствует потере скорости, но и быть не меньше предельно допустимого значения, чтоб не соприкоснуться с дорогой. Любые конструктивные элементы или аэродинамический обвес, которые будут соприкасаться с дорогой при движении, будут вести к потере прижимной силы и могут привести к аварии, и причинить значительный ущерб, как болиду, так и жизни и здоровью пилота и зрителей.

Место пилота должно быть сконструировано таким образом, чтоб при перевороте болида голова и руки пилота не ударились о землю. (рисунок 2) [14].



Рисунок 2 – Безопасное положение пилота в болиде.

Место пилота также должно иметь обзор не менее на 100 градусов спереди и по бокам.

Выводы: проект Formula Student - это научно-практический проект студентов ТГУ, реализация которого позволяет студентам на практике создать настоящий гоночный болид.

Гоночный болид должен отвечать ряду требований к конфигурации болида, способностью развивать высокую скорость при этом оставаясь безопасным для пилота и зрителей гонок.



## 2 Основы проектирования гоночного болида

### 2.1 Несущая система гоночного болида

«При разработке гоночного болида требуется анализ конструкционной прочности отдельных элементов. На некоторые наложены жесткие ограничения по регламенту проекта Formula Student. Одним из базовых элементов является рама гоночного болида. Конструкция рамы состоит из гнутых и прямых стальных труб сваренных между собой и образующих единый каркас.» [8]

«При выборе сортамента труб необходимо стремиться к максимальному снижению веса рамы, но при этом обеспечить достаточную прочность всей несущей конструкции.

У данной проектируемой рамы отсутствие в задней части распорных элементов компенсируется установкой двигателя, который замыкает общую конструкцию. Вес представленной рамы составил 27 кг. На рисунке 3 представлена динамика изменения веса рамы гоночного болида по годам проектирования, начиная с 2014 года.» [3]

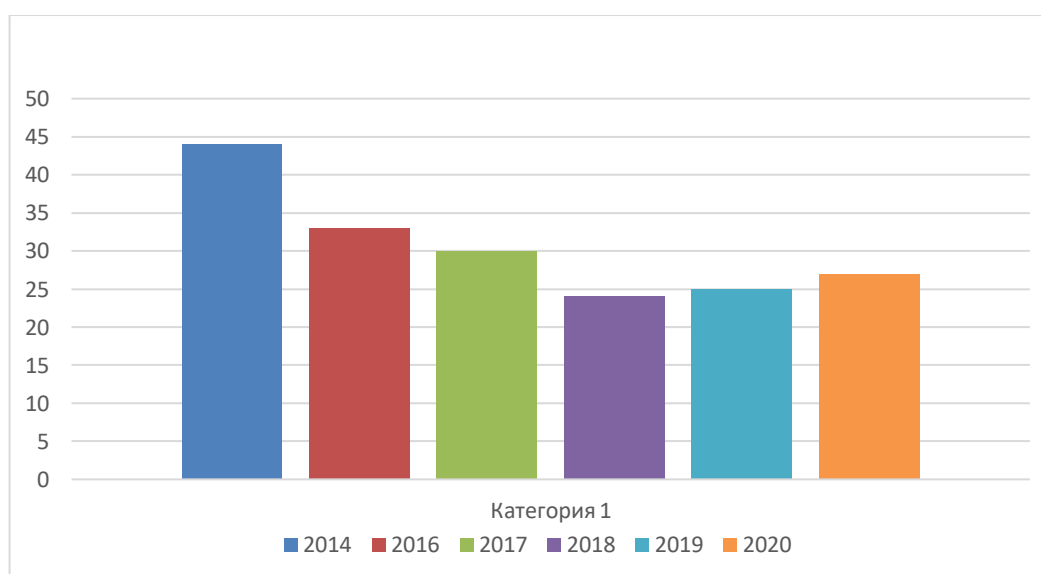


Рисунок 3 – Вес гоночного болида в разные периоды

«Одним из условий является межузловая триангуляция, то есть такое расположение элементов рамы, где нагрузка в спроецированной плоскости, прикладываемая в любом направлении, на любой узел, даёт только усиление в элементах рамы.» [12]

На рисунке 4 изображена схема трубчатой рамы болида, где типы сечения и диаметры трубы обозначены цветом.

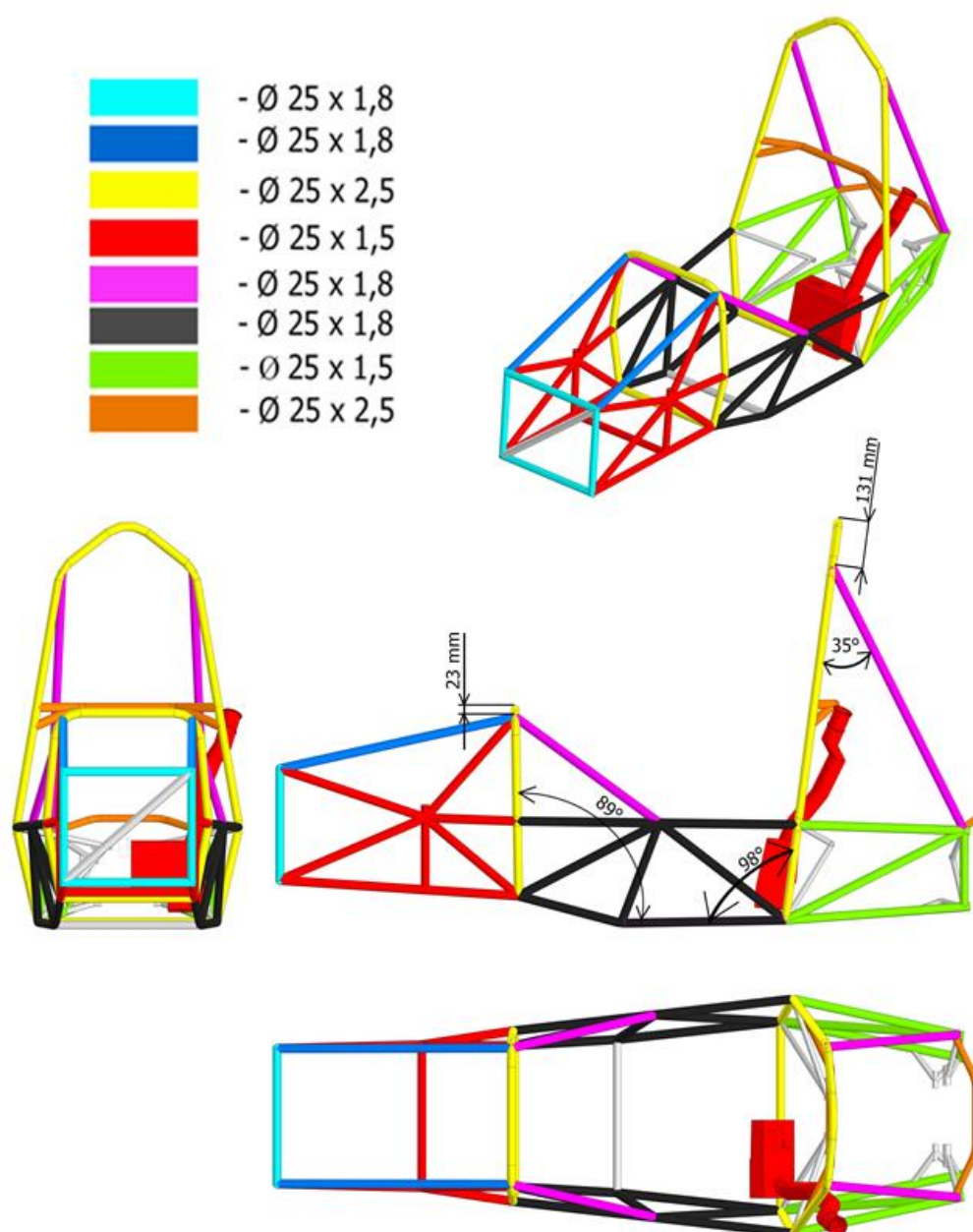


Рисунок 4 – Цветовая схема сечения труб рамы гоночного болида

На рисунках 5-8 изображены итоги анализа передней и задней дуги. При моделировании использовали конечно-элементный анализ. При всех воздействиях на конструкцию деформация не должна превышать 25 мм.

На рисунках 5 и 7 представлены граничные условия, а на рисунках 6 и 8 суммарные перемещения деформируемых элементов в миллиметрах.

