

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)

Автомобили и автомобильное хозяйство

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Тюнинг гоночного болида «Red Scorpion G3» международного
проекта Formula Student

Студент

Д.Ю. Миронов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.Е. Епишкин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

канд. пед. наук, доцент С.А. Гудкова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Аннотация

Объектом исследования является несущая система, узлы ходовой части гоночного автомобиля, аэродинамические элементы, педальный узел и система впуска.

Цель работы – конструирование и изготовление гоночного автомобиля под требования регламента Formula SAE.

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. Выполнен анализ конструкционной прочности деталей и узлов методом конечно-элементного моделирования.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные характеристики: вес силового каркаса 27 кг, вес болида – 221 кг, база – 1530 мм; задняя колея – 1170 мм; передняя колея – 1200 мм; габариты болида – 2700×1445×1138 мм.

Данная выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки на 57 страницах, включая 60 рисунков, 1 таблицу, списка из 20 источников, в том числе 7 источников на иностранном языке и чертежей на 6,5 листах формата А1.

Abstract

The project «Formula Student» has existed for several years in Togliatti State University and is successfully promoted by the student team at international competitions.

The issues of finite element analysis of the strength and rigidity of the frame of a racing car are highlighted in the project's general part. The suspension and steering calculations have been made, suspension arms and pedal assembly have been designed, new suspension attachment points have been calculated.

Much attention is given to aerodynamic elements. The calculations and analysis of aerodynamic devices have been performed. The optimal position of the wing has been selected and a dynamic traction calculation has been carried out. The main points of aerodynamics have been described

The finite element model of the framework was obtained in the universal pre- and postprocessor ANSYS.

Main design and technical characteristics: the weight of the power frame is 27 kg, the weight of the car is 221 kg, the base is 1530 mm; the rear track is 1170 mm; the front track is 1200 mm; the dimensions of the car are 2700×1445×1138 mm.

The work is of interest for wide circle of readers.

The final qualifying work consists of an explanatory note on 57 pages, introduction, including 60 figures, 1 table, the list of 20 references including 7 foreign sources and the graphic part on 6,5 A1 sheets.

Содержание

Введение.....	5
1 Общие сведения о проекте Formula Student	8
1.1 Актуальность и задачи проекта Formula Student	8
1.2 Общая конфигурация болида проекта Formula Student	9
2 Конструирование гоночного болида.....	12
2.1 Проектирование несущей системы автомобиля	13
2.2 Проектирование аэродинамических элементов автомобиля.....	23
2.3 Проектирование ходовой части гоночного автомобиля	33
2.4 Проектирование педального узла.....	44
2.5 Проектирование системы впуска	50
3 Компьютерная модель гоночного болида	53
Заключение	55
Список используемых источников.....	56

Введение

Formula Student является студенческим конкурсом, основателем которого является SAE International, ранее известная как общество инженеров автомобильной промышленности – SAE. Первое соревнование было организовано в 1980 году студенческим отделением SAE в Техасском университете в Остине.

Концепция Formula Student состоит в том, что вымышленная компания-производитель для разработки компактного гоночного автомобиля в стиле «Формула» заключает со студенческой командой контракт. Гоночный автомобиль должен рассматриваться как продукт потенциального запуска в серийное производство.

История конструирования гоночных болидов в Тольяттинском государственном университете (ТГУ) претерпела несколько значимых этапов.

В конце 2007 года в ТГУ была организована, на тот момент, 3 российская команда SPC Formula TSU, занимающаяся разработкой гоночных болидов для участия в проекте Formula Student. Со своим первым гоночным болидом «Sprint 01», который был разработан и сконструирован за 9 месяцев, команда успешно выступает на предварительном этапе соревнований Formula Student Russia 2008. Там она презентует свой бизнес-проект по реализации выпуска тысячи подобных гоночных болидов в России. Необходимо было обосновать экономическую выгоду их производства и определить пункты их реализации. По итогам этапа данная презентация становится лучшей, специалисты признают её конкурентоспособной с презентациями именитых иностранных команд.

В 2014 году команда уже под своим новым названием Togliatti Racing Team проводит стремительный скачок в развитии и достигает значительных высот в своей истории. Она принимает участие в соревнованиях Formula Student Russia 2014. Для участия в нём за рекордные сроки команда проводит

разработку и представляет очередной в своей истории болид «White Shark», тем самым побив неофициальный рекорд соревнований (на создание болида у тольяттинцев ушло всего 3 месяца). В итоговой классификации соревнований Togliatti Racing Team занимает 8 место, а также удостоивается награды «Открытие года».

В следующем году команда участвует в соревнованиях Formula Student Russia 2015, для которого разрабатывает новый болид «Black Bullet», затратив на его создание около 1/15 части бюджета других именитых команд-участниц. По итогам соревнований Togliatti Racing Team становится бронзовым призёром в общем зачёте, а также занимает несколько призовых мест в отдельных видах, в том числе специальный приз от компании Nissan.

В 2016 году Togliatti Racing Team впервые в своей истории выступает на зарубежном этапе Formula Student East в Венгрии, где занимает 13 место в общей классификации, обойдя российские команды из МГТУ им. Баумана, МАДИ, РУДН и МАМИ.

Следующим большим успехом команды было участие в соревнованиях Formula Student Moscow 2018, где она выступает с новым болидом «Black Scorpion» и занимает первое место в итоговой классификации.

В 2019 году был создан седьмой гоночный болид «Black Scorpion G2». С ним команда выступила на международных соревнованиях «Formula Student Italy 2019», где впервые заняла 1 место в дисциплине Fuel Efficiency (топливная эффективность), а также 13 место из 43 команд в Overall (общий зачет), набрав в сумме 484 балла.

Кроме международных соревнований, команда приняла участие в российском этапе международных соревнований «Formula Student Russia 2019». По их итогам команда показала следующие результаты:

- Autocross (автокросс) – 1 место – 100 баллов;
- Fuel efficiency (топливная эффективность) – 1 место – 100 баллов;
- Acceleration (ускорение) – 1 место – 75 баллов;
- Overall (общий зачет) – 1 место – 808,51 баллов;

- SkidPad (восьмерка) – 2 место – 38,21 баллов;
- Cost report (отчет о стоимости) – 2 место – 95,5 баллов;
- Business presentation (презентация бизнес-плана) – 2 место – 70 баллов;
- Endurance (гонка на выносливость) – 3 место – 199,79 баллов;
- Design report – 3 место – 130 баллов.

За успешные результаты сезона 2019 министр образования Самарской области В. А. Акопьян и глава г. о. Тольятти С. А. Анташев наградили команду Togliatti Racing Team почетными грамотами.

В 2020 году был создан восьмой гоночный болид «Red Scorpion G3». Он успешно выступил на соревнованиях «Formula Student Russia 2020». Команда заняла следующие призовые места:

- Overall (общий зачет) – 1 место – 513,5 баллов;
- AutoX (автокросс) – 1 место – 100 баллов;
- Business presentation (презентация бизнес-плана) – 1 место – 75 баллов;
- Cost & Manufacturing event (отчет о стоимости) – 1 место – 100 баллов;
- Acceleration (ускорение) – 2 место – 72,8 баллов;
- SkidPad (восьмерка) – 2 место – 55,7 баллов;
- Design Event (защита дизайна) – 3 место – 110 баллов.

В 2020 году команда Togliatti Racing Team стала трехкратным чемпионом России.

1 Общие сведения о проекте Formula Student

1.1 Актуальность и задачи проекта Formula Student

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 привнести 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.

В процессе выполнения проекта, на начальных его этапах, обеспечивается совместная работа кафедр и студенческих проектов, на

завершающих этапах в работу включается сеть отделов и лабораторий университета. Кооперация с ними, обеспечивает студенческий проект на стадии завершения отработкой сформированного в рамках проекта технического решения, его доводке до стадии «Опытный образец» [12].

Реализация проекта, в том числе нацелена на активную стимуляцию практической научно-технической деятельности в ТГУ и в будущем, как результат, повышение его экономической эффективности.

По окончании университета участники приобретают способность решать реальные профессиональные задачи в жестких рыночных условиях.

Задачей проекта Formula Student является создание конкурентоспособного автомобиля с бензиновым двигателем с минимальной себестоимостью.

1.2 Общая конфигурация болида проекта 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.

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.

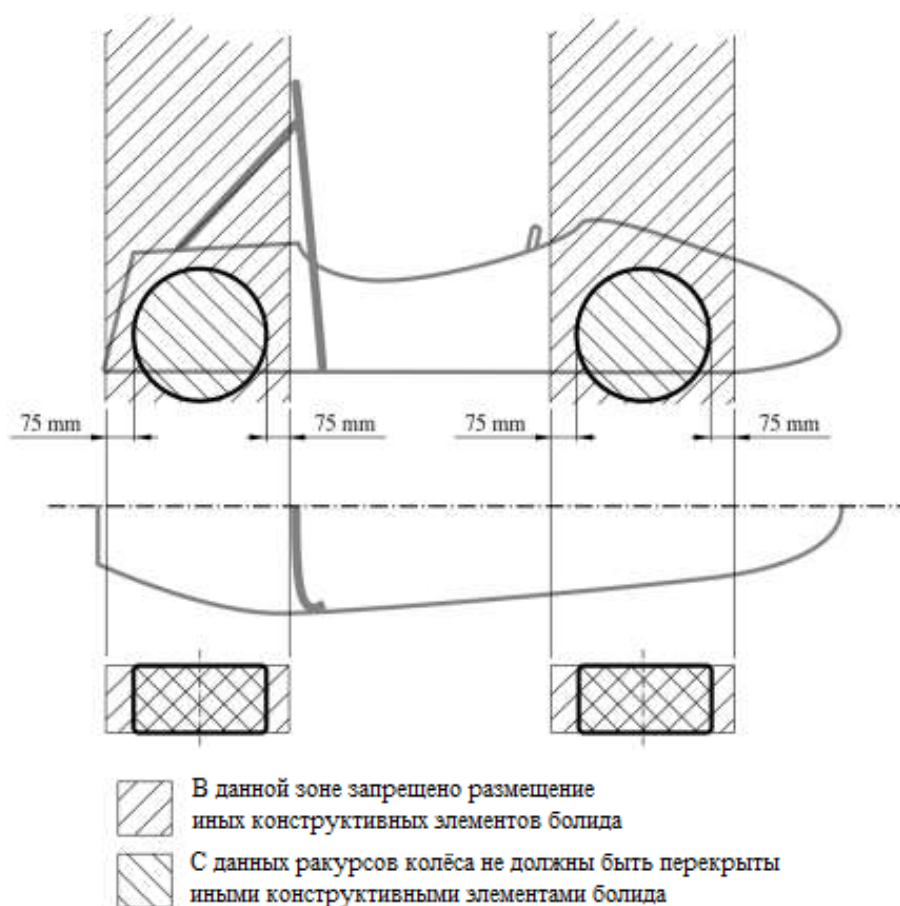


Рисунок 1 – Конфигурация болида с открытыми колёсами

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.

Размер меньшей колеи болида должен быть не менее 75 % от размера большей колеи.

Клиренс болида должен быть таким, чтобы исключить вероятность соприкосновения любых конструктивных элементов болида (кроме колёс) с поверхностью гоночного полотна.

Запрещено использование элементов аэродинамического обвеса, а также иных элементов конструкции болида, которые при его движении соприкасаются с поверхностью гоночного полотна, так как это может привести к потере прижимной силы во время соревнований и, как следствие, к вылету с трассы, аварии и повреждениям спортсменов и зрителей [5].

Компоновка места пилота должна быть выполнена таким образом, чтобы при перевороте болида его голова и руки не соприкасались с поверхностью земли (рисунок 2) [10].



Рисунок 2 – Компоновка места пилота

Конструкция болида должна обеспечивать достаточный обзор для пилота спереди и по бокам, при этом его поле зрения при естественном положении в болиде должно быть не менее 100 градусов.

2 Конструирование гоночного болида

«Formula Student» как производственная система включает два подразделения: проектное и производственное.

Проектный центр предназначен для выполнения всего комплекса работ по конструкторской и технологической подготовке производства гоночного автомобиля. К его деятельности также относится разработка дизайн-проекта будущего болида. Продуктом проектного центра является полный комплект проектной, конструкторской и технологической документации, необходимый для изготовления машины, геометрические трёхмерные САД-модели её элементов, документированные результаты проводимых инженерных расчётов при помощи систем САЕ (отчёты, пояснительные записки, наборы диаграмм и иные результаты исследования моделей технических систем). Кроме того, в задачи проектного центра входит подготовка финансовой документации и решений, презентаций для участия в конкурсе, проектов рекламной продукции, текстов для освещения событий, и прочих продуктов, которые, помимо самого автомобиля, необходимы для соревнований и в процессе создания болида.

Деятельность проектного центра структурирована на ряд групп, решающих различные задачи, направленные на создание гоночного автомобиля и участие в соревнованиях. Задачи и формируемые на их основе группы могут быть разделены по принадлежности непосредственно к проектированию и изготовлению болида и его систем на «инженерные» и «обеспечивающие».