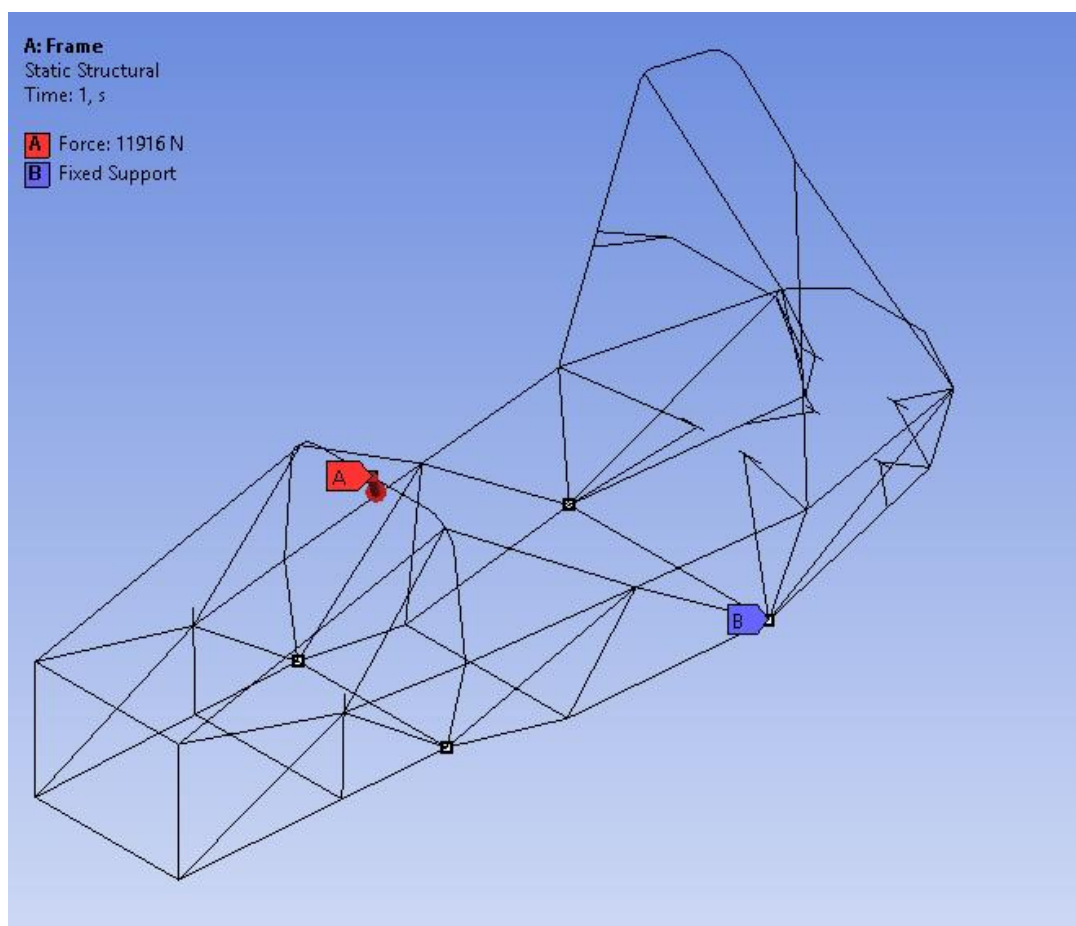


Рисунок 5 –Условия при нагружении передней дуги

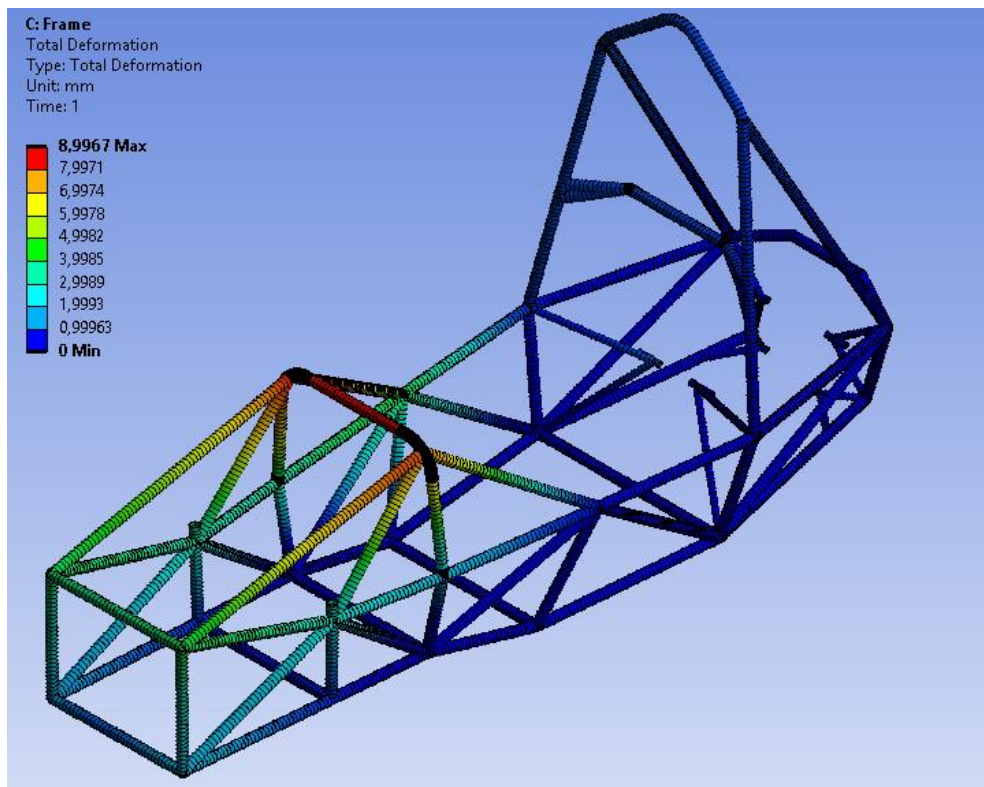


Рисунок 6 – Перемещения при нагружении передней дуги

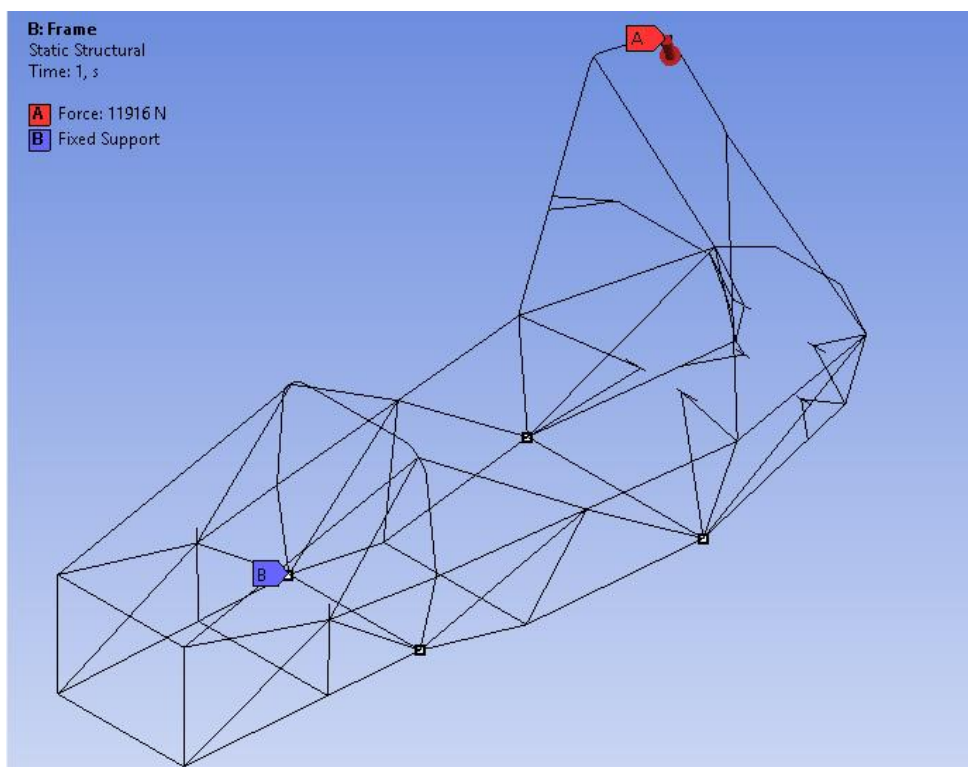


Рисунок 7 –Условия при нагружении главной дуги

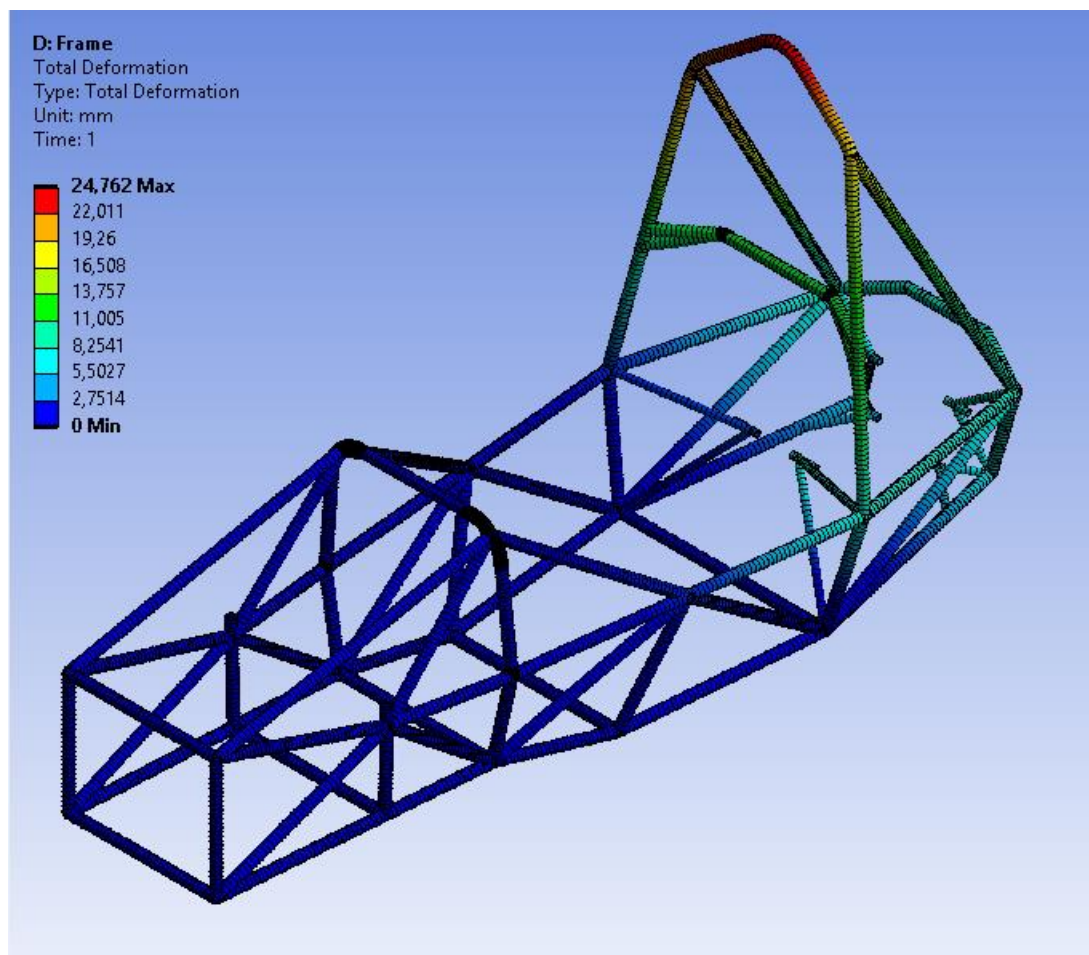


Рисунок 8 – Перемещения при нагружении главной дуги

Максимальная деформация составила 24,8 мм, что в пределах нормы.

«Граничное условие: жесткая фиксация узлов по обеим сторонам передней и главной дуг и в местах соединения главной дуги и трубы каркаса, где крепится плечевой ремень.

Точки приложения нагрузки – это действительные точки крепления на передней балке.» [14]

На рисунках 9 и 11 изображены граничные условия, а на рисунках 10 и 12 – результаты моделирования.

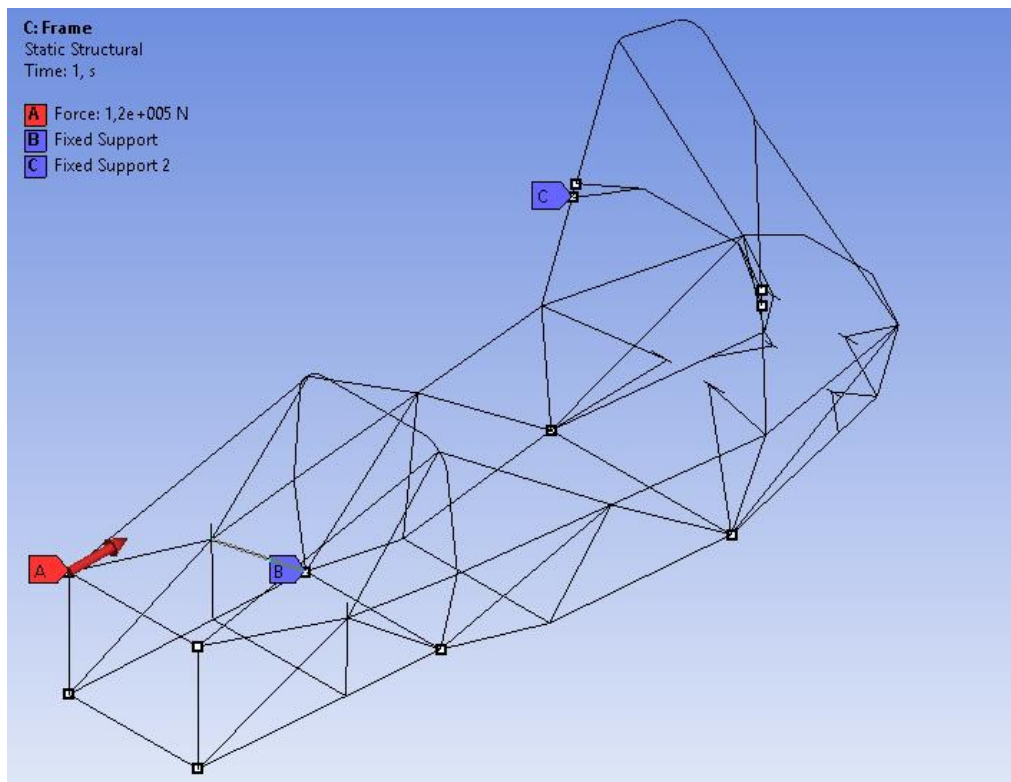


Рисунок 9 – Условия при нагружении по оси

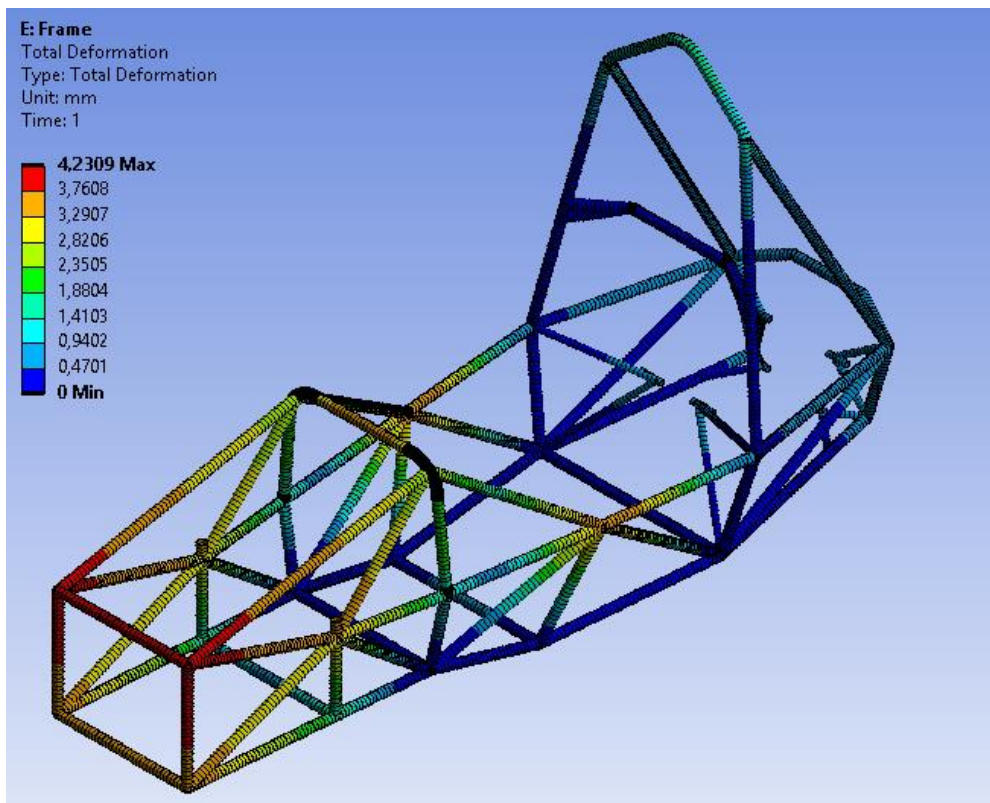


Рисунок 10 – Перемещения при нагружении по оси

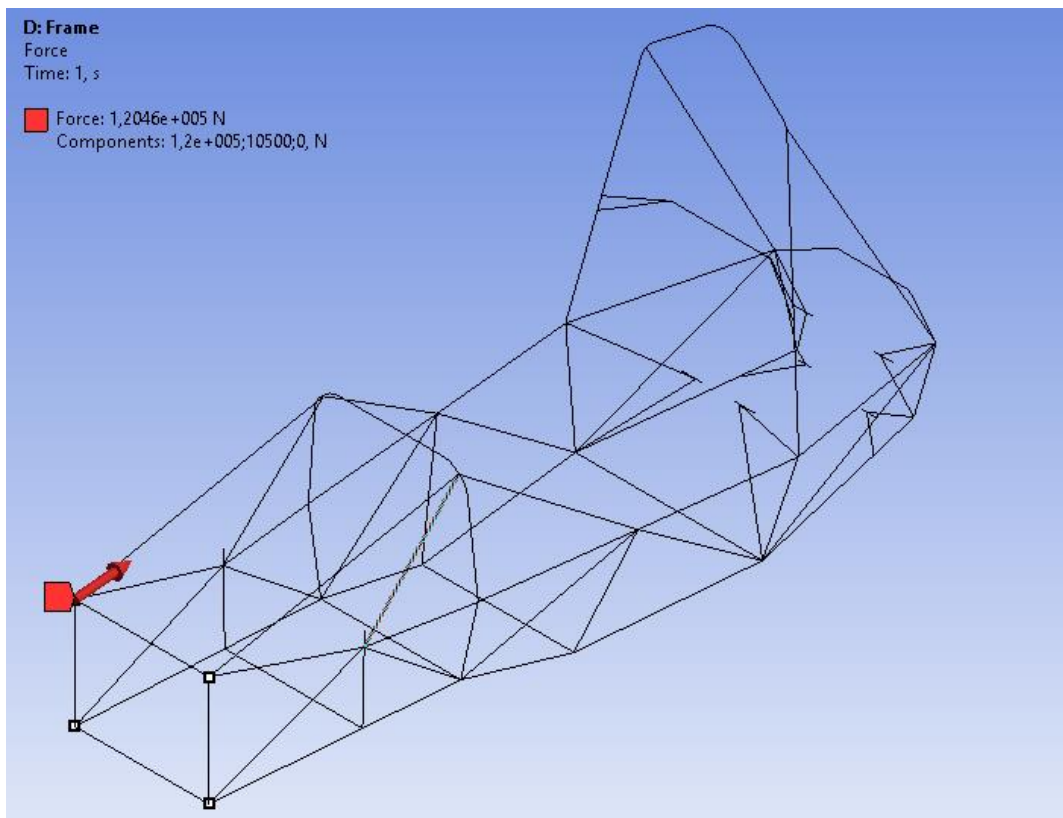


Рисунок 11 – Условия при нaгружeнии вне оси

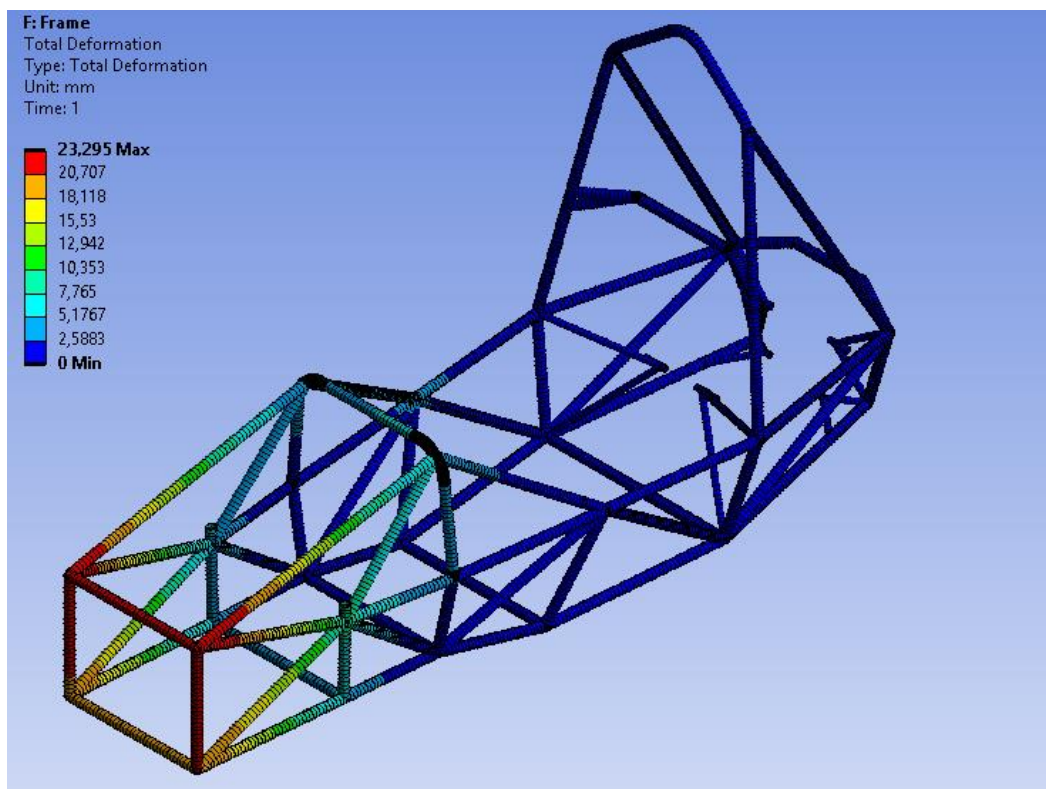


Рисунок 12 – Перемещения при нaгружeнии вне оси

«Видно, что деформация при нагружении вне оси находится на грани допустимых значений.

И заключительным этапом анализа рамы гоночного болида является оценка ее жесткости на кручение.

Граничное условие: жесткая фиксация узлов в местах крепления рычагов задней подвески.

Точка приложения нагрузки – средняя точка контакта переднего кулака с рычагами передней подвески. Нагрузки прикладывались удаленно к точкам крепления рычагов передней подвески на раме болида.

Определяли перемещение точки, показывающей величину максимальной деформации в плоскости передней дуги и, рассчитывали жесткость конструкции.

На рисунке 13 представлено направление осей системы координат модели.» [4]

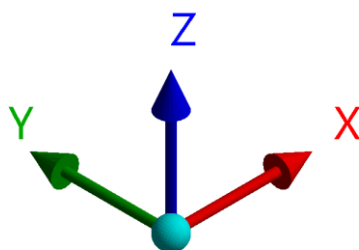


Рисунок 13 – Направление осей

«На рисунке 14 представлены пограничные токи фиксации рамы для анализа на жесткость, а на рисунках 15-17 представлены итоги проектирования перемещений под нагрузкой по осям Y и Z.