В настоящий момент отделы укрупнены по виду решаемых задач, что позволило повысить скорость принятия решений и оптимизировать состав команды. Кроме того, появился отдел логистики, отвечающий за своевременную доставку гоночного болида к местам соревнований команды и менеджер команды, отвечающий за быстрое решение текущих вопросов по всем направлениям деятельности команды.

2.1 Проектирование несущей системы автомобиля

При разработке гоночного болида требуется анализ конструкционной прочности отдельных элементов. На некоторые наложены жесткие ограничения по регламенту проекта Formula Student [6]. Одним из базовых элементов является рама гоночного болида [2-4, 7]. Конструкция рамы состоит из гнутых и прямых стальных труб сваренных между собой и образующих единый каркас.

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.

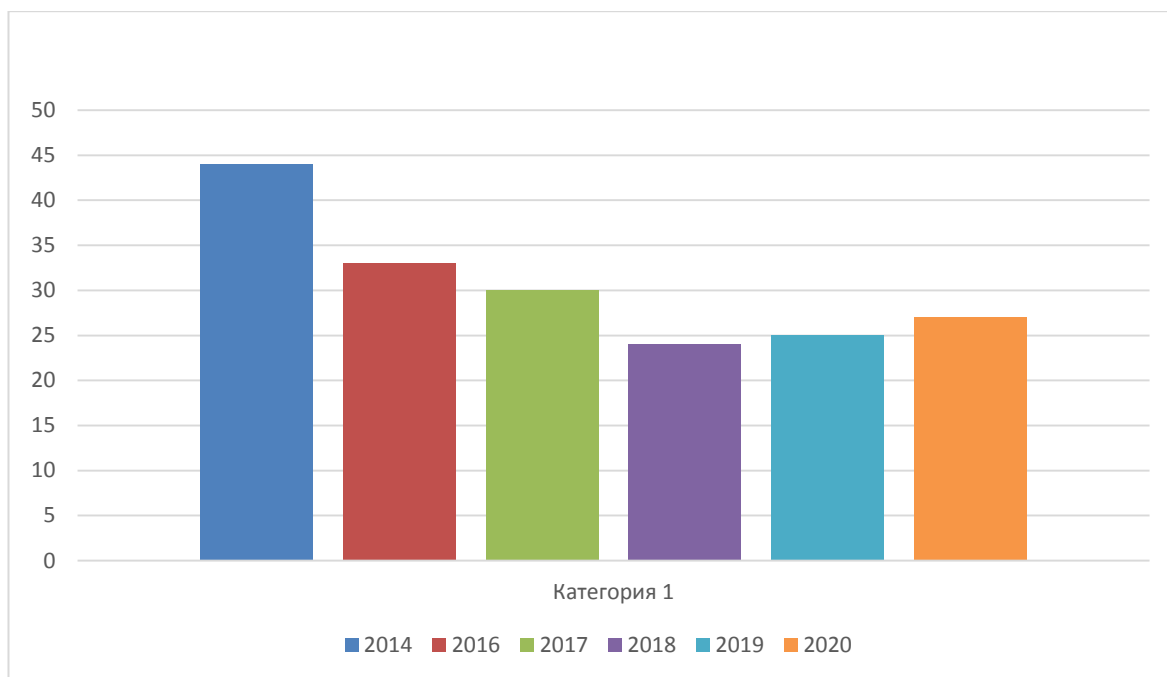


Рисунок 3 – Изменение массы рамы гоночного болида

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.

На рисунке 4 представлена цветовая схема рамы болида, где цветом указаны трубы соответственно легенде.

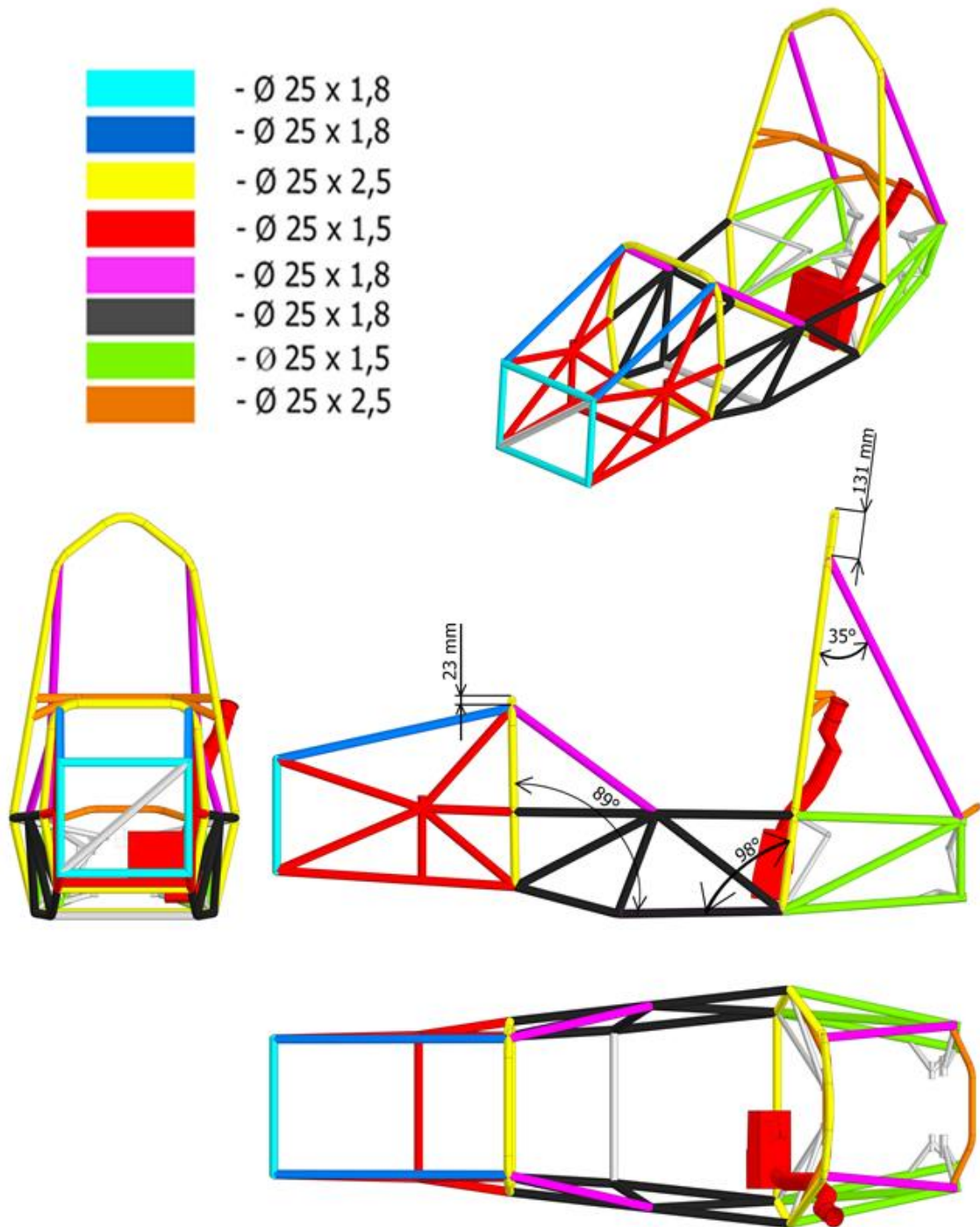


Рисунок 4 – Тип трубного сечения в компоновке рамы

На рисунках 5-8 представлен результат анализа конструкций передней и главной дуг.

При моделировании использовали одномерные (стержневые) конечные элементы, хорошо зарекомендовавшие себя при решении задач подобного типа.

Точки приложения и направления векторов сил стандартизованы регламентом проекта, согласно которому деформация конструкции во всех случаях не должна превышать 25 мм.

Так на рисунках 5 и 7 представлены граничные условия, а на рисунках 6 и 8 суммарные перемещения деформируемых элементов в миллиметрах. Как видно, граничное условие – жесткая фиксация узлов по обеим сторонам передней и главной дуг.

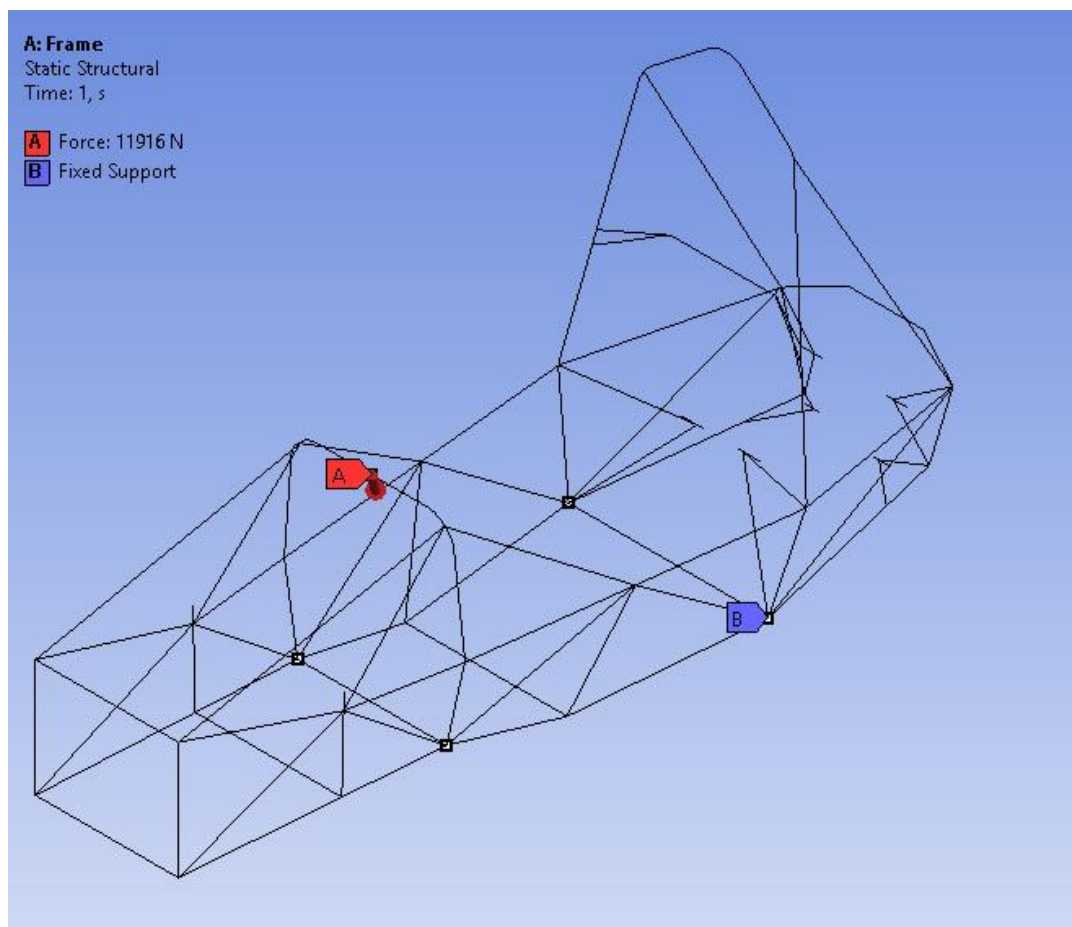


Рисунок 5 – Граничные условия при нагружении передней дуги

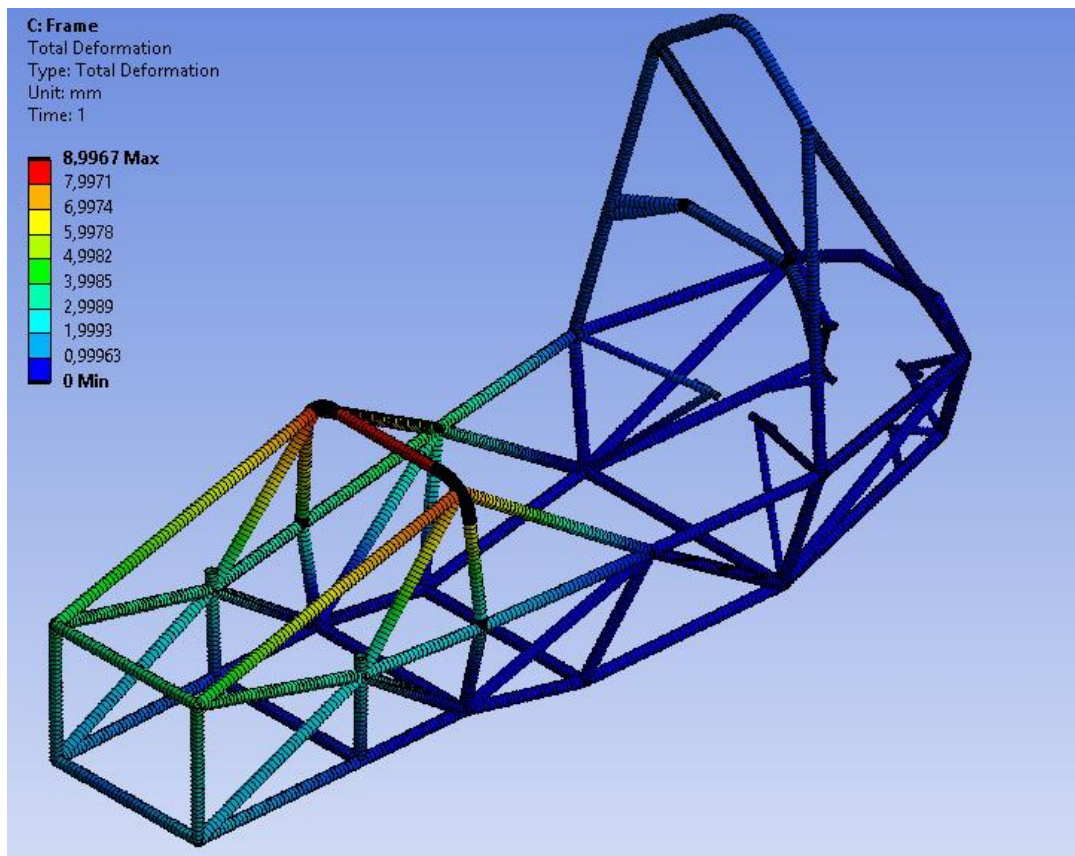


Рисунок 6 – Перемещения при нагружении передней дуги

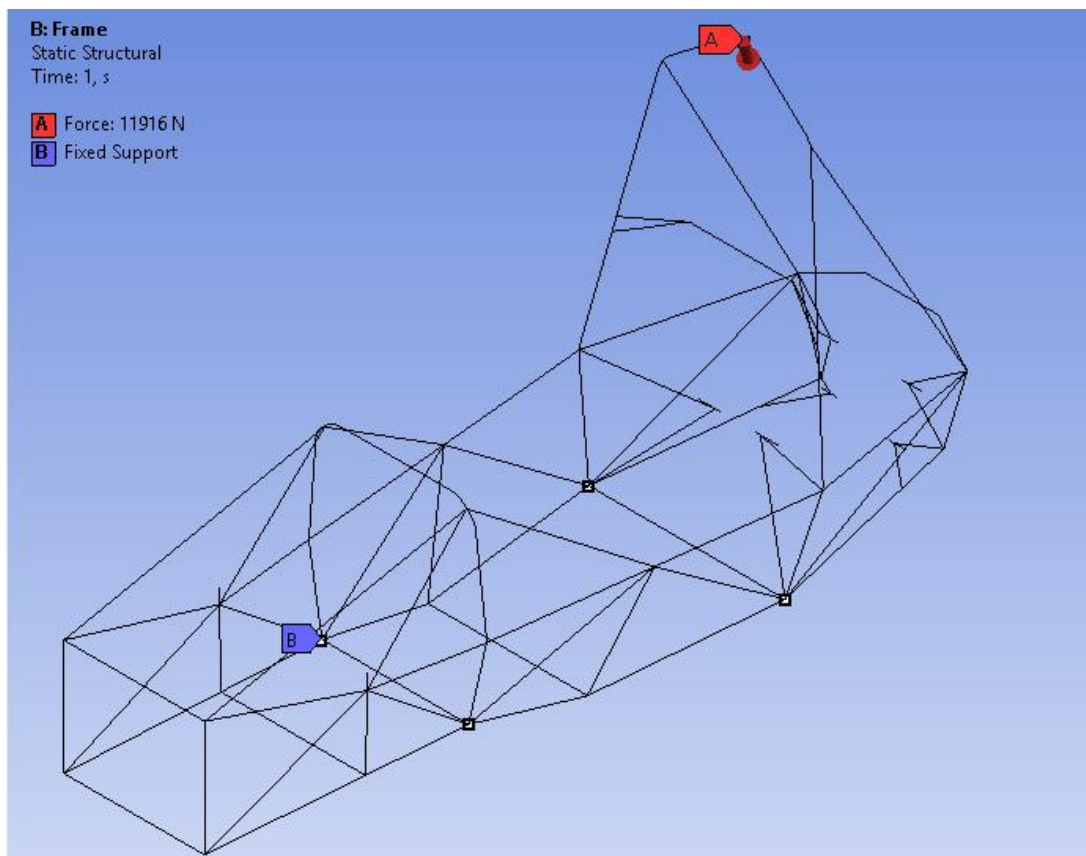


Рисунок 7 – Граничные условия при нагружении главной дуги

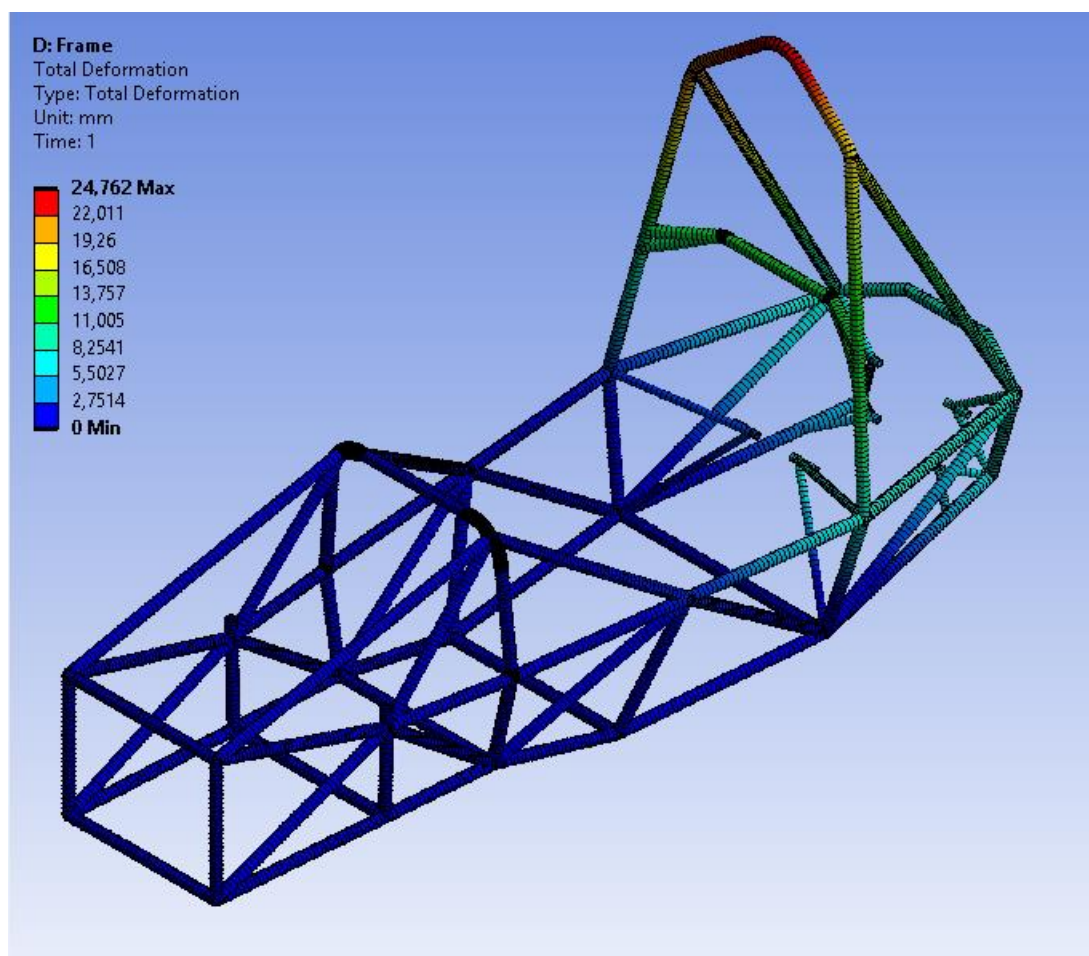


Рисунок 8 – Перемещения при нагружении главной дуги

Как видно, конструкция деформируется в допустимых пределах (величина деформации не должна превышать 25 мм).

Далее проанализируем деформацию рамы при нагружении передней балки по оси болида и вне оси.

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.

Так на рисунках 9 и 11 представлены граничные условия, а на рисунках 10 и 12 – результаты моделирования.