Анализ жесткости проводили по смещению точки по оси Y (рисунок 16) и по оси Z (рисунок 17) и по результатам рассчитывали угол смещения.» [16]



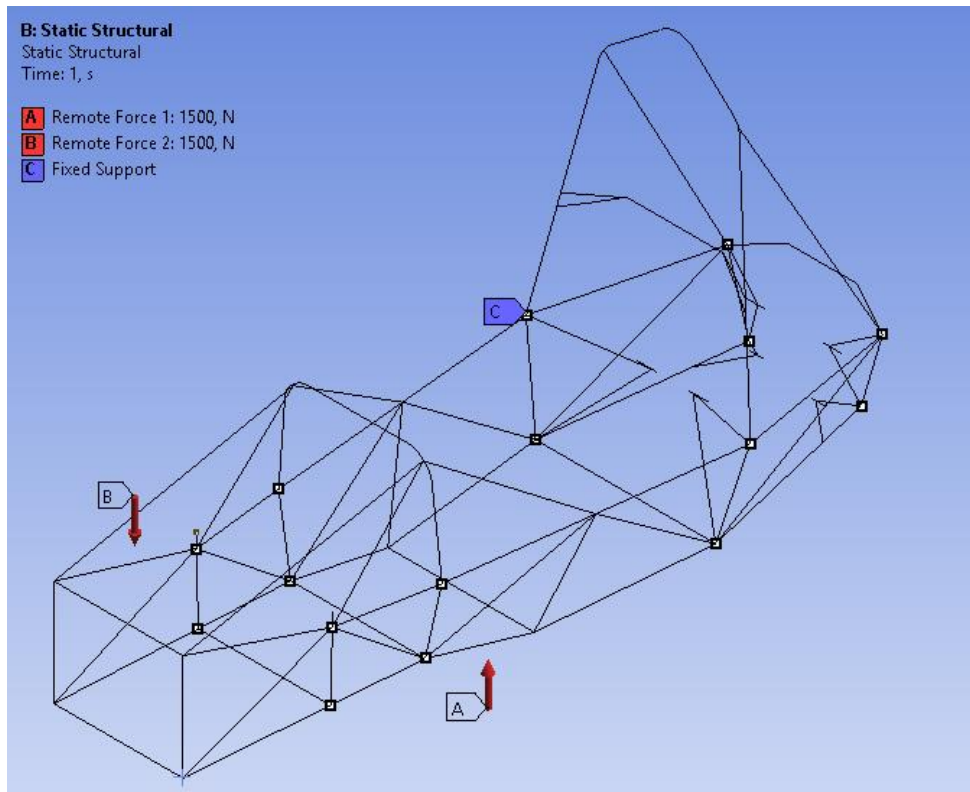


Рисунок 14 –Условия при анализе жесткости

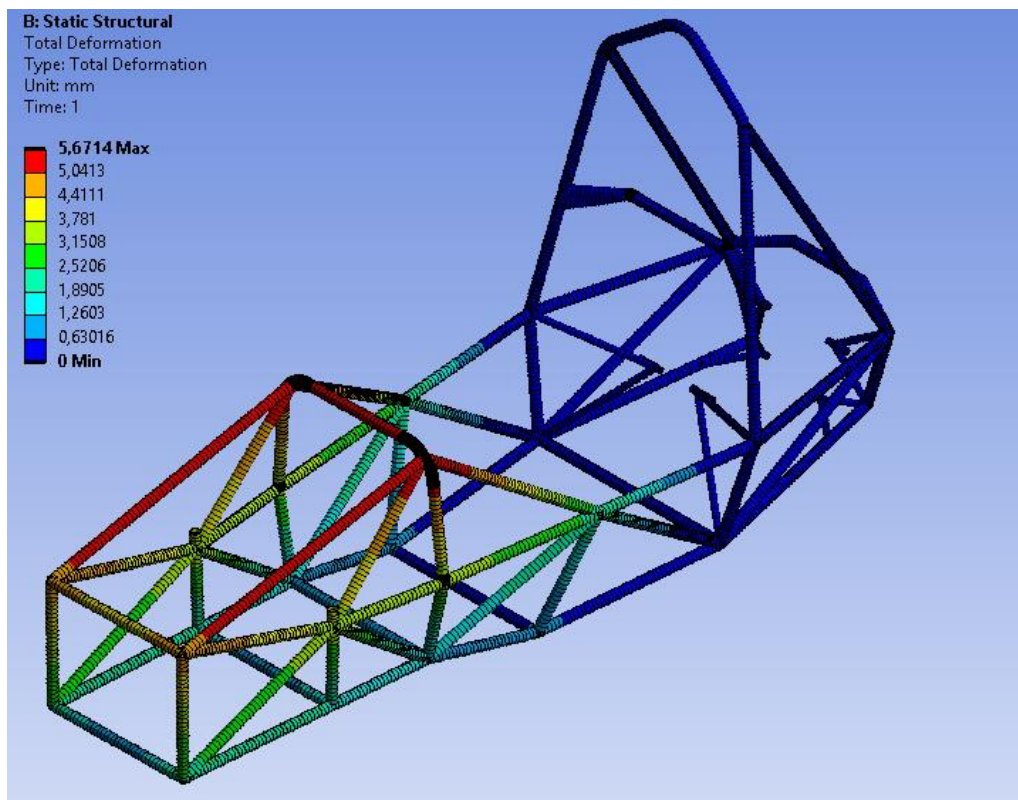


Рисунок 15 –Перемещения при анализе жесткости

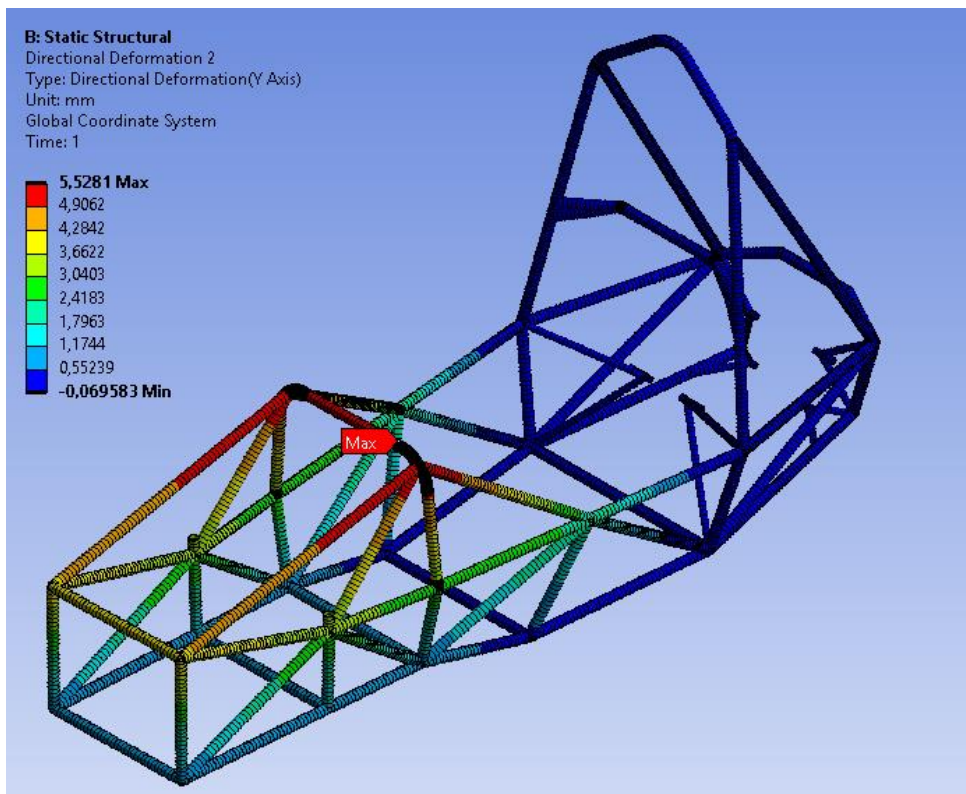


Рисунок 16 – Перемещения по оси Y при анализе жесткости

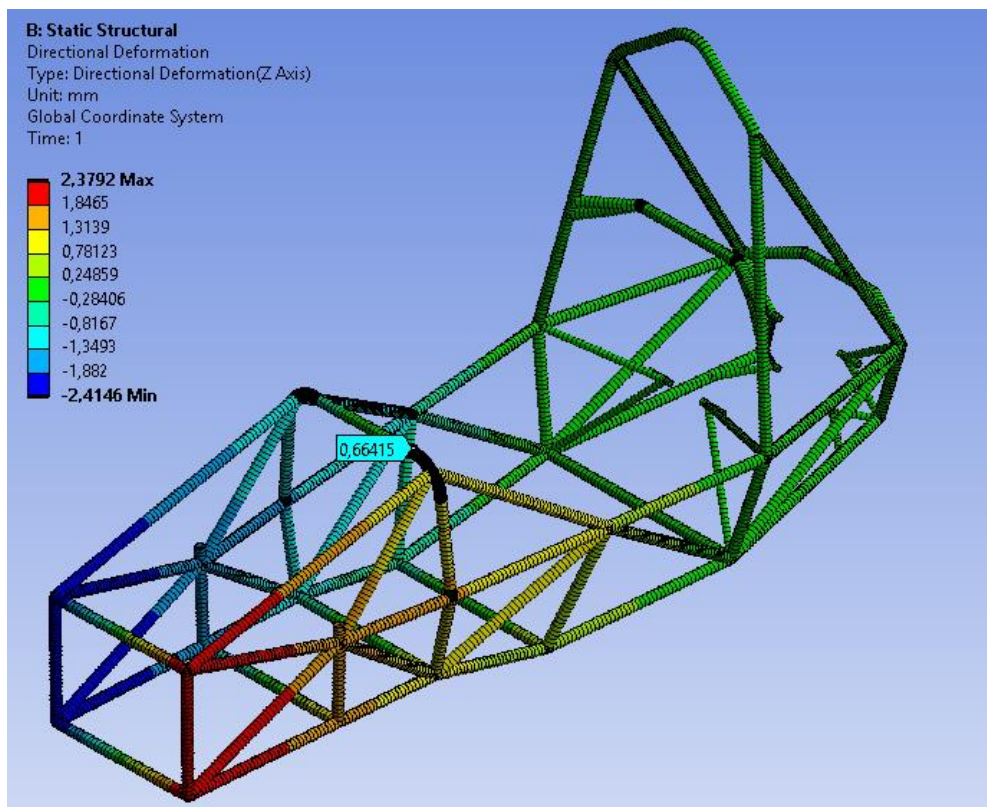


Рисунок 17 – Перемещения по оси Z при анализе жесткости

Жесткость составила 2235 Н·м/град, что при весе рамы 27 кг является хорошим результатом.

Стандарт, который определяет специфику и порядок прочностного расчета изделий из термопластов. Учитывает сварку полимерных материалов в отличие, например от расчетов по металлу. Номограммы долговременной прочности термопластов приведены в указанном стандарте.

В основу положены номограммы долговременной прочности термопластов, которые позволяют определить допускаемое напряжение в пластике в зависимости от длительности времени эксплуатации и температуры. Что в значительной степени отличает данный вид расчетов, например от сварных изделий из металлов, где допускаемое напряжение является постоянной (в разумных пределах температур) величиной. Номограммы являются неотъемлемым приложением стандарта. После определения допускаемого напряжения в материале расчет ведется стандартными приемами прочностного расчета.

Что не менее важно, стандарт устанавливает коэффициент запаса прочности по толщине листового полимера в зависимости от вреда, который может быть причинен аварийной ситуацией, а также учитывает фактор сварки, т.е. технологию и метод сварки (экструзионная сварка, сварка горячим воздухом, сварка встык нагретым инструментом), который отображается коэффициентом прочности сварного соединения от прочности исходного листа. Для данного изделия, согласно стандарта с учетом сварки встык нагретым инструментом и экструзионной сварки поправки на коэффициент сварки по швам и коэффициент запаса прочности.

Расчет предполагает расчет напряжений в материале на основании номограммы долговременной прочности термопластов, в котором отражается зависимость допустимого напряжения в материале от температуры и времени эксплуатации. Исходя из данных по номограмме долговременной прочности принимаем допустимое напряжения в полимере и вычисляем расчетную толщину стенки пластика. Также данный стандарт предусматривает запас

прочности с учетом фактора сварки и коэффициента запаса прочности изделия. Стандарт определяет для данного изделия с учетом сварки встык нагретым инструментом и экструзионной сварки поправки на коэффициент сварки по швам и коэффициент запаса прочности.

Таким образом применение стандарта при расчете данной конструкции гарантирует не только увеличенный запас прочности изделия, но и обосновывает заданный срок эксплуатации.

## **2.2 Аэродинамические элементы гоночного болида**

«После испытаний болида «Black Scorpion G2» на соревнованиях «Formula Student Italy 2019», «Formula Student Moscow 2019» были проведены:

- сбор мнений и замечаний всех судей конструкции;
- более углубленное изучение теории по этому вопросу;
- анализ всех данных по аэрообвесу.» [8]

«Исходя из этого, были выявлены основные направления модернизации уже имеющегося аэродинамического обвеса: подбор профиля, который позволит обеспечить больше прижимной силы при той же скорости; снижение собственного веса аэродинамического пакета; разработка механизма регулировки углов атаки для переднего антикрыла.

Исходя из задач модернизации, был выбран ряд профилей, дающих наибольшую прижимную силу при меньшем лобовом сопротивлении при движении воздуха с одинаковой скоростью. Выбор профиля сделан на основе данных о прижимной силе.

Для подбора профиля антикрыла использовалась база данных профилей. Исходя из нужных нам параметров, был выбран профиль Gottingen 804.» [5]

На рисунке 18 представлена информация о внешнем виде профиля.

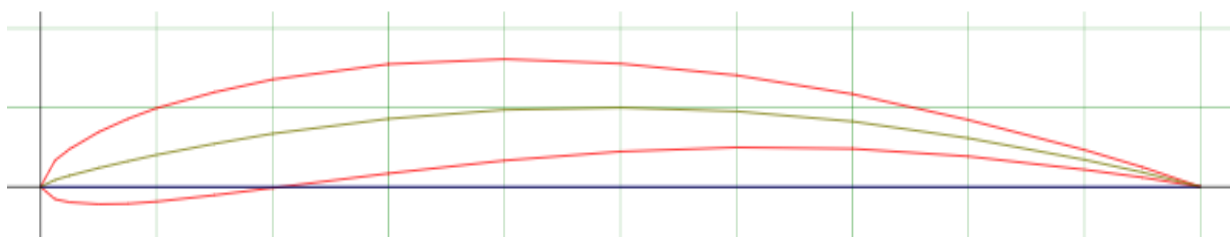


Рисунок 18 – Внешний вид профиля

На рисунке 19 представлены характеристики крыла от угла и зависимости характеристик профиля.

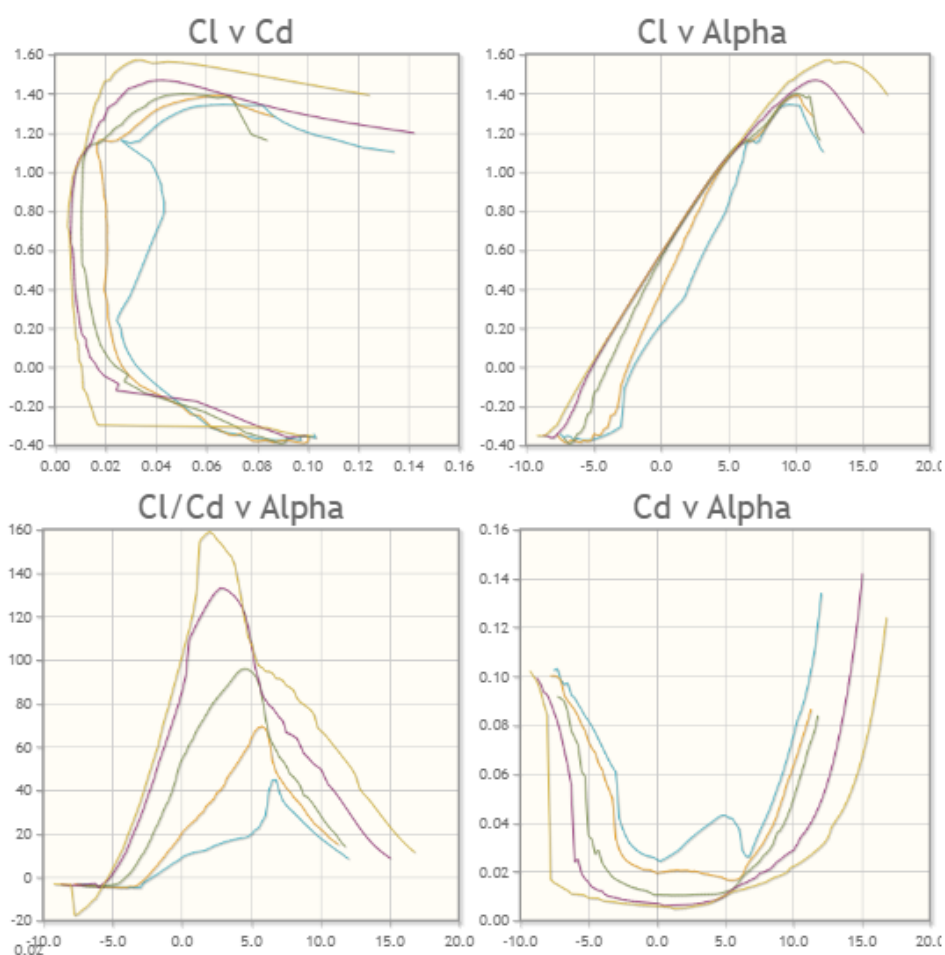


Рисунок 19 – Зависимости характеристик профиля

«Для просчета прижимной силы были проведены расчеты в программе Solidworks. В качестве расчетной схемы выбраны скорости 80, 60 и 40 км/ч,

что обусловлено максимальной скоростью на трассе в соревнованиях Formula Student, средней скорости и скорости выхода из поворота соответственно.

Для этих условий была спроектирована 3D-модель переднего и заднего антикрыла, и на тело модели наложена конечно-элементная сетка.

Рассматривали отдельно два варианта продува: переднее антикрыло и заднее в неактивном положении и переднее антикрыло и заднее в активном положении антикрыльев.» [6]

На рисунках 20-28 представлены проекты напряжения: давления воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на различных скоростях при варьировании положения антикрыльев.

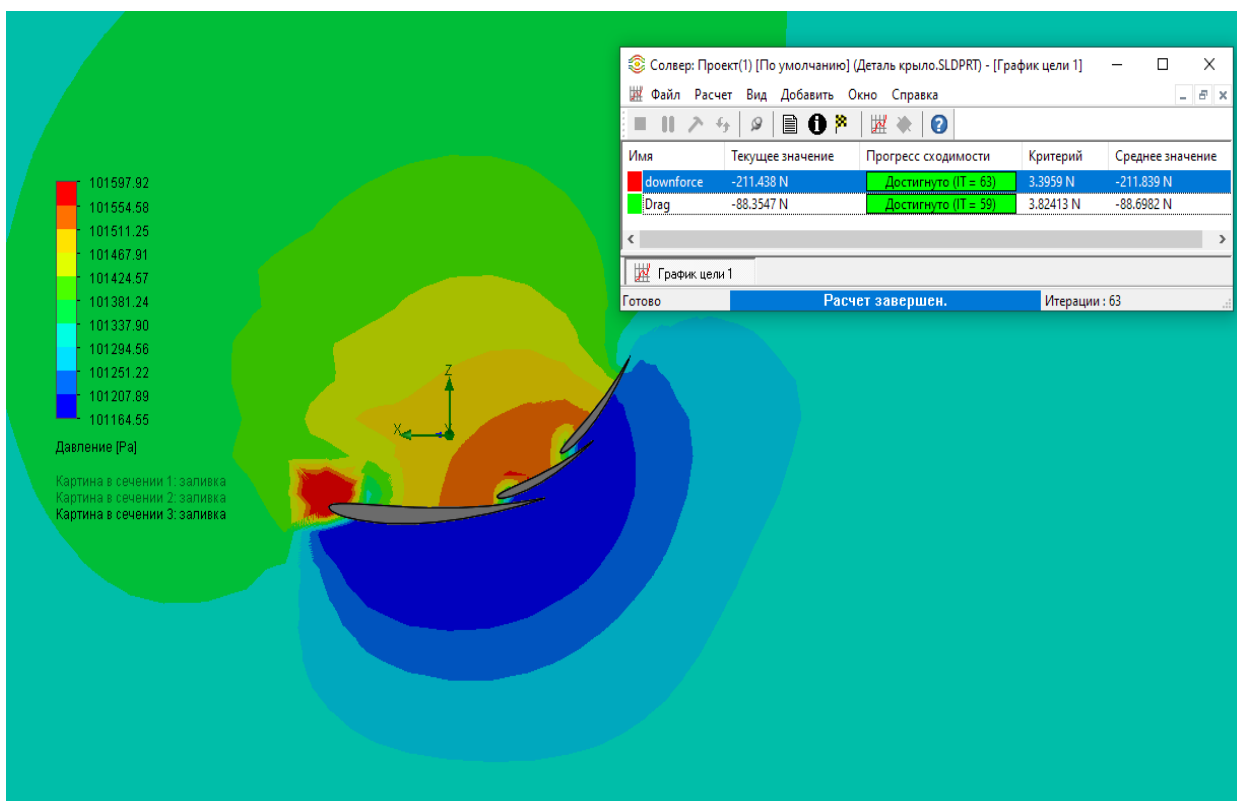


Рисунок 20 – 80 км/ч, положение антикрыльев – активное, анализ характеристик параметров: прижимной силы, силы сопротивления и давления воздуха

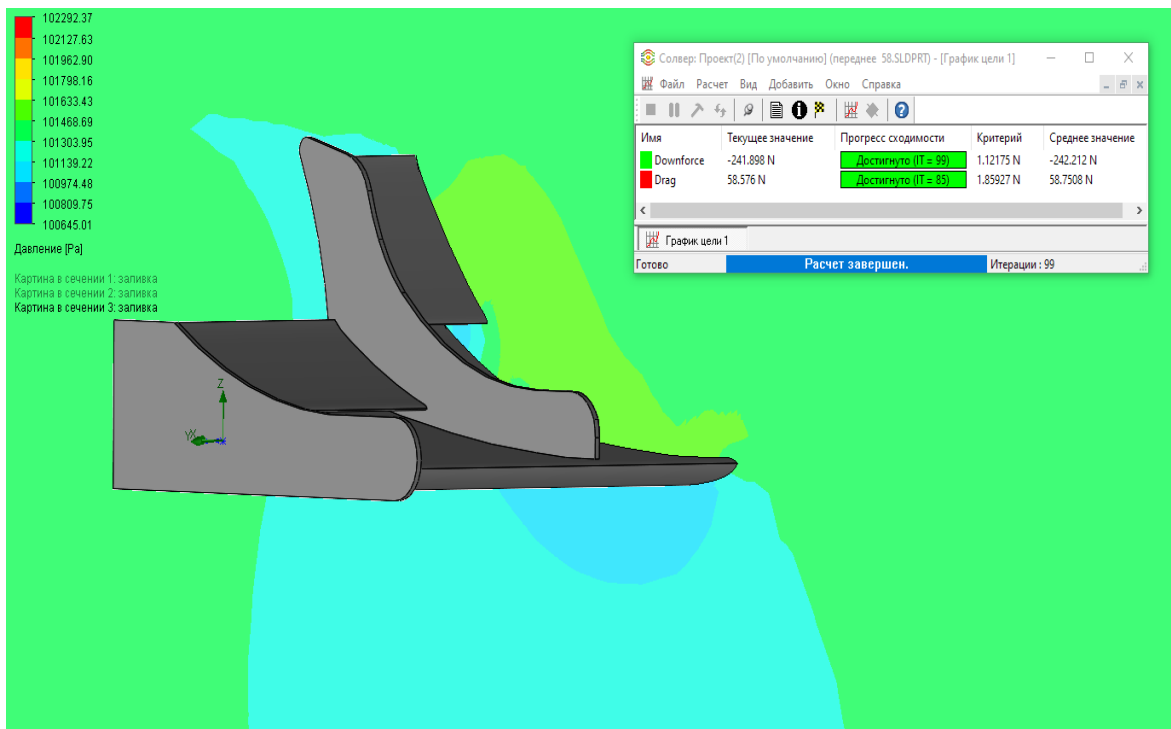


Рисунок 21 – 80 км/ч, переднее крыло, анализ характеристик параметров: прижимной силы, силы сопротивления и давления воздуха

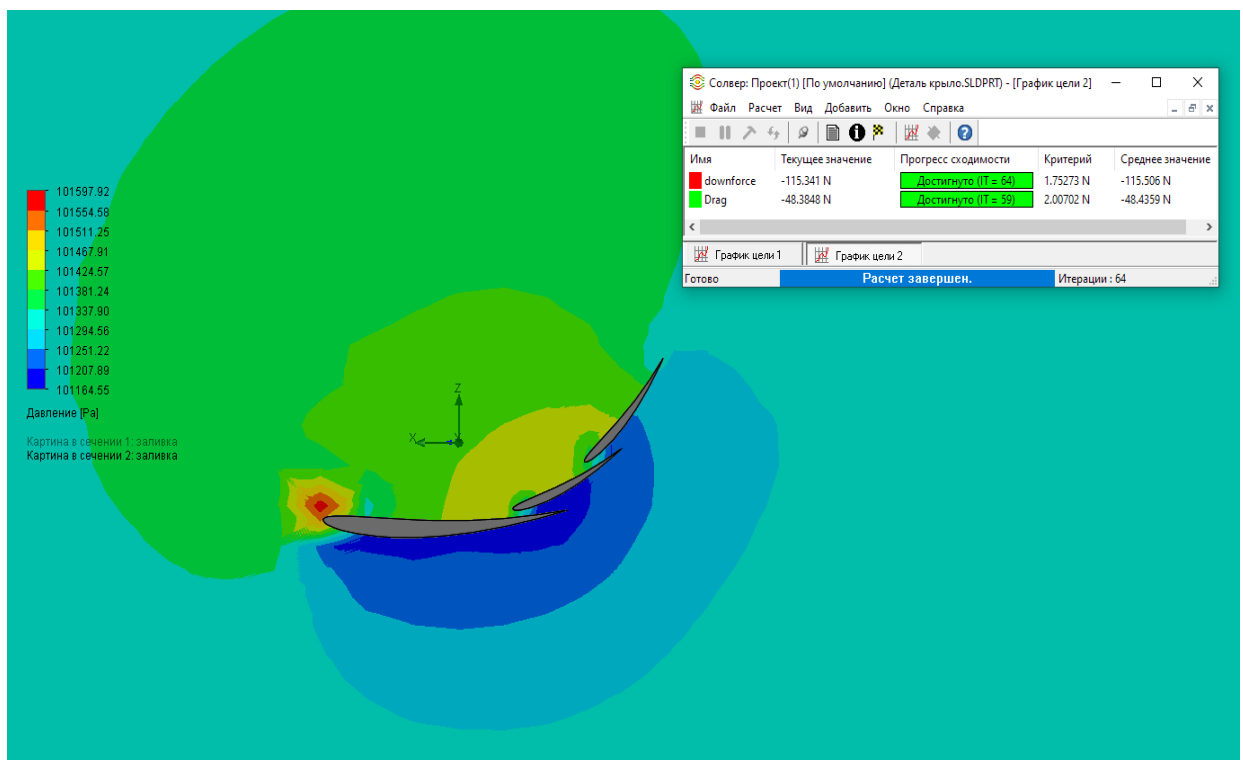


Рисунок 22 – 60 км/ч, положение антикрыльев – активное, анализ характеристик параметров: прижимной силы, силы сопротивления и давления воздуха

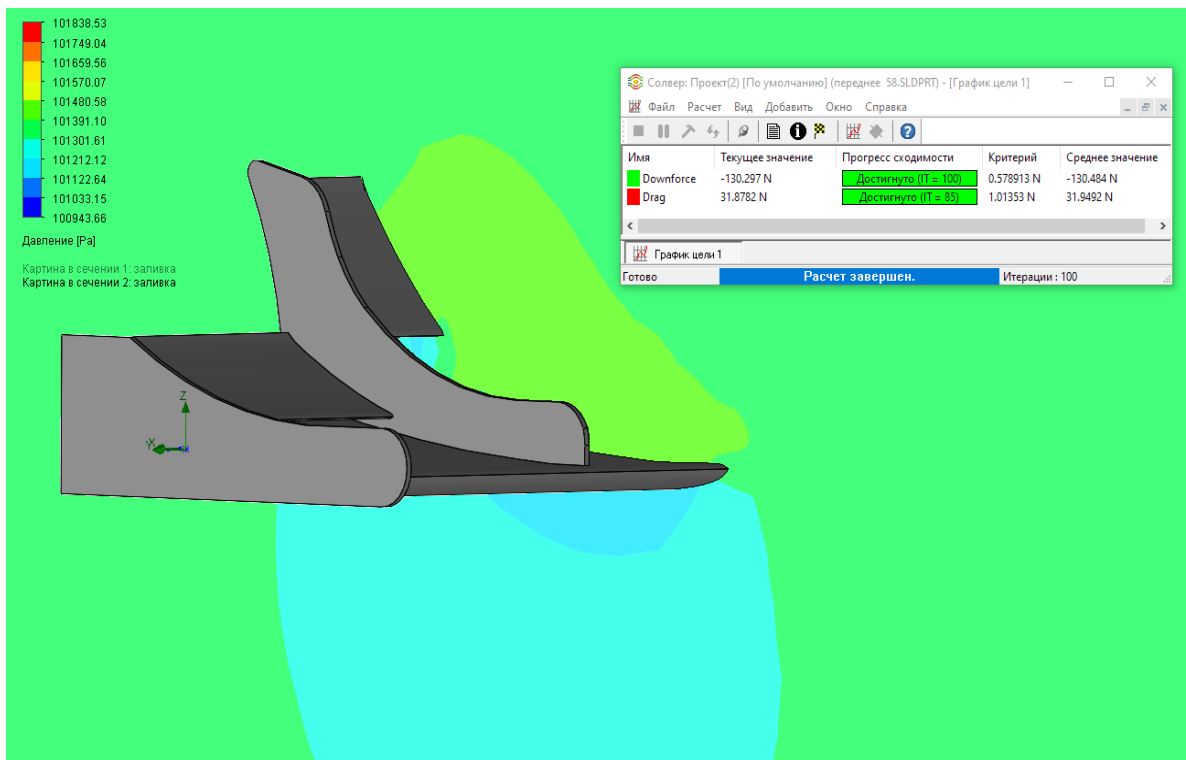


Рисунок 23 – 60 км/ч, переднее крыло, анализ характеристик параметров: прижимной силы, силы сопротивления и давления воздуха

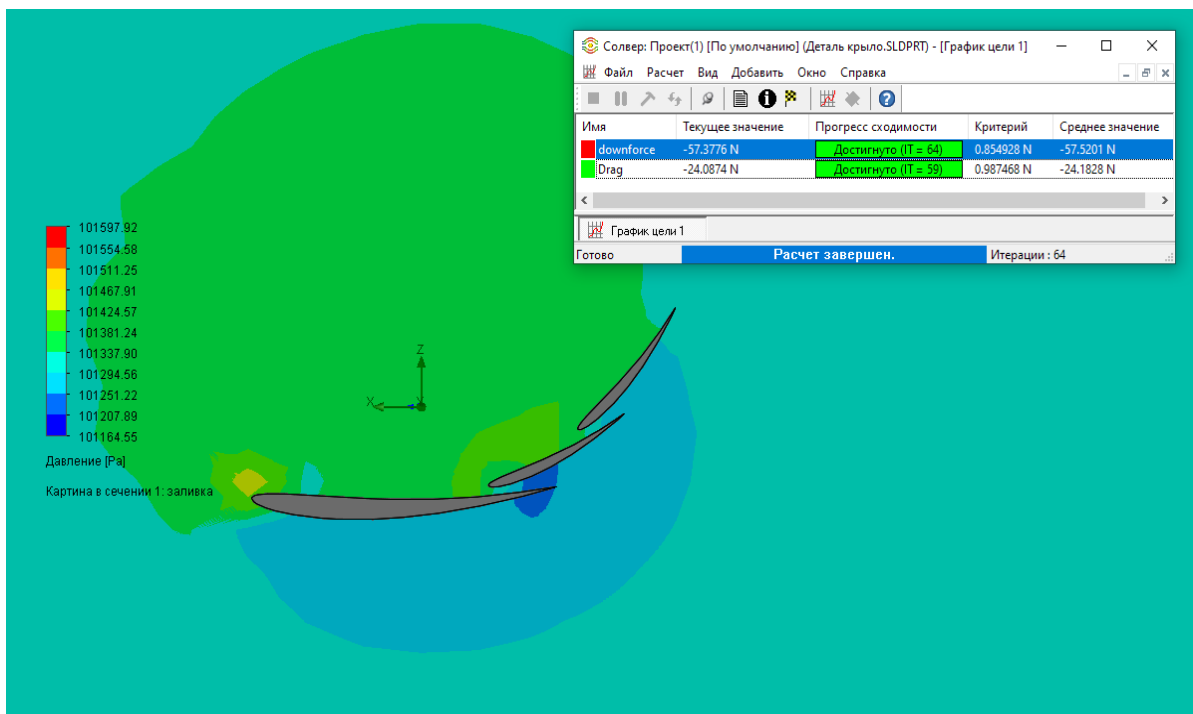


Рисунок 24 – 40 км/ч, положение антикрыльев – активное, анализ характеристик параметров: прижимной силы, силы сопротивления и давления воздуха



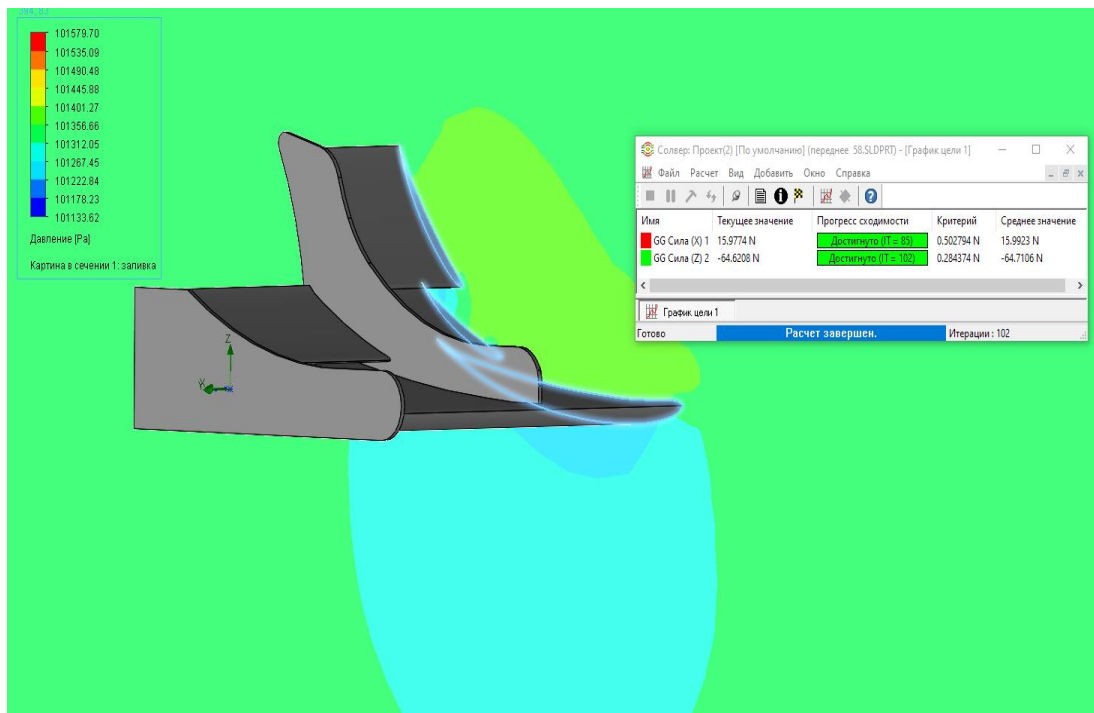


Рисунок 25 – 40 км/ч, переднее крыло, анализ характеристик параметров: прижимной силы, силы сопротивления и давления воздуха на 40 км/ч на переднем антикрыле