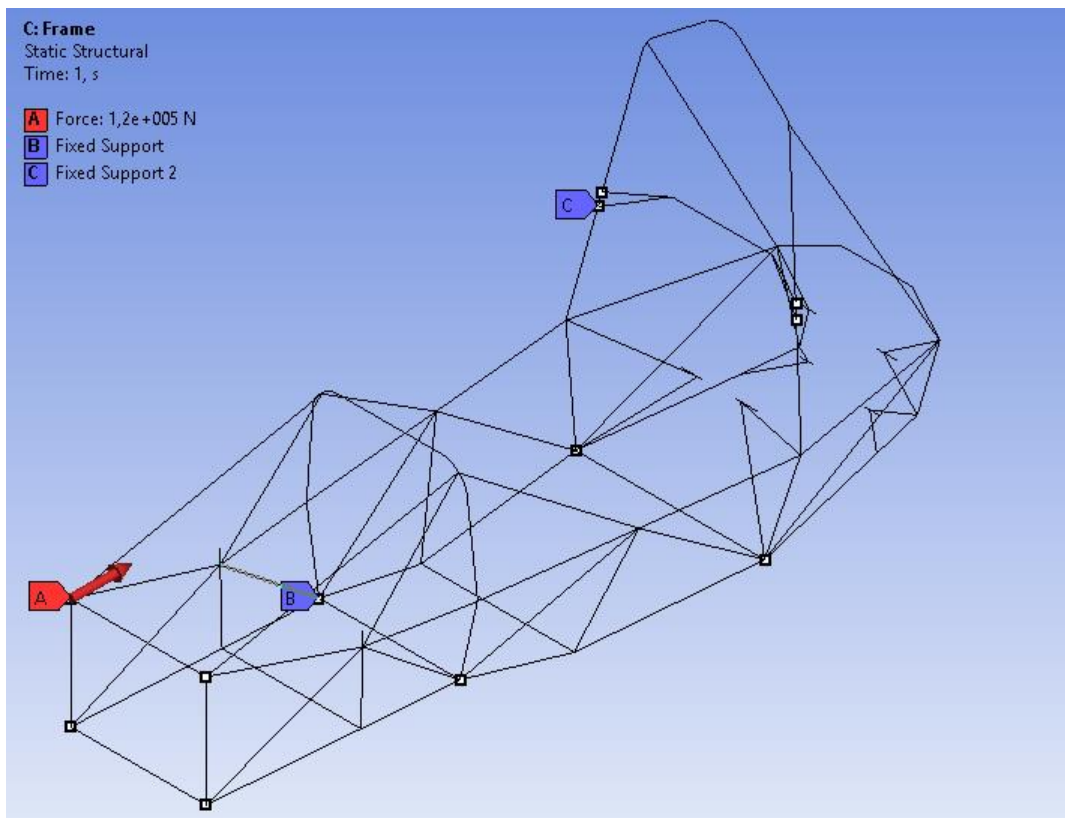


Рисунок 9 – Граничные условия при нагружении по оси

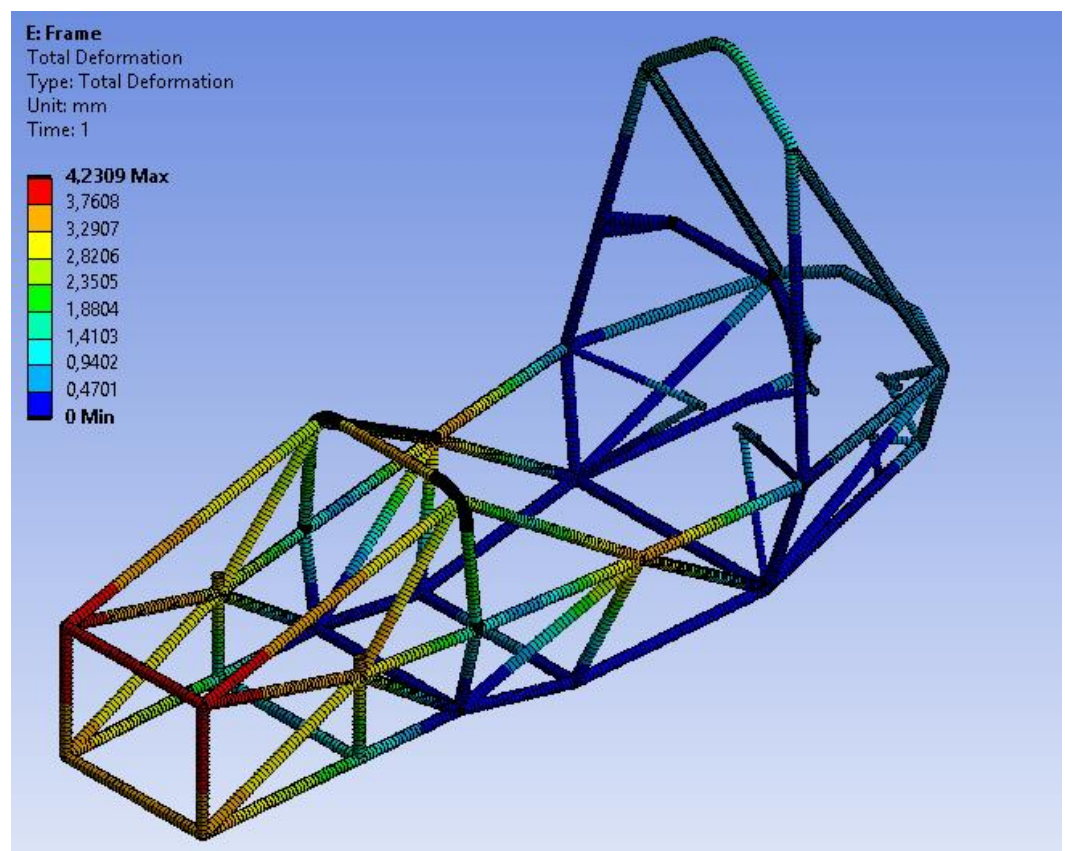


Рисунок 10 – Перемещения при нагружении по оси

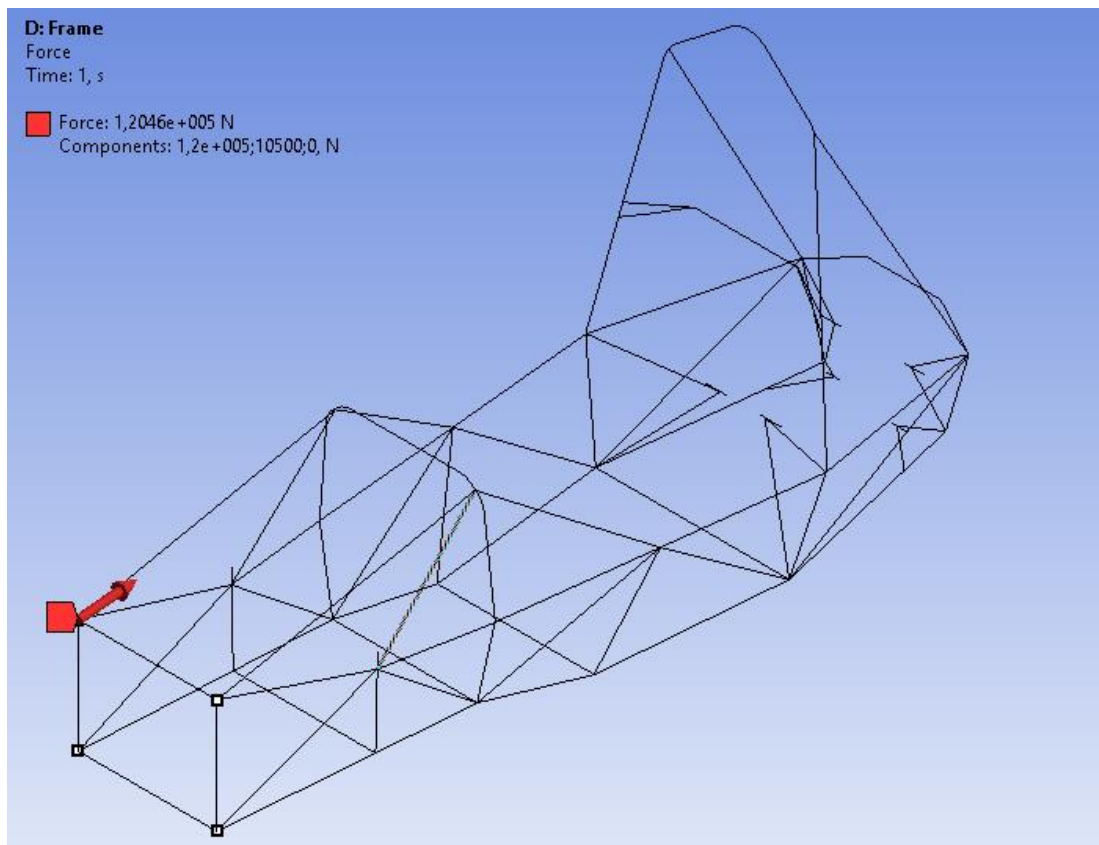


Рисунок 11 – Граничные условия при нагружении вне оси

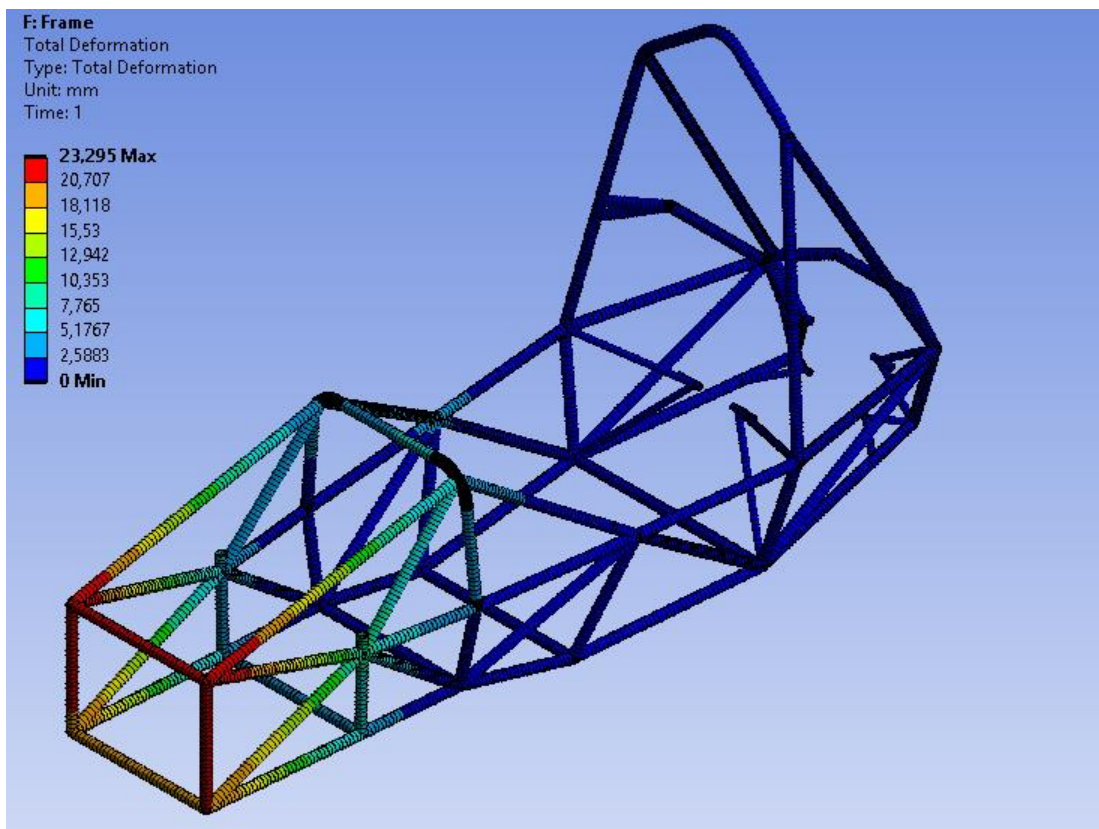


Рисунок 12 – Перемещения при нагружении вне оси

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.

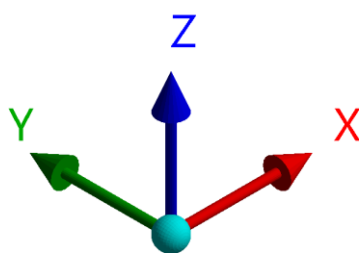


Рисунок 13 – Система координат

Так на рисунке 14 представлены граничные условия рамы при расчете ее на жесткость, а на рисунках 15-17 представлены результаты моделирования перемещений под нагрузкой общих и по осям Y и Z соответственно.

Расчет жесткости выполняли по смещению точки максимального перемещения по оси Y (рисунок 16). Соответственно для этой же точки определяли перемещение по оси Z (рисунок 17) и по этим данным высчитывали угол смещения этой точки.