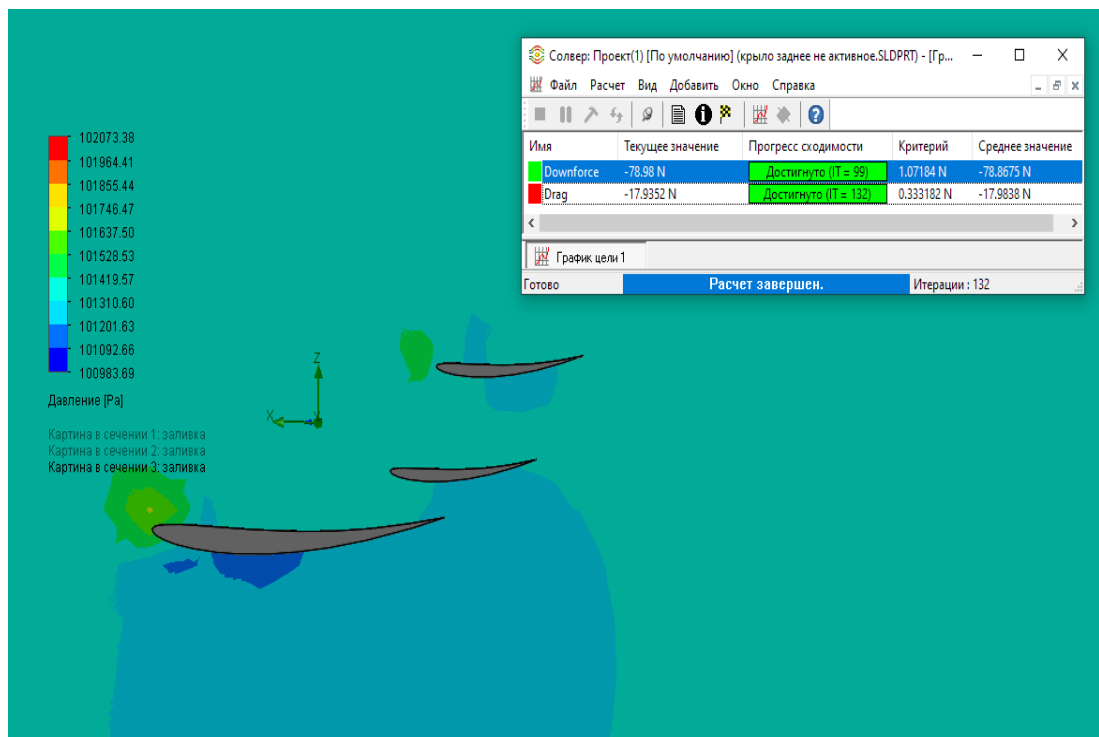


Рисунок 26 – 80 км/ч, положение антикрыльев – нулевое, анализ характеристик параметров: прижимной силы, силы сопротивления и давления воздуха

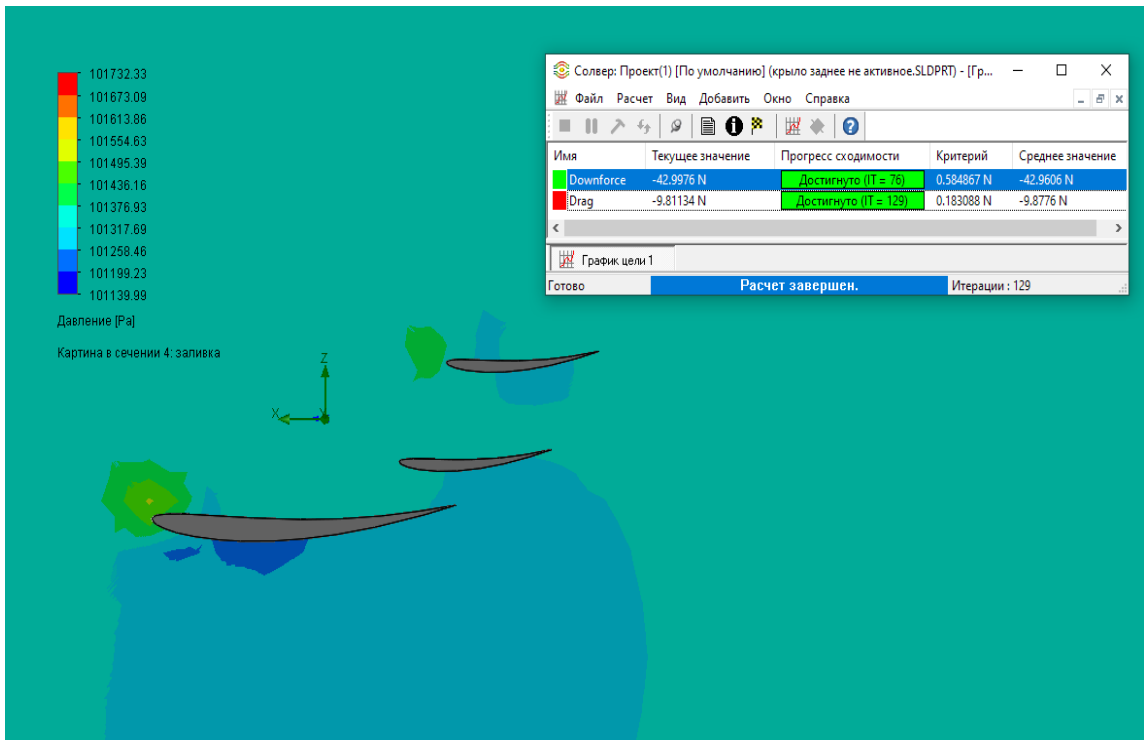


Рисунок 27 – 60 км/ч, положение антикрыльев – нулевое, анализ характеристик параметров: прижимной силы, силы сопротивления и давления воздуха

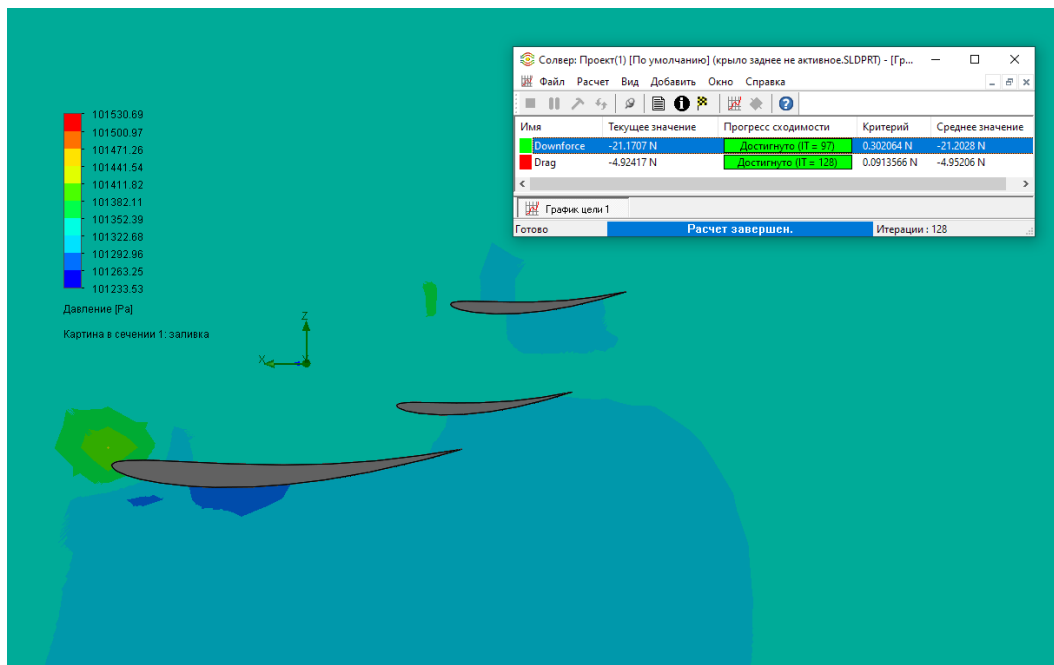


Рисунок 28 – 40 км/ч, положение антикрыльев – нулевое, анализ характеристик параметров: прижимной силы, силы сопротивления и давления воздуха

Для минимизации массы, при этом не потеряв прочности конструкции крыла был применен каркас из труб из карбона и фанерных шпангоутов размером 6 мм и алюминия толщиной 2 мм. Трубы были использованы диаметром 20, 18, 16 мм (рисунки 29-30).



Рисунок 29 – Заднее антикрыло, 3D-модель пространственной рамы.

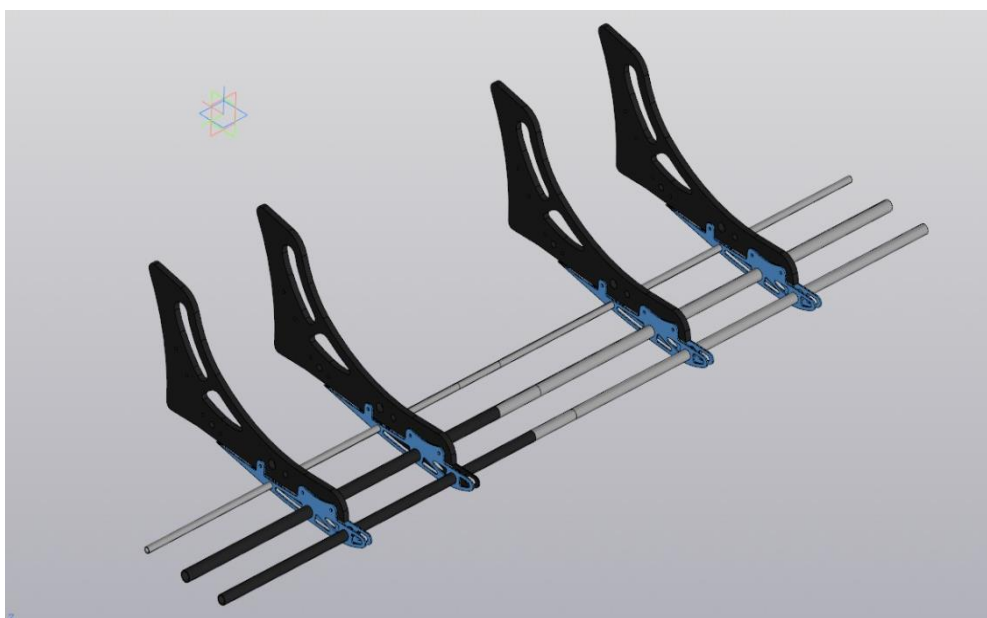


Рисунок 30 – Переднее антикрыло, 3D-модель пространственной рамы

В конструкции маленьких антикрыльев также используются шпангоуты, напечатанные на 3D-принтере (рисунок 31).



Рисунок 31 – Кронштейны, напечатанные на 3D-принтере

После создания пространственной рамы мы приступили к изготовлению поверхности антикрыльев из композитных материалов (рисунок 32).



Рисунок 32 – Композитный материал для изготовления поверхности крыльев

На рисунках 33-34 представлены полностью готовые антикрылья, установленные на гоночном болиде.

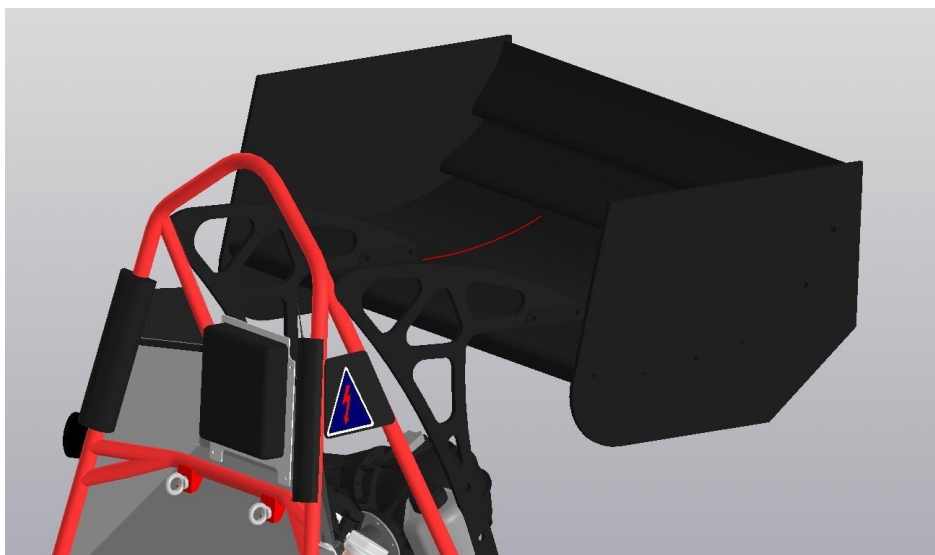


Рисунок 33 – Заднее антикрыло на болиде

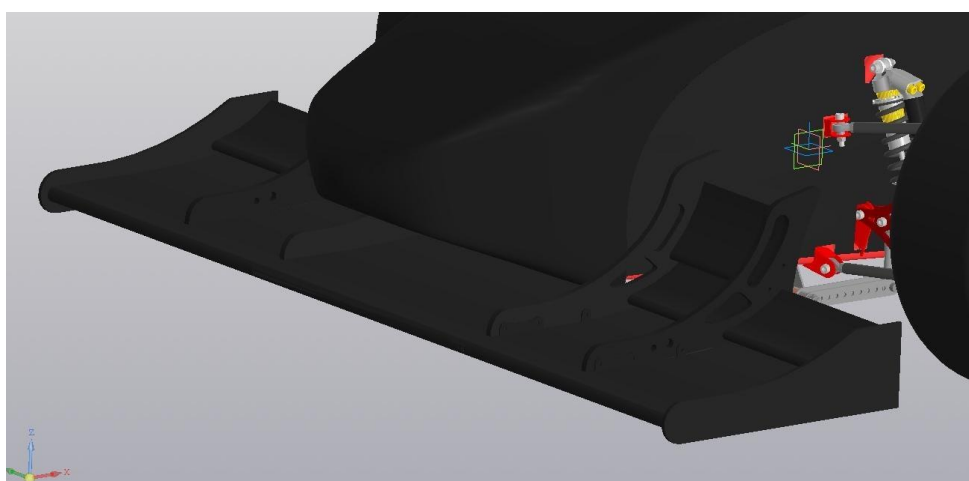


Рисунок 34 – Переднее антикрыло на болиде

Программное моделирование позволило, в сравнительно короткие сроки, спроектировать модели антикрыльев и проанализировать их поведение на различных скоростях.

### **2.3 Ходовая гоночного болида.**

«Подвеска автомобиля – это совокупность устройств, предназначенных для упругой связи колес с несущей системой автомобиля (рамой или

кузовом). Подвеска автомобиля гасит или же смягчает колебания, которые передаются на кузов во время движения автомобиля по неровностям. Именно подвеска позволяет колесам перемещаться независимо от кузова, изменяя направление движения автомобиля. Так же подвеска отвечает за безопасность, не давая автомобилю перевернуться во время поворота, сохраняя автомобиль в целостности. И, конечно же, от правильной настройки подвески зависит комфорт передвижения. При правильной настройке сохраняется постоянный контакт колес с дорогой и минимально изменяется положение колеса при движении автомобиля.

Подвеска гоночного автомобиля должна выполнять точно такую же задачу, что и подвеска городского автомобиля – обеспечивать максимальный контакт колеса с дорогой. Однако отличие подвески гоночного автомобиля в том, что скорости и нагрузки гораздо выше. Поэтому подвеску гоночного автомобиля разрабатывают под определенные задачи на треке, а не универсальную, как на городских автомобилях» [20].

«Подвеска автомобиля – сложная конструкция, включающая в себя следующие элементы:

- упругие – упругие детали, принимающие и распределяющие на кузов автомобиля нагрузку от наезда на неровность (пружины, рессоры);
- гасящие – это амортизаторы, которые несут функцию подавления колебаний кузова, которые передаются от упругих элементов;
- направляющие – рычаги, соединяющие подвеску с кузовом, и определяющие перемещение колес и кузова относительно друг друга;
- стабилизаторы поперечной устойчивости – элементы подвески, препятствующие отрыву колес от дороги во время крена автомобиля;
- опорные – кулаки, которые несут функцию опоры колеса, а так же распределяют нагрузку с колес на всю подвеску;
- элементы крепления подвески к кузову – несут функцию жесткого соединения подвески с кузовом.» [7]

На данный момент присутствуют разрывы, в основном на углах каркаса, которые появились в результате испытаний. Это следствие нарушений по эксплуатации сборно-разборных элементов. Конструкция изделия состоит из композитного корпуса и металлокаркаса, обшитого с внешней стороны полимерным материалом. Металлокаркас, обшитый с внешней стороны полимерным материалом является неотъемлемой частью аттенюатора. У всех материалов есть коэффициент температурного линейного расширения. У полимерного материала он составляет 150-200 единиц, у стали 12-13 единиц, это в 15 раз больше. Все данные справочные в свободном доступе. У всей конструкции при эксплуатации с учетом внутренней длины корпуса аттенюатора происходит уменьшение полимерного материала в размере по длине 10-11 мм, по ширине на 5-6 мм соответственно, а металлокаркас, обшитый пластиком остается в своих размерах на месте, что в свою очередь приводит к разрыву внешней обшивки металлокаркаса от стапеля. При уменьшении размеров корпуса нагруженными местами остаются углы конструкции и так раз мы это видим в местах разрывов полимерного материала на углах металлокаркаса.

Технологические зазоры изменяясь между пластиком и металлом создают напряжения в прямом или обратном направлении в зависимости от отклонения от некоторой определенной температуры. Технологический зазор конструктивно имеет две составляющие для компенсации расширения пластика в положительную или отрицательную сторону. Иными словами, с точки зрения появления дополнительных напряжений в реально рассчитанной конструкции разница температур создает некомпенсированный зазор на каждую сторону каркаса, что с учетом увеличенной хрупкости пластика при высоких температурах создает аварийную ситуацию.