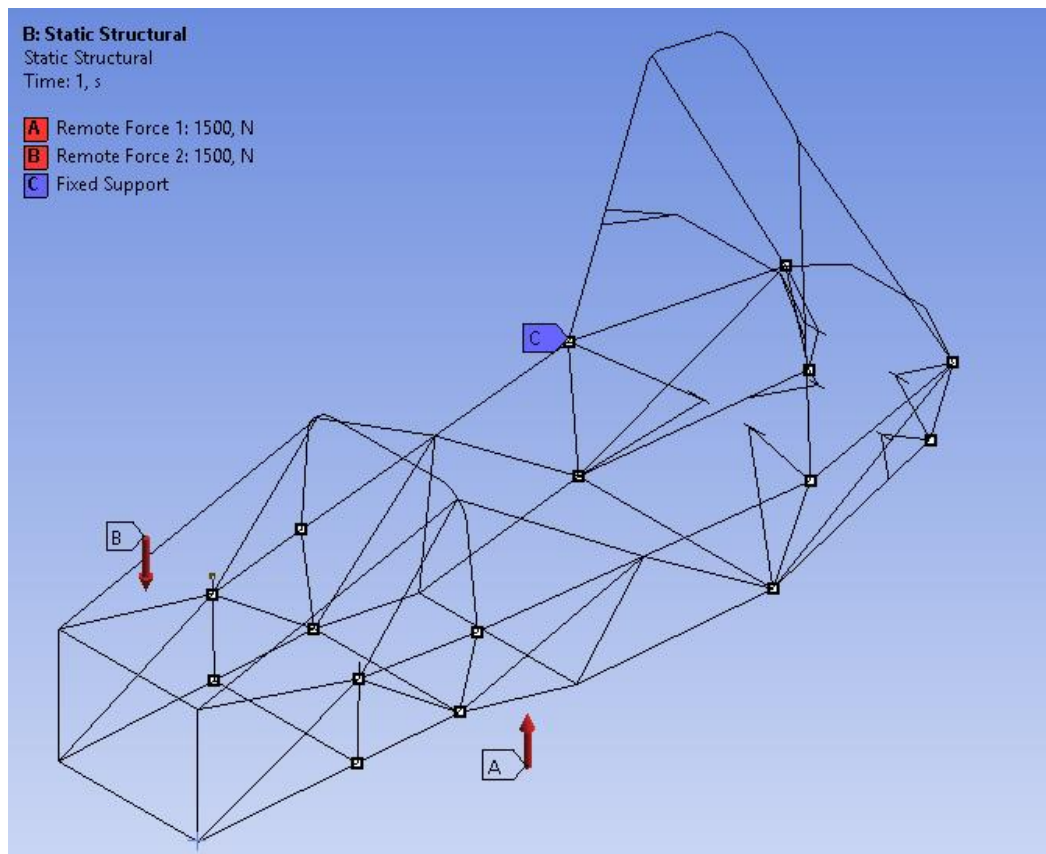


Рисунок 14 – Граничные условия при расчете жесткости

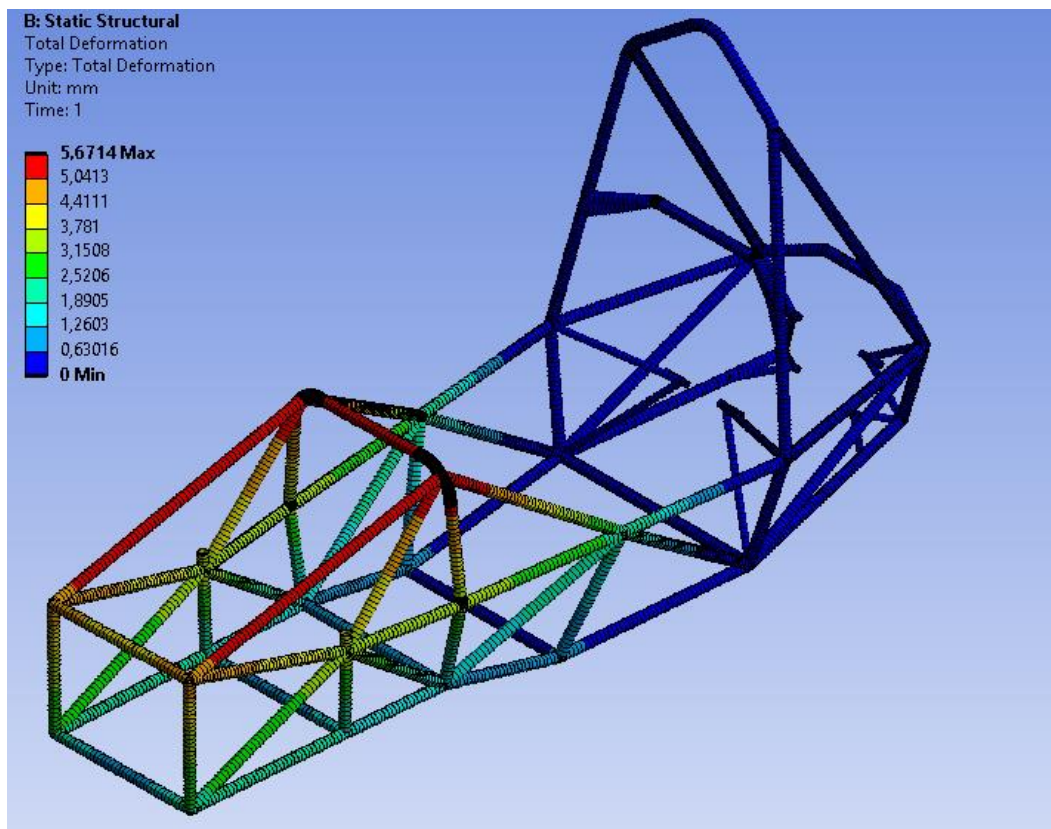


Рисунок 15 – Общие перемещения при расчете жесткости

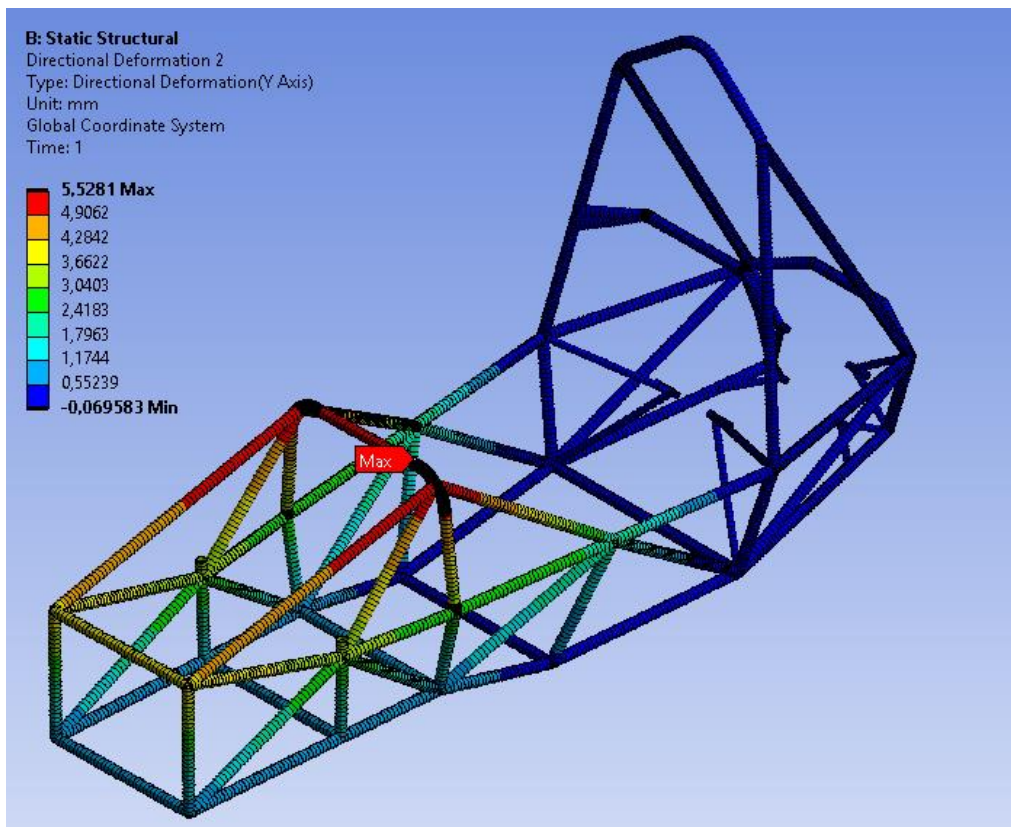


Рисунок 16 – Перемещения по оси Y при расчете жесткости

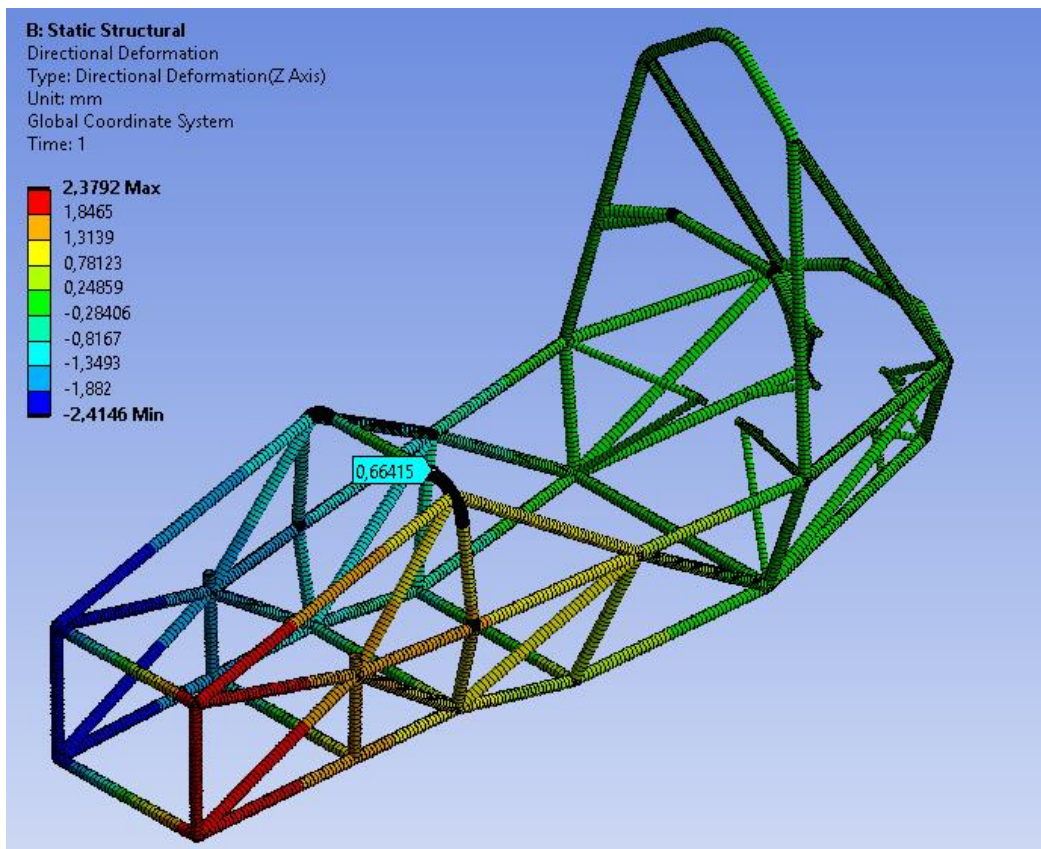


Рисунок 17 – Перемещения по оси Z при расчете жесткости

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

2.2 Проектирование аэродинамических элементов автомобиля

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 аэробвесу.

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 [8].

Для подбора профиля антикрыла использовалась база данных профилей [1]. Исходя из нужных нам параметров, был выбран профиль Gottingen 804 (EA 8).

Информация профиля Gottingen 804 (EA 8) представлена на рисунке 18.

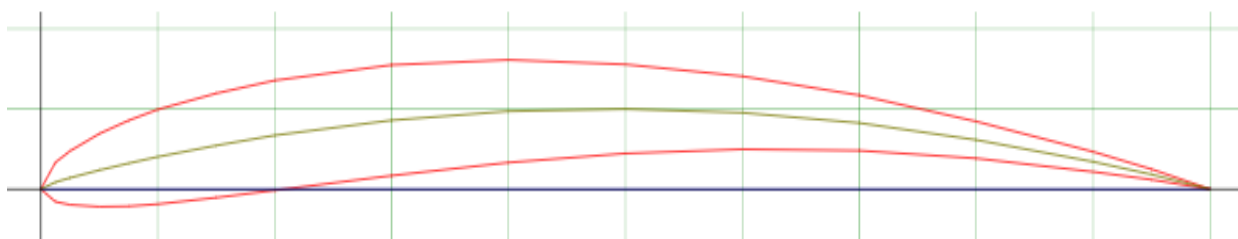


Рисунок 18 – Информация о внешнем виде профиля

На рисунке 19 представлены параметры профиля крыла от угла его атаки.

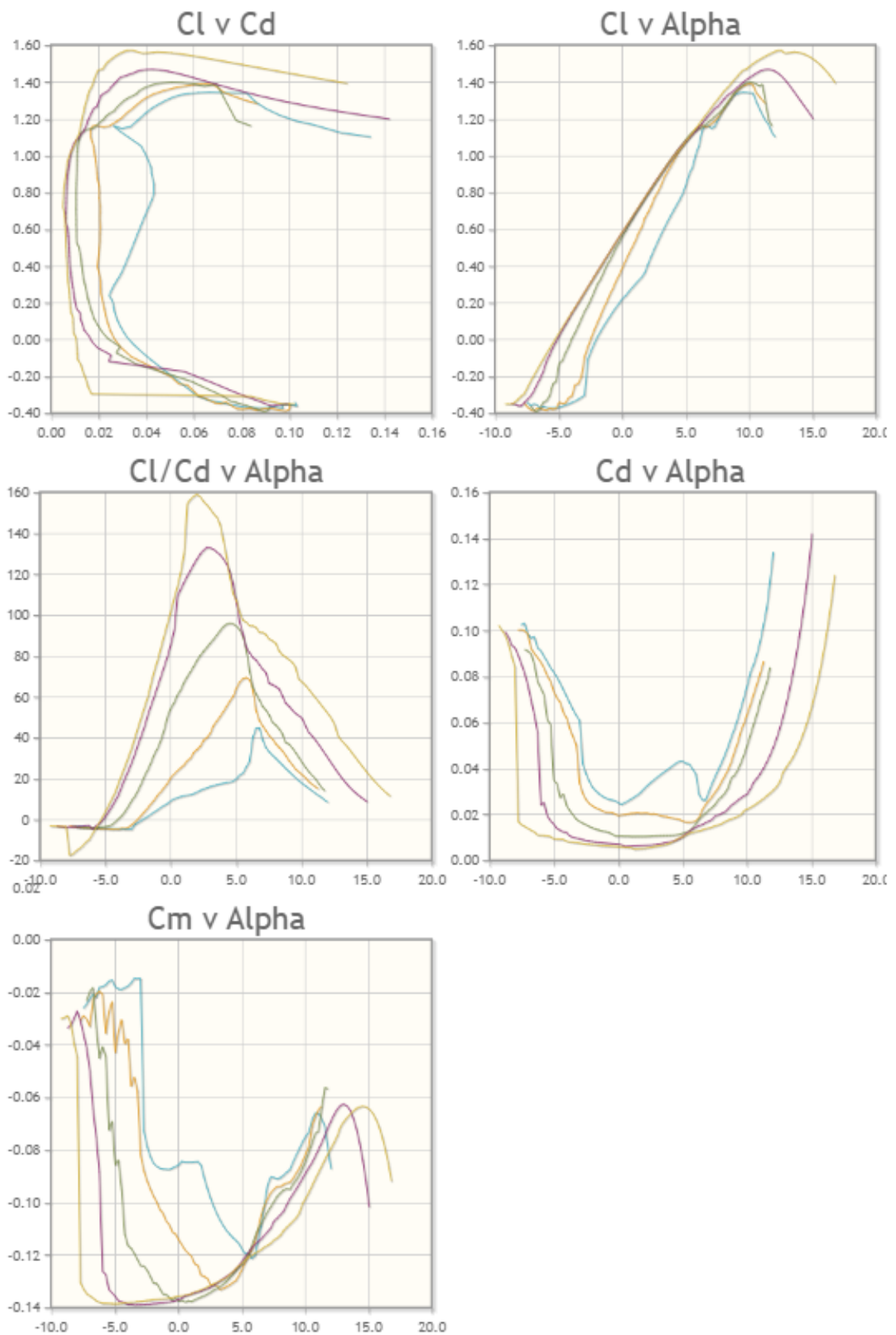


Рисунок 19 – Зависимости характеристик профиля

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.

Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения прижимной силы

Скорость	80 км/ч		60 км/ч		40 км/ч	
	Прижимная сила, Н	Сила сопротивления, Н	Прижимная сила, Н	Сила сопротивления, Н	Прижимная сила, Н	Сила сопротивления, Н
Переднее антикрыло	242	59	130	32	65	16
Заднее антикрыло активное	212	89	116	48	58	24
Заднее антикрыло неактивное	79	17	43	10	21	4

На рисунках 20-28 представлены скриншоты рабочего поля программы, снятых при моделировании давления воздуха, прижимной силы и силы сопротивления на различных скоростях при варьировании положения антикрыльев.

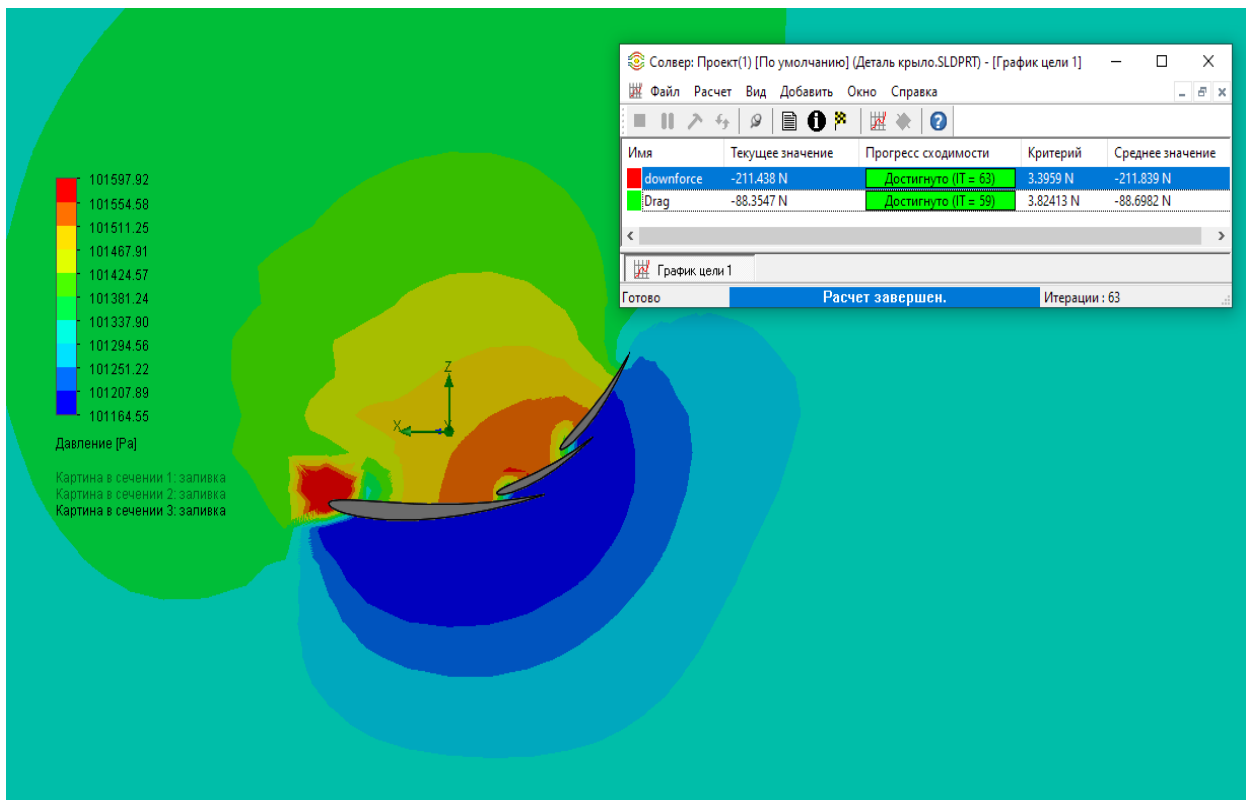


Рисунок 20 – Давление воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на 80 км/ч при активном положении антикрыльев

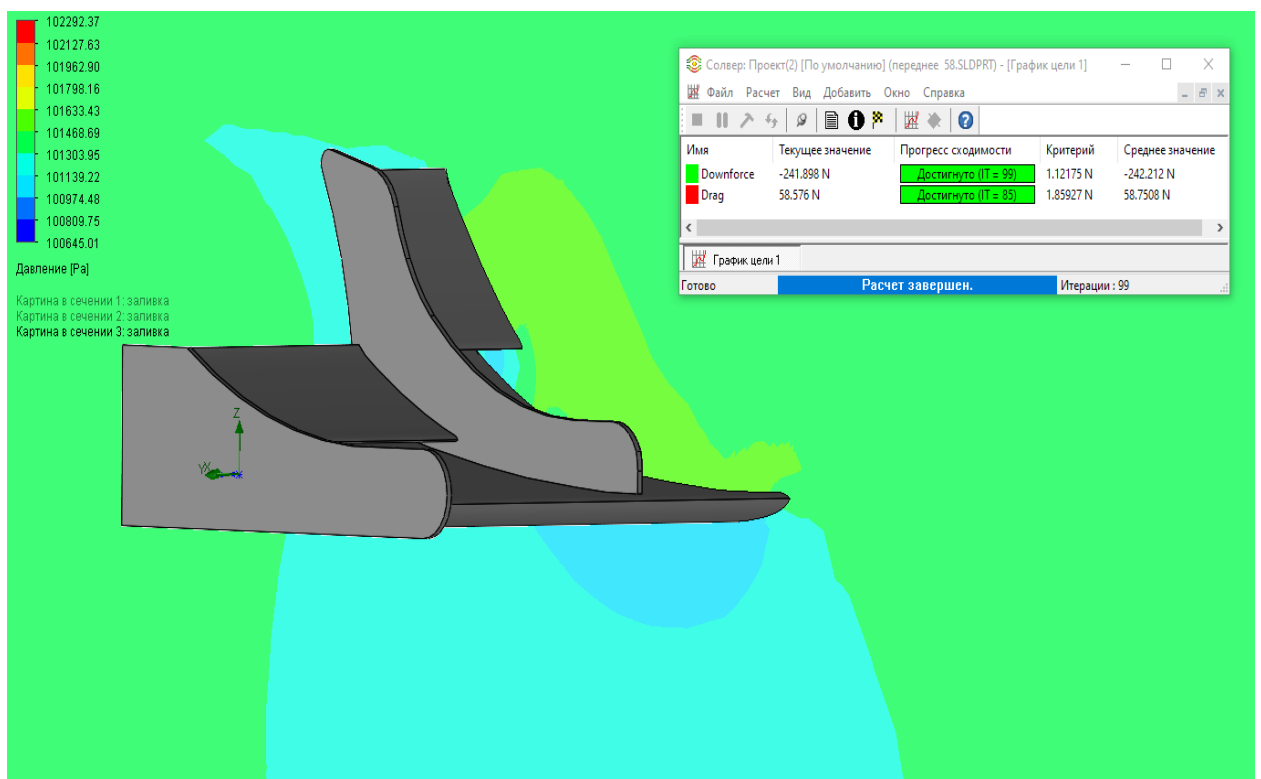


Рисунок 21 – Давление воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на 80 км/ч на переднем крыле

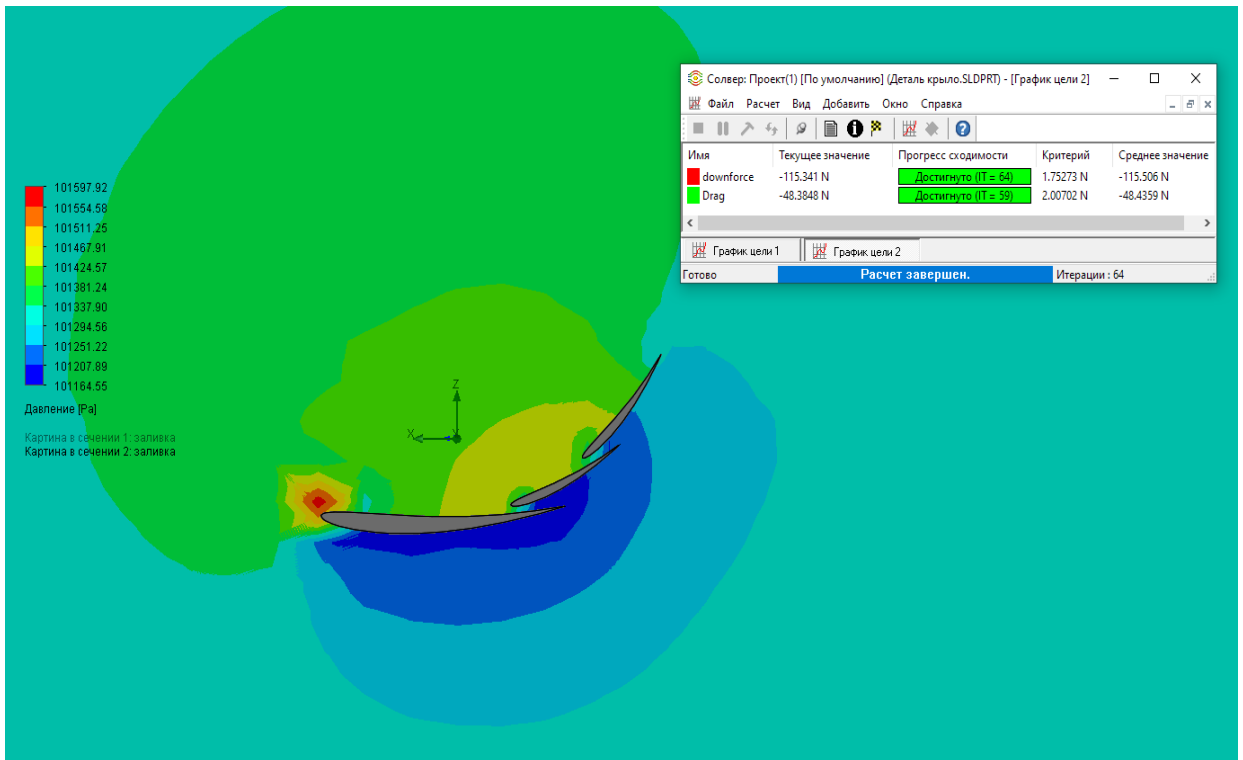


Рисунок 22 – Давление воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на 60 км/ч при активном положении антикрыльев

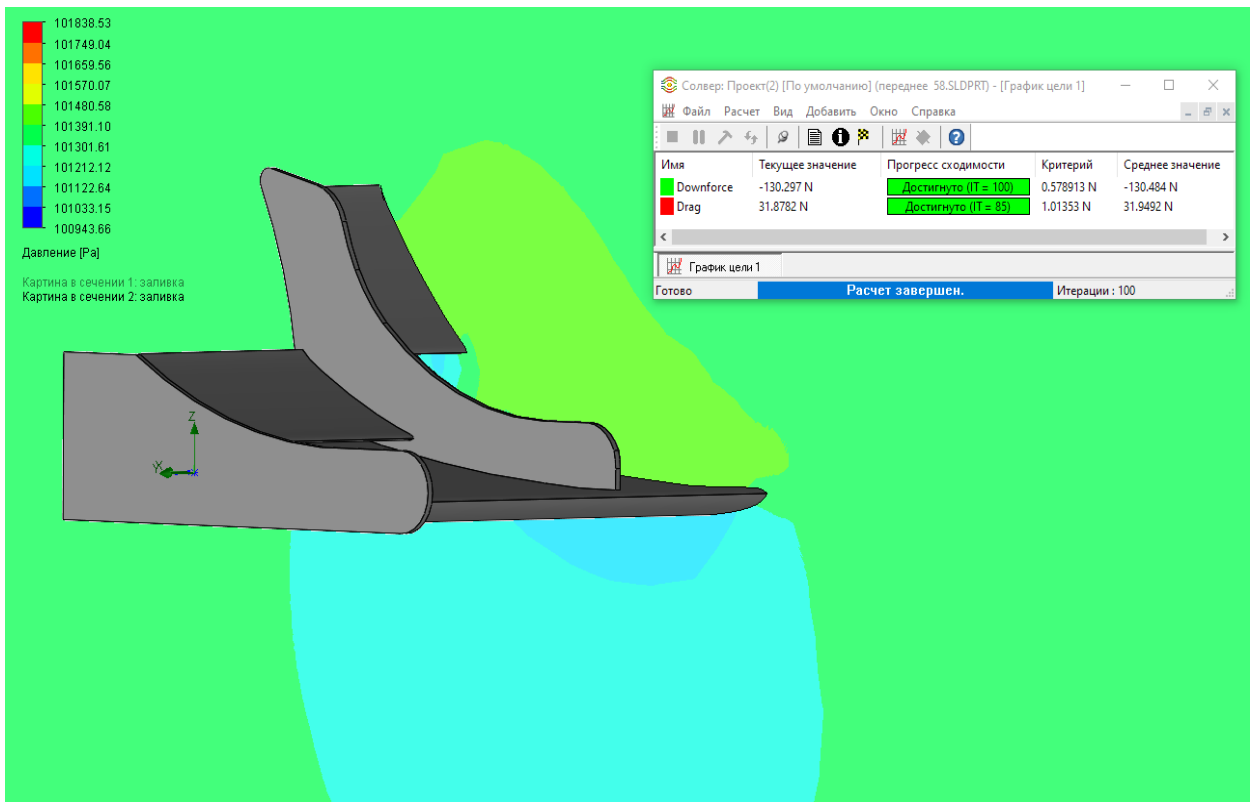


Рисунок 23 – Давление воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на 60 км/ч на переднем антикрыле