В сборно-разборном элементе требуется проверять ультразвуком швы с предоставлением расчетов. Важно грамотно и четко формулировать техническое задание и подкреплять его необходимыми чертежами и эскизами, которые несут всю информацию.

«После того, как геометрия подвески оптимизирована, полученные координаты точек переносятся в программы для 3D-моделирования (КОМПАС 3D) чтобы установить элементы подвески на раму и спроектировать по данным точкам конструкцию отдельных узлов (рисунки 35-36).» [17]

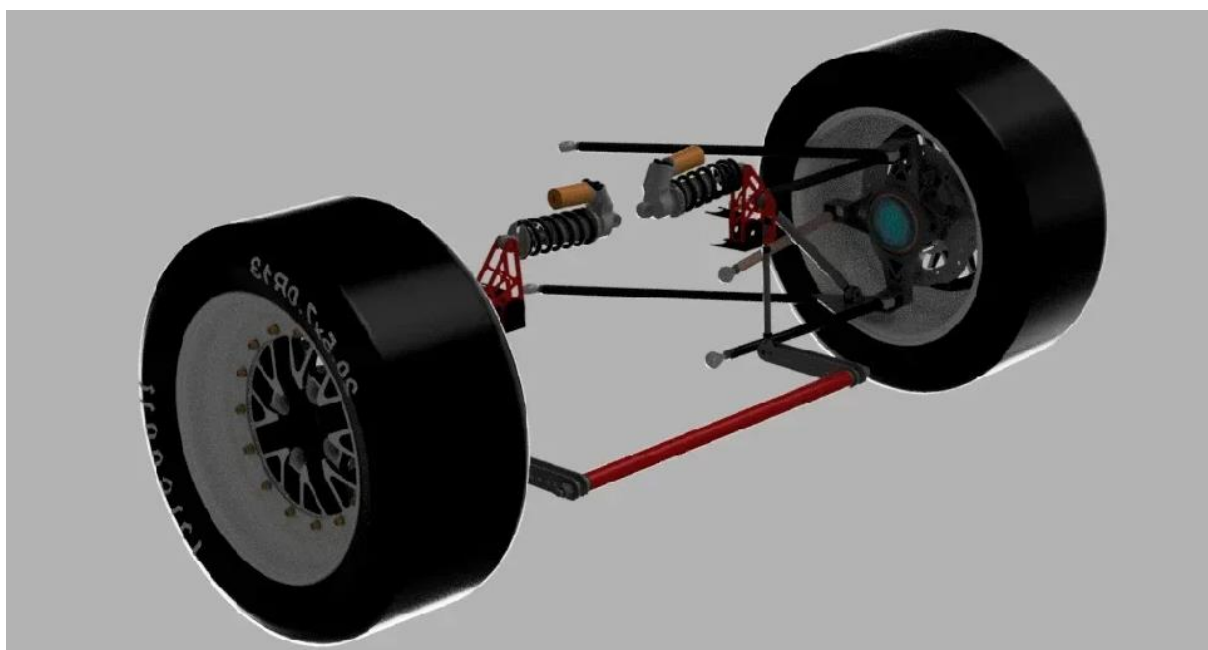


Рисунок 35 – Задняя подвеска



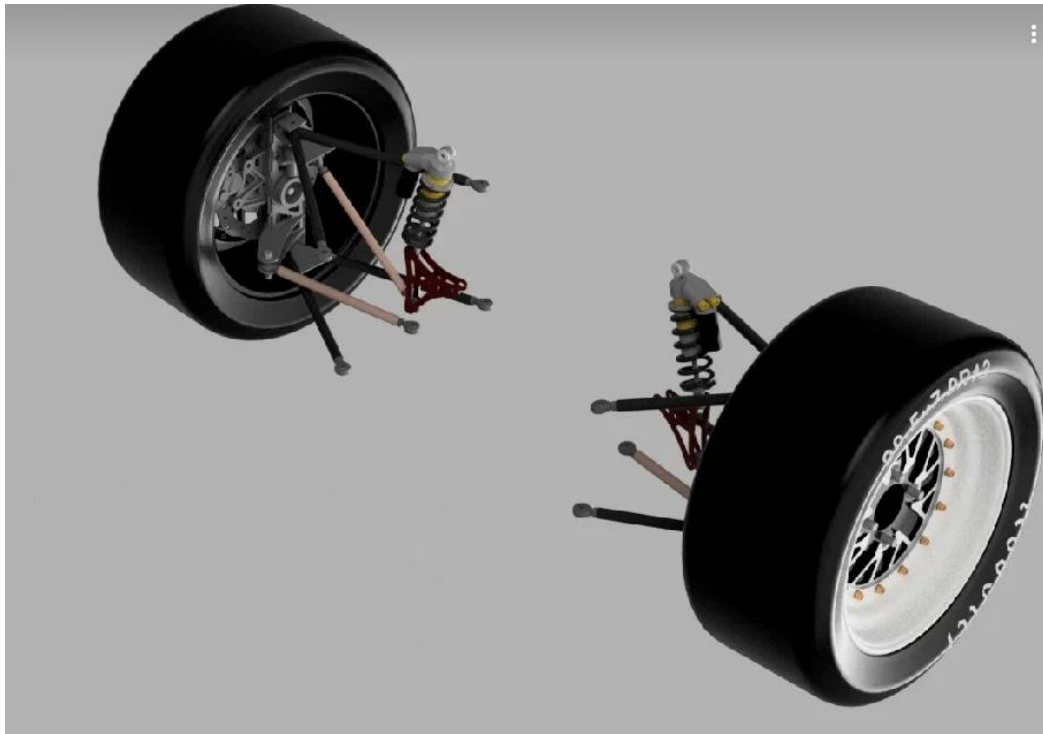


Рисунок 36 –Передняя подвеска

«Далее идет моделирование поворотных кулаков. Поворотные кулаки гоночных болидов класса Formula Student у большинства команд изготовлены из алюминия. Чаще всего это фрезерованные кулаки из цельного бруса алюминия. Изготовленные таким образом кулаки получаются прочными и самое главное легкими. Однако стоимость таких кулаков как минимум в 10 раз выше, чем стоимость сварных стальных кулаков.

Наша команда выбрала более дешевый вариант, так как стальные сварные кулаки надежные, и самое главное ремонтпригодные, и так как самый главный принцип нашей команды «простота и надежность», на болиде установлены именно стальные кулаки. Однако стальные кулаки утяжеляют болид, поэтому данные кулаки были оптимизированы по сравнению с предыдущими. За счет перфорации и грамотной конструкции удалось снизить вес кулаков (рисунок 37).» [8]

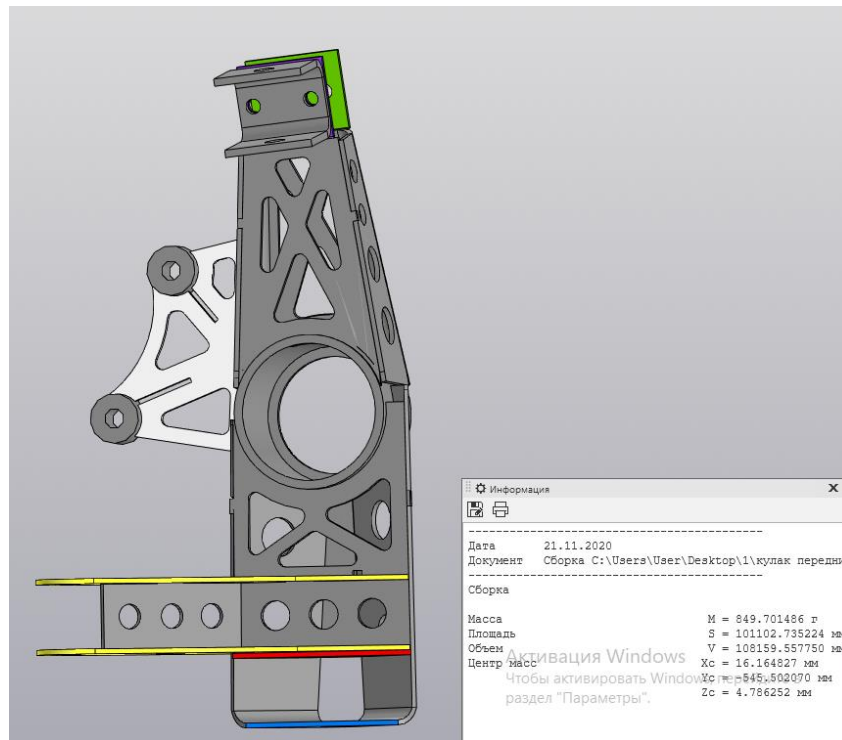


Рисунок 37 – Кулак поворотный массой 849 г

«Среди российских команд в инженерно-спортивных соревнованиях наша команда занимает самую высокую позицию в топе, однако чтобы догнать мировых лидеров нужно стремиться к снижению веса нашего болида, поэтому уже проектируются алюминиевые кулаки (рисунок 38), которые будут фрезероваться из цельного алюминиевого бруса. И это действительно важное и нужное изменение в автомобиле, ведь таким образом мы не просто снижаем вес автомобиля. Кулаки подвески являются частью неподрессоренных масс, и есть следующие мнения на этот счет: снятие с каждого колеса 1 кг равноценно снятию с кузова 20 кг; снятие с одного колеса 1 кг равноценно прибавке в 1 лошадиную силу.» [9]

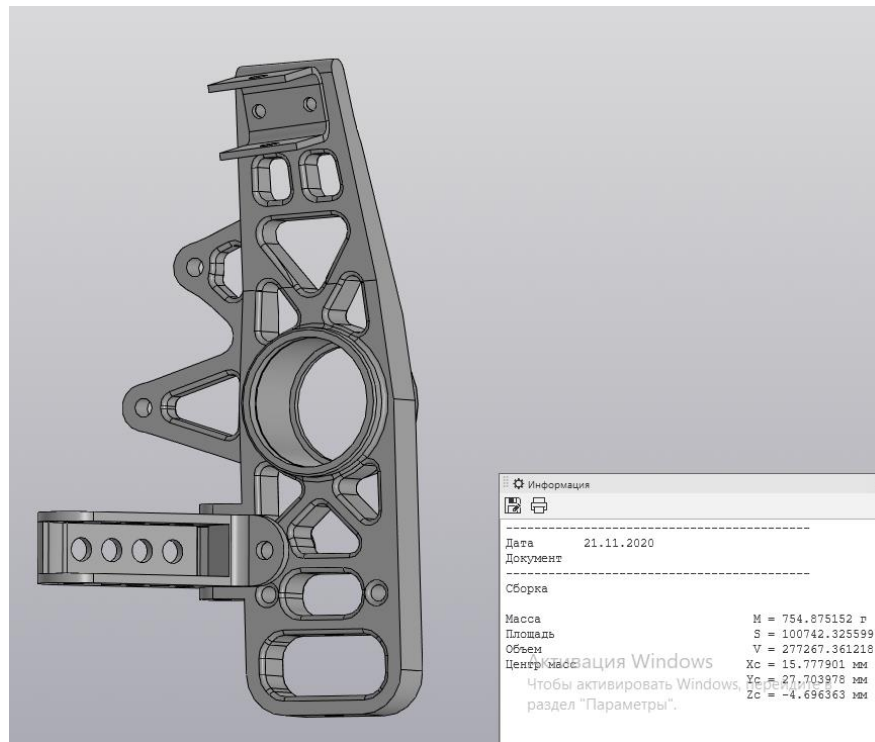


Рисунок 38 – Кулак поворотный из алюминия массой 754 г

Масса алюминиевых кулаков меньше стальных, но прочность остается такой же (рисунок 39).

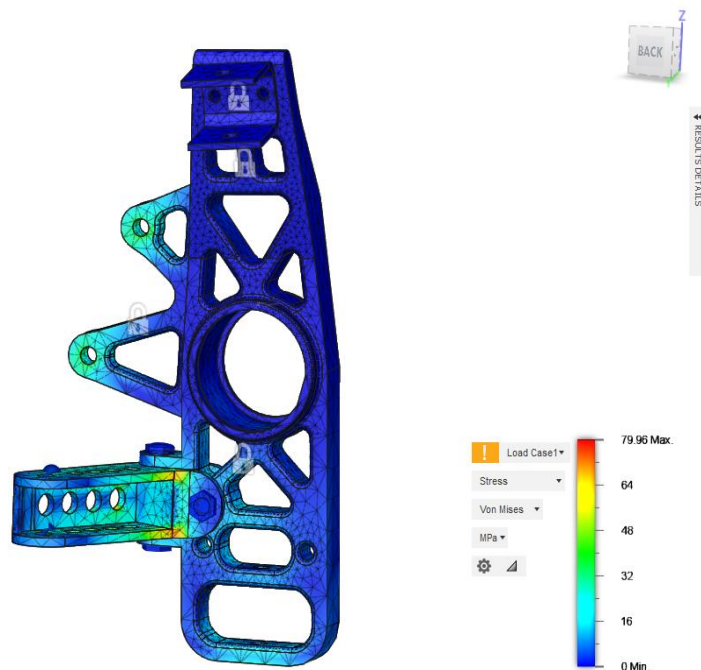


Рисунок 39 – Прочность алюминиевого кулака

Рычаги задней подвески спроектированы для снижения веса болида. Положение рычагов – параллельно дороге, что позволяет болиду сохранять постоянную траекторию. Угол развала передней оси изменялся до положительного во время поворотов, что снижало сцепление, и следовательно машина становилась менее управляемой (рисунок 40).



Рисунок 40 – Развал колес при повороте

«Данные недостатки были выявлены пилотами нашей команды во время прохождения динамических испытаний на соревнованиях Formula Student.

Проведем расчет точек подвески проектируемого автомобиля с учетом выявленных замечаний.

На задней подвеске нового болида произведена настройка жесткости стабилизатора поперечной устойчивости. Во время испытаний болида тяга стабилизатора была установлена ближе к торсионному прутку, таким образом, было уменьшено плечо приложения нагрузки, за счет чего стабилизатор стал более жестким.

Более жесткий задний стабилизатор дает:

- меньше крен шасси;
- снижение заднего сцепления;
- увеличение переднего сцепления;
- увеличение поворачиваемости при ускорении;

– большую чувствительность управления.

Передняя подвеска подверглась более серьезным изменениям. Исходя из проблем передней подвески, были выявлены основные направления доработок.

Помимо избавления от рулевого редуктора, который утяжеляет вращение руля, была изменена геометрия подвески.» [11]

«За счет изменения угла продольного наклона шкворня было уменьшено плечо обкатки до 23 мм, при том, что в прошлом году плечо обкатки составляло 52 мм. Сильно положительный радиус плеча обкатки может сделать поворот колеса очень сложным. То есть, уменьшив радиус плеча обкатки, мы сделали более легкое рулевое управление.

Чтобы избавиться от эффекта недостаточной поворачиваемости был увеличен угол Аккермана. Аккерман задает разность углов поворота колес на передней оси. Это важный параметр, потому что колеса передней оси во время поворота проходят разный путь, из за того, что траектории их движения имеют разный радиус. Аккерман 100 % – когда линии, проходящие через оси поворота рулевых кулаков и шарниры рулевых рычагов, пересекаются ровно в середине задней оси автомобиля, в данном случае разность углов поворота колес позволяет проходить повороты без расхождения колес в разные стороны, так как траектории движения колес передней оси проходят по нужным радиусам. На болиде 2019 года был установлен статический Аккерман 40 % (рисунок 41), на новый болид поворотный кулак спроектирован со 100 % статическим Аккерман (рисунок 49).» [12]

REAR SUSPENSION - STEERING TRAVEL						
LHS WHEEL (-ve Y)						
TYPE 14 Double Wishbone, Push Rod to damper						
INCREMENTAL GEOMETRY VALUES						
Steer Travel (mm)	Toe Angle {SAE} (deg)	Toe Angle {SAE} (deg)	Camber Angle (deg)	Camber Angle (deg)	Ackermann (%)	Turning Circle Radius (mm)
35.00	32.43	-20.20	1.20	-2.56	146.10	3283.32
30.00	24.58	-17.48	-0.08	-2.64	124.78	4101.48
25.00	19.07	-14.73	-0.84	-2.70	114.54	5123.14
20.00	14.49	-11.93	-1.37	-2.72	108.28	6581.57
15.00	10.43	-9.07	-1.76	-2.71	104.23	8944.17
10.00	6.73	-6.15	-2.07	-2.67	101.65	13587.42
5.00	3.27	-3.13	-2.30	-2.59	100.22	27373.63
0.00	0.00	0.00	-2.47	-2.47	99.75	0.00
-5.00	-3.13	3.27	-2.59	-2.30	100.22	27373.63
-10.00	-6.15	6.73	-2.67	-2.07	101.65	13587.42
-15.00	-9.07	10.43	-2.71	-1.76	104.23	8944.17
-20.00	-11.93	14.49	-2.72	-1.37	108.28	6581.57
-25.00	-14.73	19.07	-2.70	-0.84	114.54	5123.14
-30.00	-17.48	24.58	-2.64	-0.08	124.78	4101.48
-35.00	-20.20	32.43	-2.56	1.20	146.10	3283.32

Рисунок 41 – Угол Аккермана на болиде

Таким образом, удалось избавиться от эффекта недостаточной поворачиваемости увеличением угла Аккермана, за счет чего колеса в повороте движутся по нужной траектории.

## 2.4 Блок педалей

«Педальный узел – это один из главных инструментов управления автомобилем, без которого все еще не обходится ни одна машина.» [15]

«Команда TRT с каждым годом старается модифицировать данный узел в болиде класса Formula Student (рисунок 42). Критерии, по которым производятся изменения:

- снижение веса педального узла;
- повышение прочности педалей и креплений;
- экономия пространства кокпита;
- улучшение эргономики.» [16]

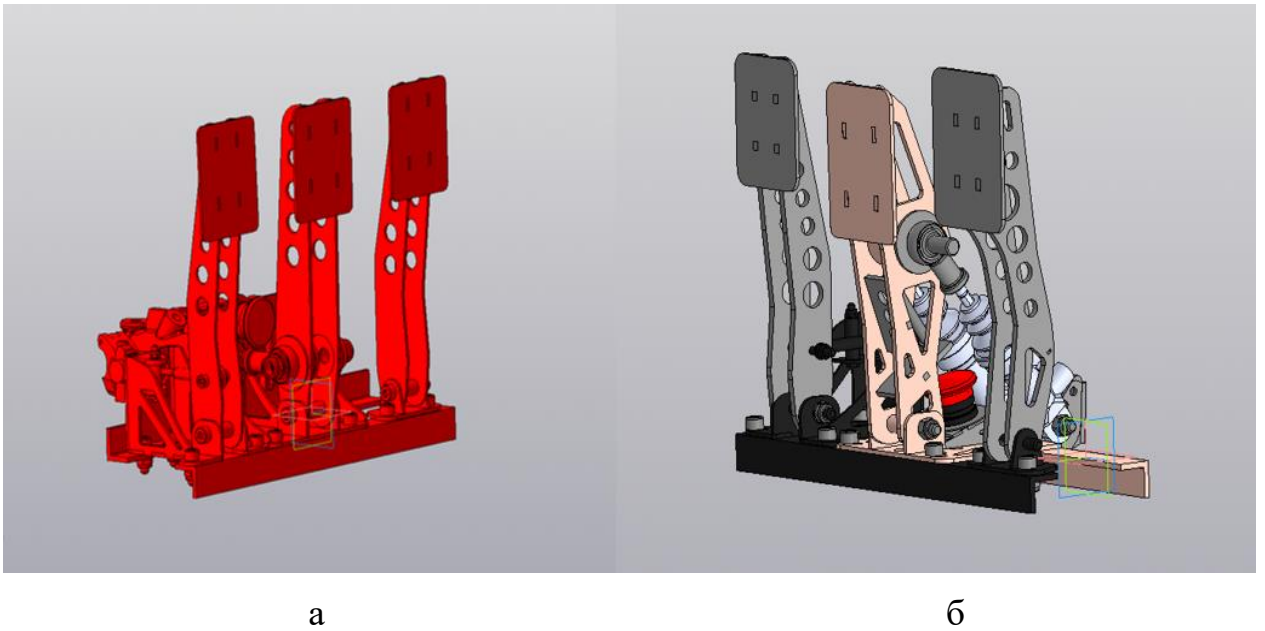


Рисунок 42 – Блок педалей в сборе: а – предыдущая модель; б – новая модель

«Для снижения веса нового педального узла, было принято решение о переходе на более легкие материалы. Ранее педальный узел был практически полностью изготовлен из стали, что добавляло вес болиду. Новый педальный узел было решено изготавливать из алюминиевых пластин (АМГ6). Именно этот материал использовался, так как сборка педалей производилась при помощи сварки, и именно АМГ6 позволяет получать прочные сварные соединения.» [11]

В совокупности данное решение позволило снизить вес на 541 г.

Наши машины работают принципиально с зажимной кромкой в 20 мм, поэтому максимальная площадь формования составляет: 3960 mm x 2160 mm

Аналогичный вид всей картины нагрева в виде многоцветной картины согласно патенту фирмы GEISS. Верхний нагреватель с моторизованным приводом и звеном кривошипа для обеспечения более быстрого и плавного движения.

Все остальные движения управляются пневматически соленоидными клапанами. Движения зажимной рамы, подъема стола и дополнительного пуансона с помощью синхронизированных цилиндров. Все пневматические клапаны выполнены по технологии 24В и снабжены контрольной

индикацией. Подъем стола 61075 Н, полностью синхронизированное оборудование. Все скорости с бесступенчатой настройкой. Надежно сконструированная зажимная рама с системой бесконечной регулировки штанг, с вертикальным управлением. Движение 4 синхронизированными цилиндрами, сила смыкания 61075. Это гарантирует ровное распределение зажимного усилия и делает необязательной установку толщины материала.

Зажимная рамка настраивается бесступенчато по обеим осям без какого-либо дополнительного оборудования. Все позиции зажимной рамы программируемы и могут сохраняться в памяти. Никаких конечных выключателей на рамке больше не применяется. Навесная дверь для простой смены формы. Новая система управления машиной SIMATIC S7 с децентрализованным подключением всех прикладных групп через шину SINEC L2 DP-bus. Все операции, индикации и контроль на одном мониторе фирмы Siemens, находящемся впереди слева на свободно поворачиваемой панели оператора РС 670. Деятельность предприятий по автосервису растет, также растет количество клиентов, все большему количеству предприятий требуется специализированная база данных. Конкуренция заставляет предприятия прикладывать все больше усилий по поиску клиентов и заказов, улучшению качества предоставляемых услуг. Чтобы оценить эффективность деятельности, требуется провести на основании количественных и качественных показателей. Эти показатели помогают определить возможные направления совершенствования и повышения эффективности предприятия.

Совершенная вакуумная система, состоящая из вакуумного бака 1965 л, 4-х вакуумных насосов. Система пневматического синхронизированного пуансона. Усилие 31800 Н. Вентиляторное охлаждение посредством 4 вентиляторов на 26 м<sup>3</sup>/мин каждый, 700 ватт.

«На рисунке 43 (б) показана новая конструкция педали тормоза. Тормозные цилиндры направлены под углом к педали, а также имеют регулировку по углу, что позволяет регулировать усилие, прилагаемое



пилотом на педаль, а также позволяет регулировать ход педали. За счет данного расположения тормозных цилиндров удалось сэкономить пространство кокпита, при этом педаль осталась на таком же расстоянии от пилота, как и в 2019 году. Помимо этого, уменьшился в размерах кронштейн тормозных цилиндров, что снижает вес педального узла.» [18]

Педальный узел был спроектирован в соответствии с удобством пилота, увеличено расстояние между педалями газ и тормоз. Педаль газа (рисунок 43) расположили ближе к пилоту, чем педаль тормоза, чтоб была возможность быстрого перемещения ноги пилота.

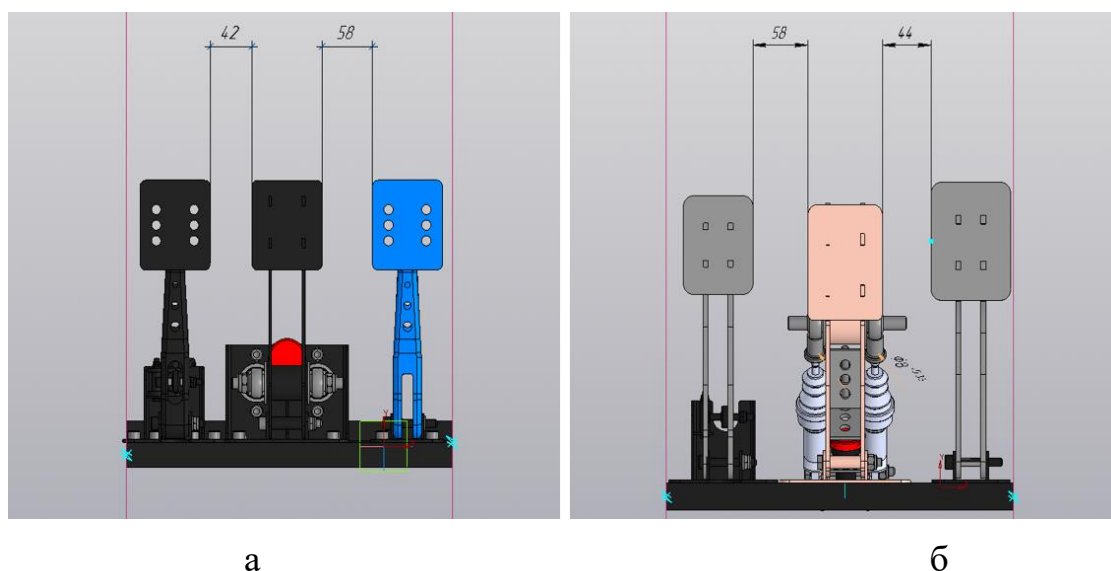


Рисунок 43 – Увеличение расстояния между педалью сцепления и педалью тормоза:

а – предыдущая конструкция; б – новая конструкция

На рисунке 44 представлено изменение усилия на тормозные цилиндры.

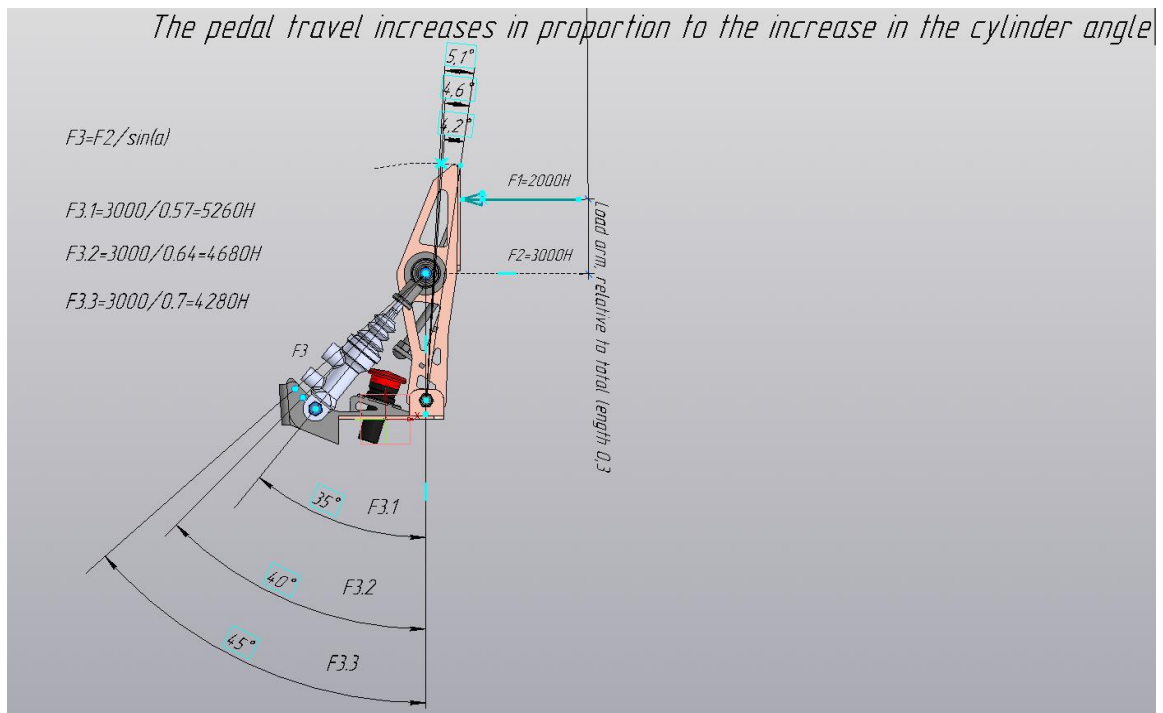


Рисунок 44 – Усилия передаваемые на тормозные цилиндры при нажатии на педаль тормоза при разных углах

«Был проведен анализ прочности тормозной педали. В регламенте соревнований есть требование по педали тормоза. Педаль тормоза должна выдерживать нагрузку минимум в 2 кН. Модель педали была загружена в программу Autodesk Fusion 360. Результат моделирования представлен на рисунках 45-46.» [12]

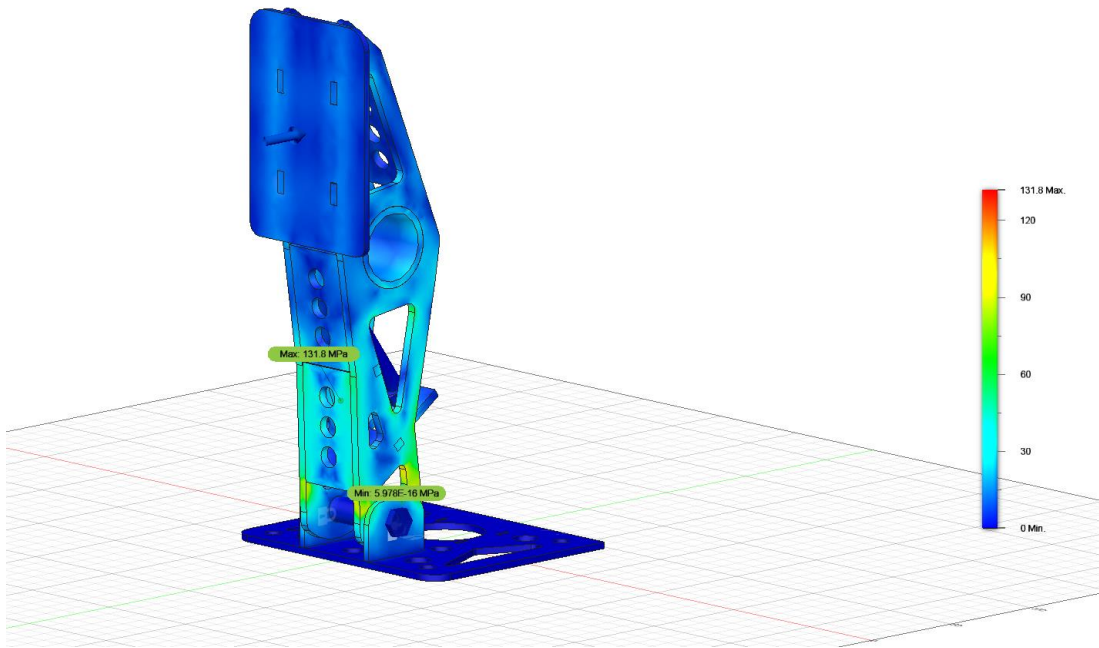


Рисунок 45 – Анализ напряженного состояния педали тормоза

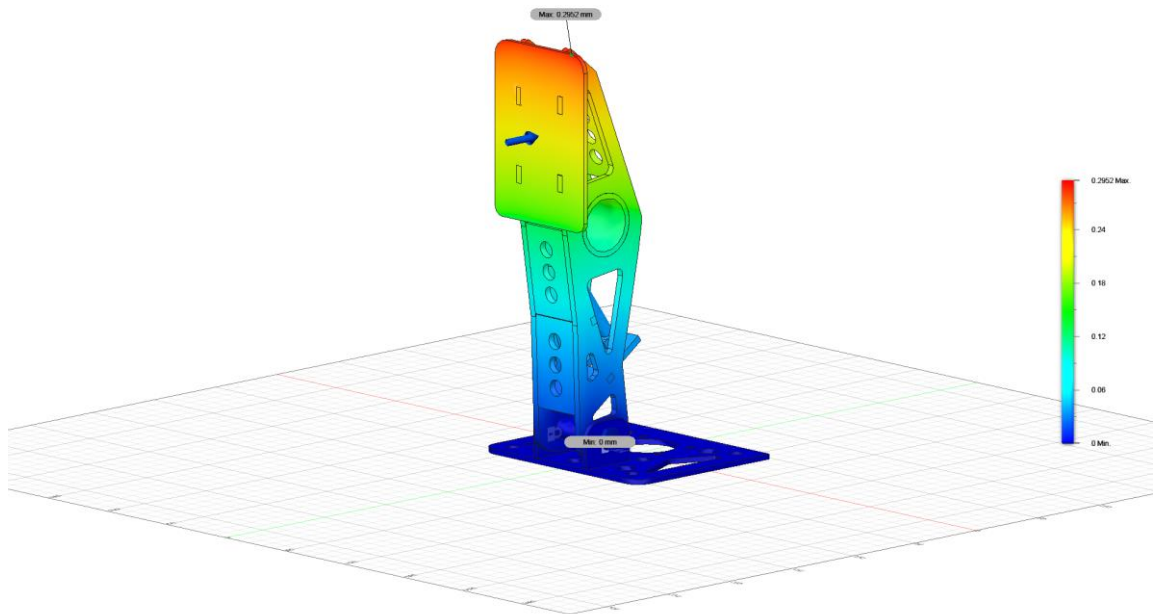


Рисунок 46 – Анализ деформации педали тормоза

«Как видно, максимальное напряжение при нагрузке в 2 кН составило 131,4 МПа. Данный анализ показал, что педаль сможет выдержать нагрузку в 2 кН, так как предел текучести алюминиевого сплава АМгб составляет не

менее 200 МПа. Также анализ показал максимальную деформацию педали при максимальной нагрузке, а именно 0,29 мм.» [8]

## 2.5 Система впуска

«В новой системе впуска изменения коснулись длины раннера, он был подобран под пик крутящего момента двигателя, около 5600 об/мин. Объем ресивера составил 3 л, что является компромиссом между откликом на педаль газа и сглаживанием пульсаций потока, ограниченного рестриктором.