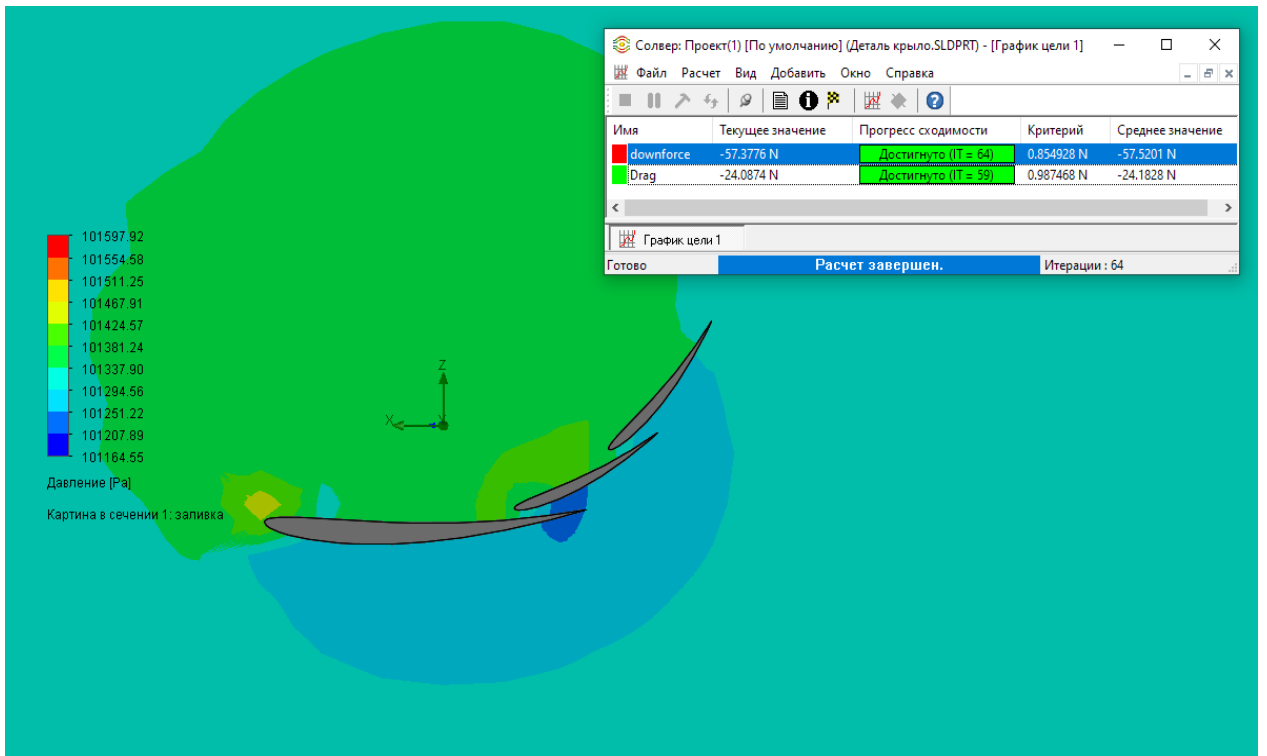


Рисунок 24 – Давление воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на 40 км/ч при активном положении антикрыльев

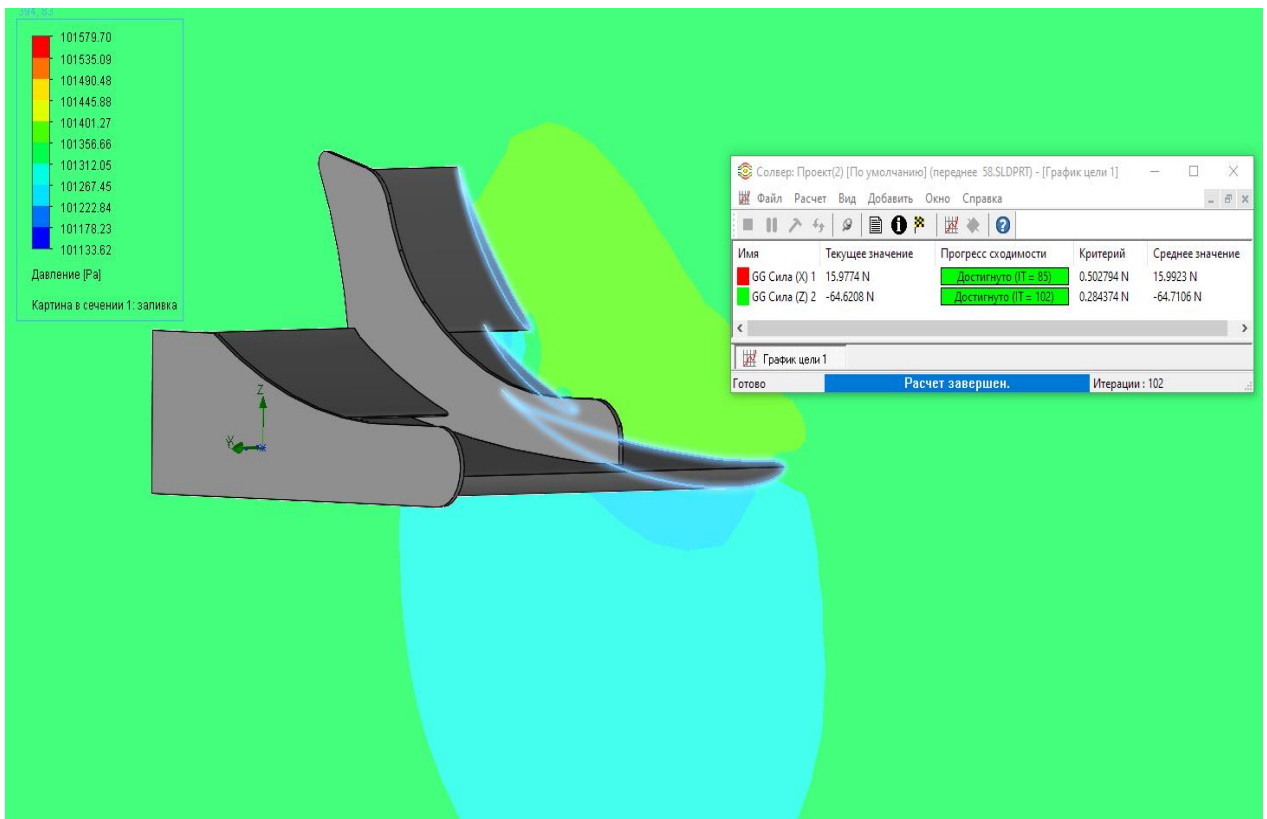


Рисунок 25 – Давление воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на 40 км/ч на переднем антикрыле

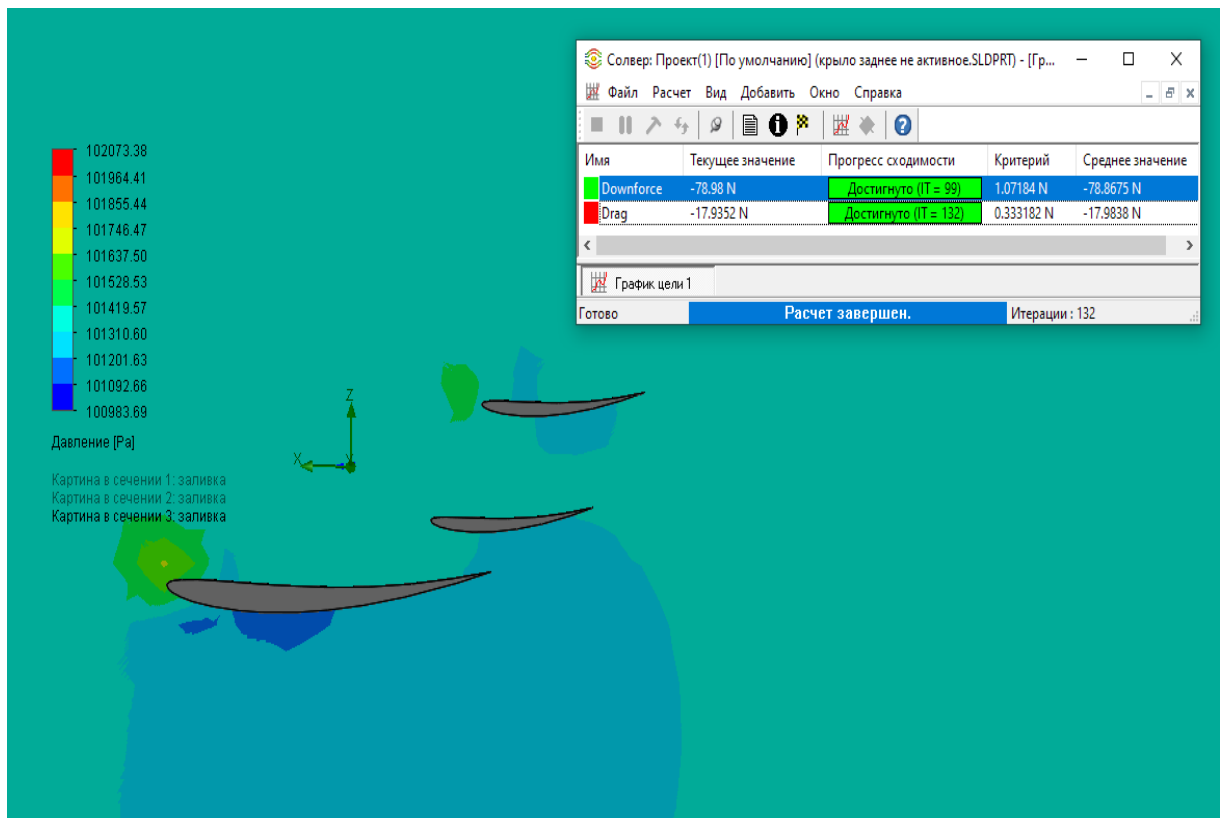


Рисунок 26 – Давление воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на 80 км/ч при нулевом положении антикрыльев

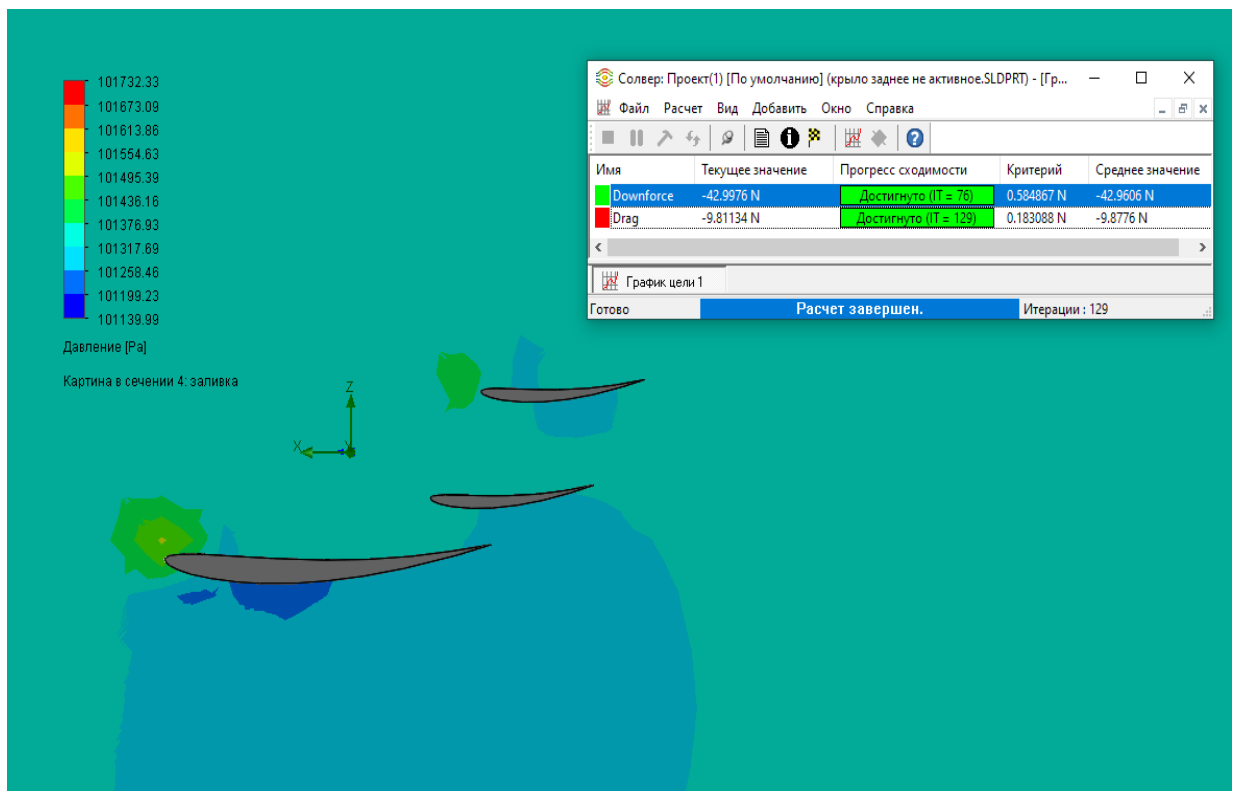


Рисунок 27 – Давление воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на 60 км/ч при нулевом положении антикрыльев