По результатам расчета получили:

- 0,01 с – время оборота коленчатого вала;
- 0,02 с – время одного цикла;
- 430 градусов – угол закрытия впускного клапана;
- 0,012 с – время, когда впускной клапан закрыт во время одного цикла;
- 4116 мм – расстояние, которое проходит волна за время когда впускной клапан закрыт;
- 2058 мм – результат расчета длины раннера для 1 волны.» [6]

«Таким образом, оптимальная длина раннера для двигателя с рестриктором составляет 254 мм. Зная, что длина от впускного клапана до начала впускного патрубка составляет 150 мм, выбираем длину раннера 100 мм.» [9]

Построили несколько вариантов модели, отличающихся объемом, формой и углами изгибов. На рисунке 47 представлен итоговый вариант конструкции.

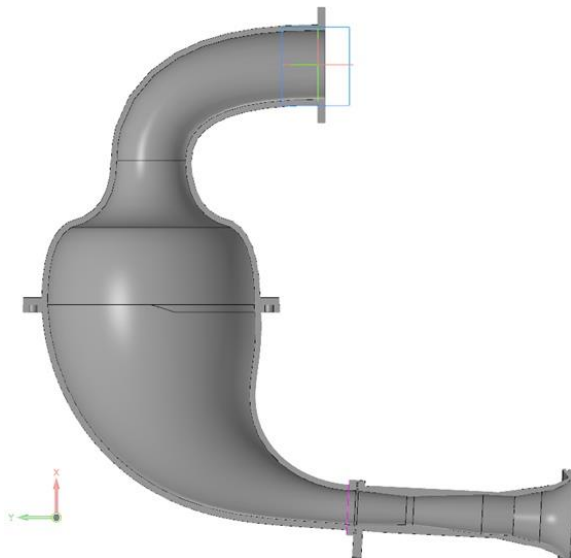


Рисунок 47 – Общий вид нового ресивера

«Форма ресивера обусловлена заложенным объемом и длиной раннера. Расстояние от дроссельной заслонки до основного объема уменьшено и имеет больший угол раструба чем у предыдущей версии, что создает меньше сопротивления забору воздуха (рисунок 48).» [19]

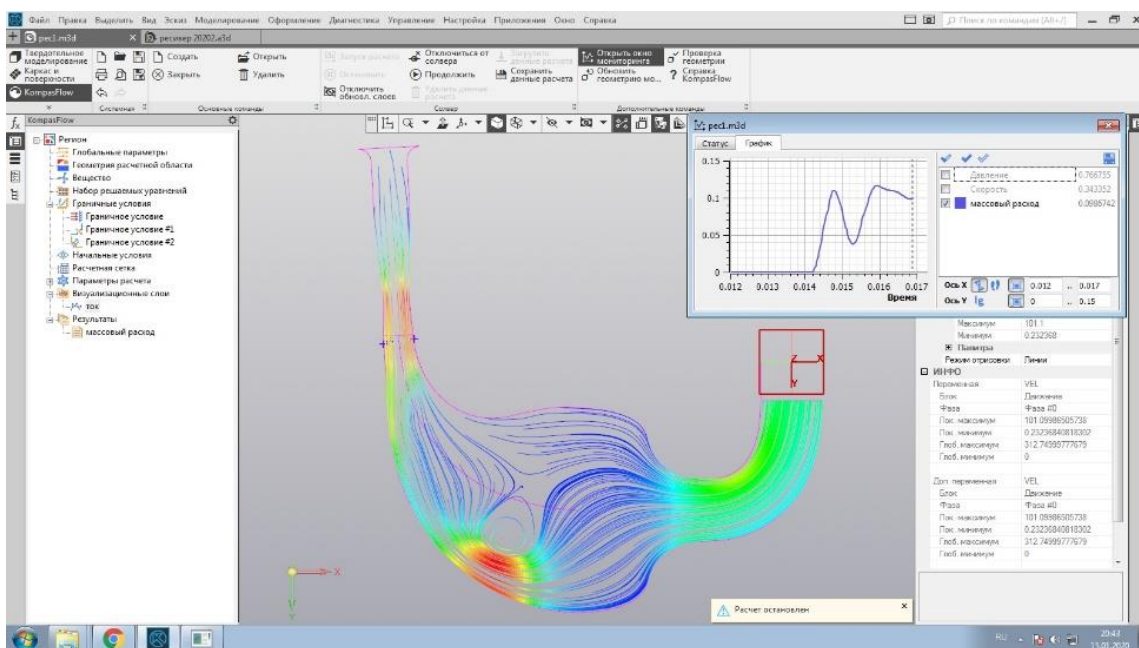


Рисунок 48 – Продувка ресивера в компас FLOW

В итоге видим равномерный забор воздуха из основного объема ресивера.

Вывод: в главе были приведены основы проектирования гоночного болида, проанализированы и улучшены несущая система, аэродинамические элементы, ходовая часть, педальное управления и система впуска.

С сокращением времени ремонта автомобиля, предприятие сокращает свои издержки. Это немаловажно, что в свою очередь дает возможность быстрой самоокупаемости предприятия. Положительный момент, который возникает это уменьшение в оборотных средствах, которые как правило берутся организациями в кредит у банков под проценты. В свою очередь это дает предприятиям исполнять больше заказов за фиксированный промежуток времени.

Проанализирована конструктивная прочность гоночного болида. Анализ показал, что прочность разработанной конструкции болида отвечает всем требованиям безопасности. Проанализированы аэродинамические элементы болида, такие как переднее и заднее антикрыло. Спроектированные антикрылья достаточно крепкие и обладают хорошими аэродинамическими свойствами, при этом не утяжеляя автомобиль. В ходовой части были проведены модернизации, за счет которых удалось избавиться от эффекта недостаточной поворачиваемости увеличением угла Аккермана, за счет чего колеса в повороте движутся по нужной траектории. Также было модернизировано педальное управление. Было увеличено расстояние между педалями и смещено их положение для удобства пилота. Модернизированный ресивер позволил набирать равномерный забор воздуха.

### 3 Компьютерная модель гоночного болида

В работе были спроектированы в программе КОМПАС 3D-модели гоночного болида с детальной проработкой корпуса рамы, ходовой части, блока педалей. Основные виды представлены на рисунках 49-51.

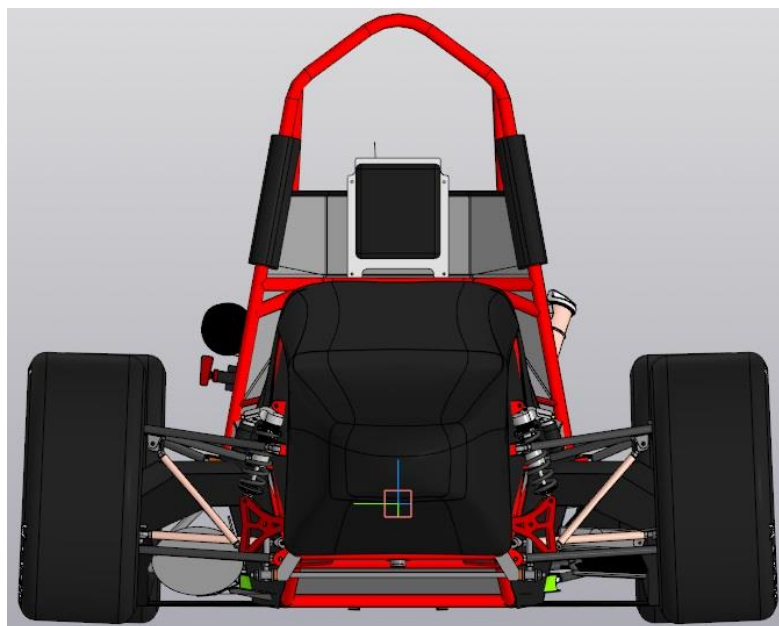


Рисунок 49 –Гоночный болид: вид спереди

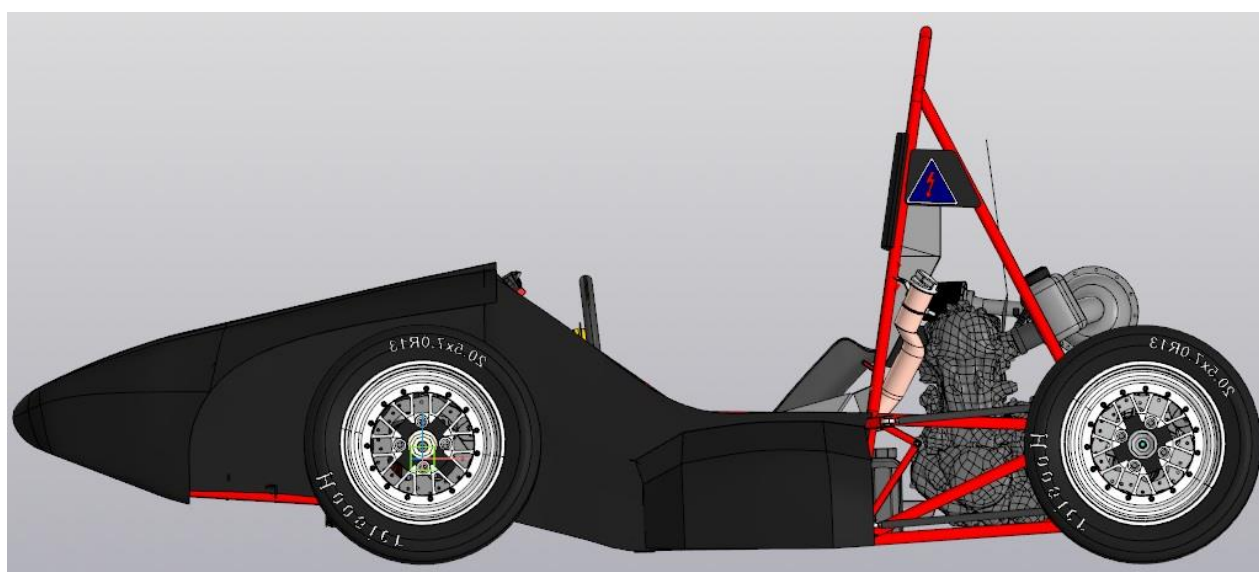


Рисунок 50 – Гоночный болид: вид сбоку

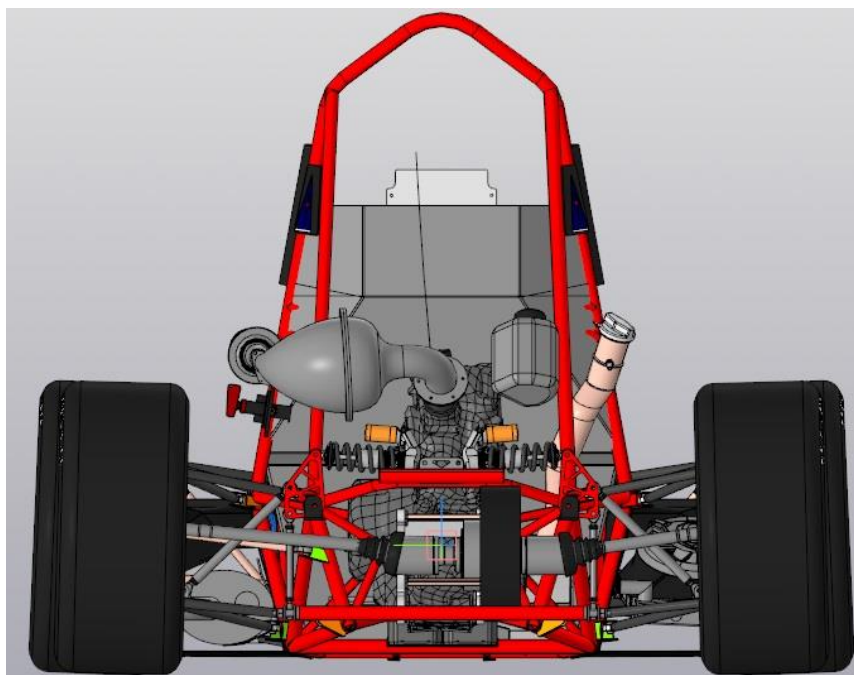


Рисунок 51 – Гоночный болид: вид сзади

Таким образом, в рамках выполнения работы была разработана 3D-модель общей компоновки автомобиля с акцентом на проектирование элементов несущей системы, подвески, тормозной системы, системы впуска и аэродинамических элементов, выполненной в программных пакетах Компас 3D, SolidWorks, Ansys, Lotus Suspension Analysis.



## Заключение

В данной работе рассмотрели оптимизацию конструкции спортивного болида Formula Student. Провели анализ конструкции болида, рассмотрены прототипы конструкций гоночных болидов. При проектировании важно учитывать также дополнительные требования к безопасности пилота во время гонки.

В первом разделе рассмотрели общие сведения о проекте Formula student. Проект направлен, в том числе на повышение рейтинга университета, путем стимулирования научно- технической работы студентов. Проведен анализ болида, общие характеристики. Гоночный болид должен отвечать ряду требований к конфигурации болида, способностью развивать высокую скорость при этом оставаясь безопасным для пилота и зрителей гонок.

Во втором разделе провели анализ характеристик болида. Изучены и улучшены такие системы автомобиля как: несущая система автомобиля, аэродинамические элементы автомобиля, ходовая часть спортивного болида, педальный узел, система впрыска. Провели анализ конструкций по дополнительным требованиям. Для этого была спроектирована 3D модель болида с помощью программ Компас 3D, SolidWorks, Ansys, Lotus Suspension Analysis. Проведен анализ прочности с помощью конечно-элементного моделирования.

В третьем разделе была спроектирована 3D модель гоночного болида с оптимизированной конструкцией. В работе были спроектированы в программе КОМПАС 3D-модели гоночного болида с детальной проработкой корпуса рамы, ходовой части, блока педалей Проведен анализ, который позволил пройти дополнительные требования к проектированию гоночного болида.

Проект Formula Student - это научно-практический проект студентов ТГУ, реализация которого позволяет студентам на практике создать настоящий гоночный болид.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Каменев С. В., Романенко К. С. Технологии аддитивного производства: учеб. пособие. Оренбург: ОГУ, 2017. 145 с.
2. Кокпит гоночного автомобиля [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ready-to-race.ru/2020/04/08/76-fsrules2020-cockpit/> (дата обращения: 18.09.2020).
3. Колчин А. И., Демидов В. П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов: Высшая школа, 2003. 496 с.
4. Левашкин Д. Г., Логинов Н. Ю., Козлов А. А., Гуляев В. А. Образовательная модель проектно-ориентированной подготовки молодых специалистов инженерно-технических направлений в концепции индустрия 4.0 / Материалы IV Международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн». Тамбов: ТГТУ, 2017. С. 345-351.
5. Молибошко Л. А. Компьютерные модели автомобилей : учебник. Минск : Новое знание, 2017. 295 с.
6. Раймпель Й. Шасси автомобиля: конструкции подвесок. М.: Машиностроение, 1989. 326 с.
7. Решетов А. В. Описательный анализ поворотных кулаков автомобиля / Сборник трудов 4-го Всероссийского форума «Студенческие инженерные проекты». М.: МАДИ, 2016. С.32-34.
8. Саплинова В. В., Каськов С. А. Система подвески гоночного болида класса Formula Student и её безопасность / Сборник статей Международной научно-практической конференции «Новые задачи технических наук и пути их решения». Самара, Аэтерна, 2017. С. 206-209.
9. Скутнев В. М. Основы конструирования и расчета автомобиля: учеб. пособие. Тольятти : ТГУ, 2012. 294 с.
10. Хаммилл Д. Подвеска и тормоза: как построить и модифицировать спортивный автомобиль. М.: Легион-Автодата, 2005. 96 с.

11. Чмиль В. П., Чмиль Ю. В. Автотранспортные средства : учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2016. 335 с.
12. Эксплуатация автомобильного транспорта : учеб. пособие. Оренбург : ОГУ, 2017. 221 с. Airfoil Tools [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://airfoiltools.com> (дата обращения 17.12.2020).
13. Auer B., McCombs J., Odom E. Design and Optimization of a Formula SAE Frame // Journal of Passenger Car: Mechanical Systems Journal. 2006. Vol. 115. P. 917-922.
14. Chandan S. N. Design, Analysis and Optimization of Race Car Chassis for its Structural Performance // International journal of engineering research and technology. 2016. Issue 5. P. 361-367.
15. Dharmawan M. A., Ubaidillah, Nugraha A. A., Wijayanta A. T., Naufal B. A. Aerodynamic Analysis of Formula Student Car / The 3rd International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering. AIP Conference Proceedings, 2018. P. 1-8.
16. Fazidah S. Stress and Modal Analysis Assessment of Race Cars Chassis Structure // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 663. P. 103-107.
17. Formula SAE [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Formula\\_SAE](https://ru.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE) (дата обращения 18.09.2020).
18. Formula SAE Rules [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=2c1ab552-40c3-4b97-a258-582dca0ea505> (дата обращения 17.12.2020).
19. Lim J. W., Sivaguru S. Chassis Structural Design of Track Racing One Manned Formula Car // International Journal of Engineering and Technology. 2018. Issue 7. P. 71-75.
20. Mahgoub A., El-Zaabalawy H., Aboelsoud W., Abdelaziz M. Design of High-Lift Airfoil for Formula Student Race Car // SAE International Journal of Commercial Vehicles. 2018. Issue 12. P. 1-12.