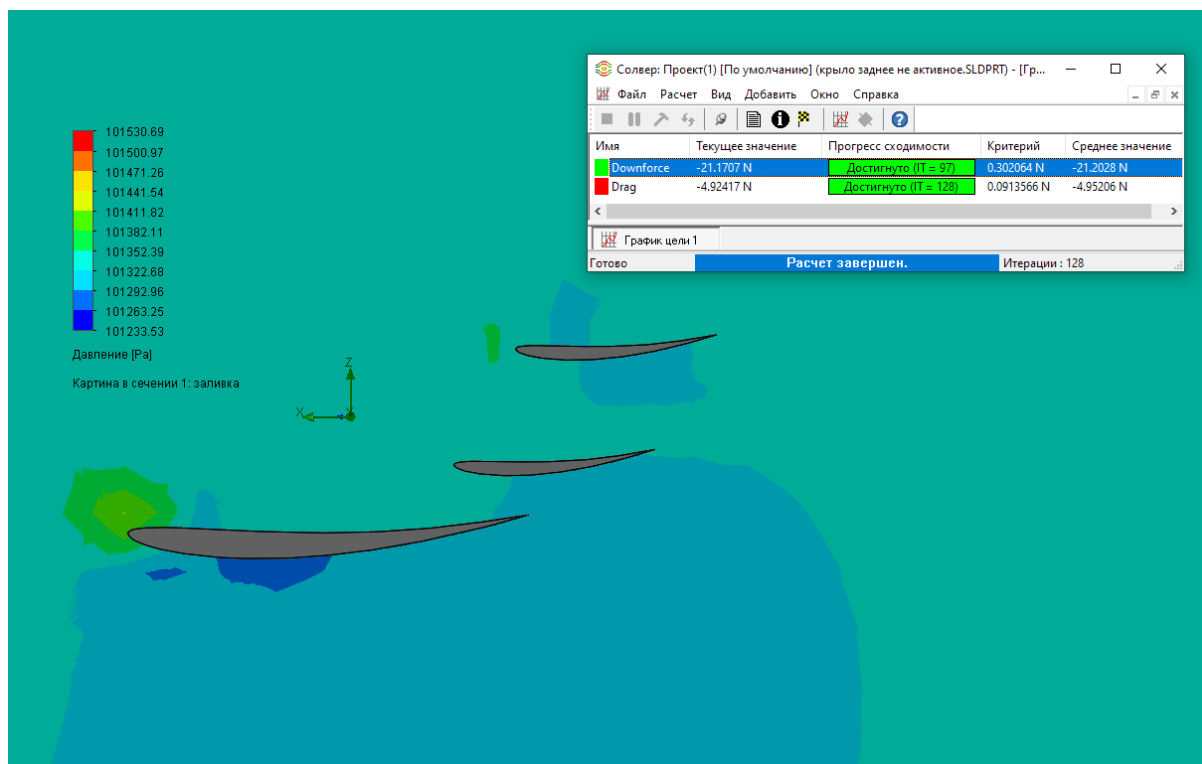


Рисунок 28 – Давление воздуха, прижимная сила и сила сопротивления на 40 км/ч при нулевом положении антикрыльев

Для обеспечения минимального веса и в тоже время достаточной прочности крыла, мы использовали каркас из карбоновых труб и шпангоутов из 6 мм фанеры, а также алюминия толщиной 2 мм. Так как задача была сделать прочное и легкое крыло, мы использовали соответствующие материалы. Этим и обусловлено использование карбоновых труб. Мы использовали трубы разного диаметра (20, 18, 16 мм), и распределили их по всей длине профиля (рисунки 29-30).



Рисунок 29 – 3D-модель пространственной рамы для заднего антикрыла

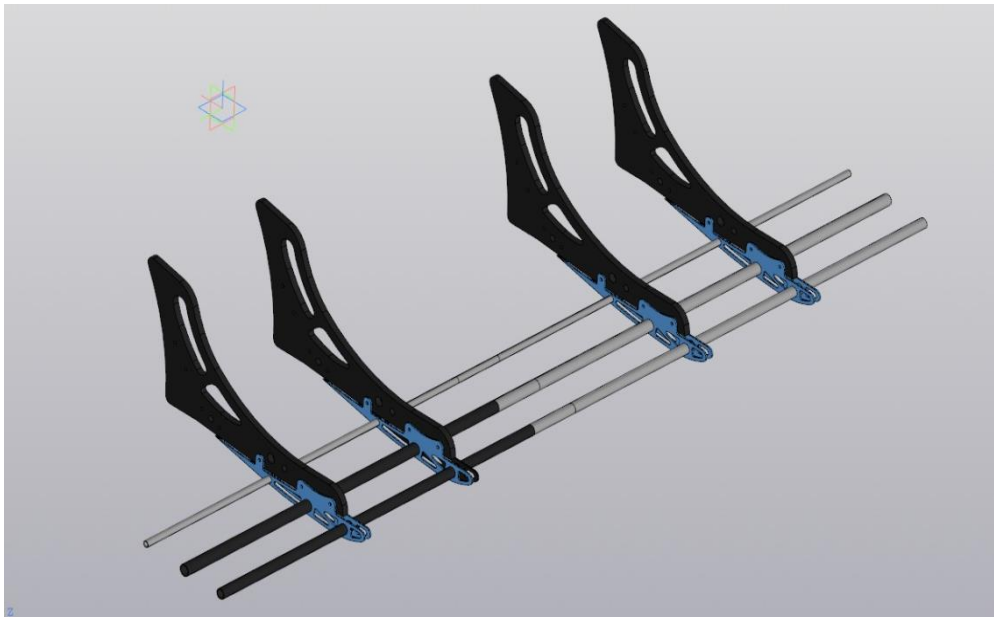


Рисунок 30 – 3D-модель пространственной рамы для переднего антикрыла

Шпангоуты должны быть максимально точными, потому что от них зависит ровность крыла, поэтому все шпангоуты для большого антикрыла были вырезаны с помощью лазерной резки (рисунки 31-32).



Рисунок 31 – Шпангоуты из алюминия, толщиной 2 мм



Рисунок 32 – Шпангоуты из фанеры, толщиной 6 мм

В конструкции маленьких антикрыльев также используются шпангоуты, напечатанные на 3D-принтере (рисунок 33).



Рисунок 33 – Шпангоуты, напечатанные на 3D-принтере

После создания пространственной рамы мы приступили к изготовлению поверхности антикрыльев из композитных материалов (рисунок 34).



Рисунок 34 – Пластины поверхности антикрыльев

На рисунках 35-36 представлены модели уже полностью спроектированных антикрыльев, установленных на гоночном болиде «Red Scorpion G3».

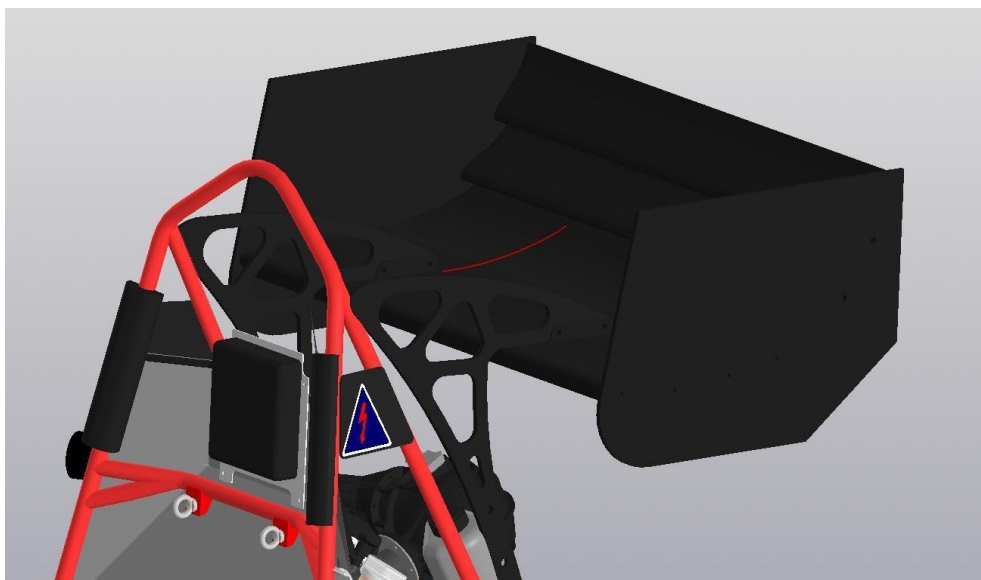


Рисунок 35 – Заднее антикрыло на болиде

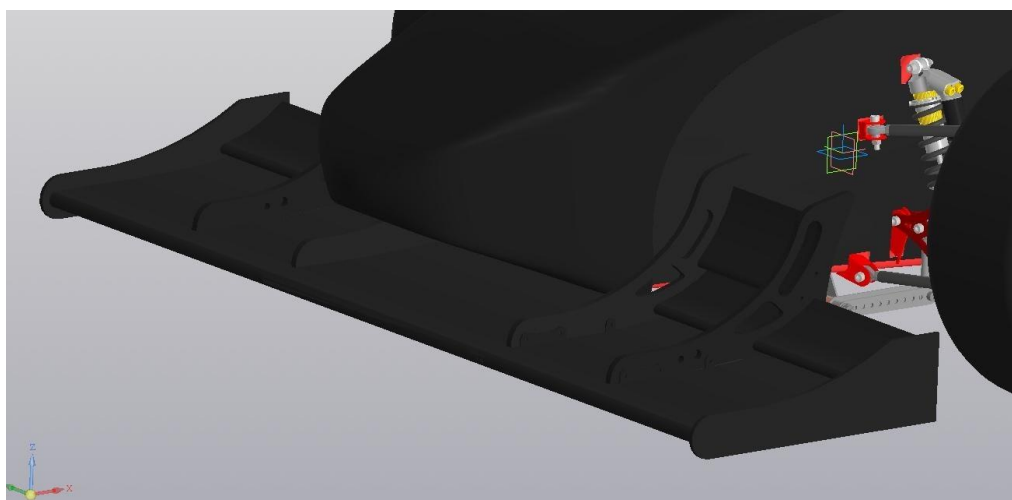


Рисунок 36 – Переднее антикрыло на болиде

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

2.3 Проектирование ходовой части гоночного автомобиля

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 [16].

Подвеска автомобиля – сложная конструкция, включающая в себя следующие элементы [14, 17-19]:

- 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.

Команда TRT использует программу Lotus Suspension Analysis для проектирования подвески болида класса «Formula Student» (рисунки 37-38).

В данной программе, путем изменения координат точек вышеперечисленных элементов в пространстве, задается оптимальная геометрия, обеспечивающая правильную работу подвески на гоночных трассах инженерно-спортивных соревнований Formula Student.

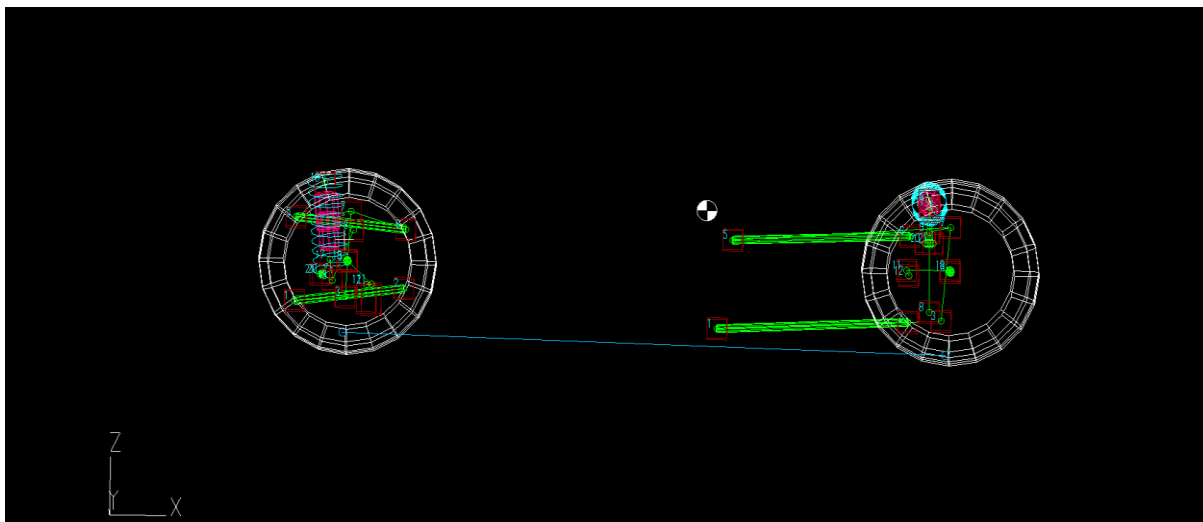


Рисунок 37 – Расчет подвески в программе Lotus Suspension Analysis (вид сбоку)

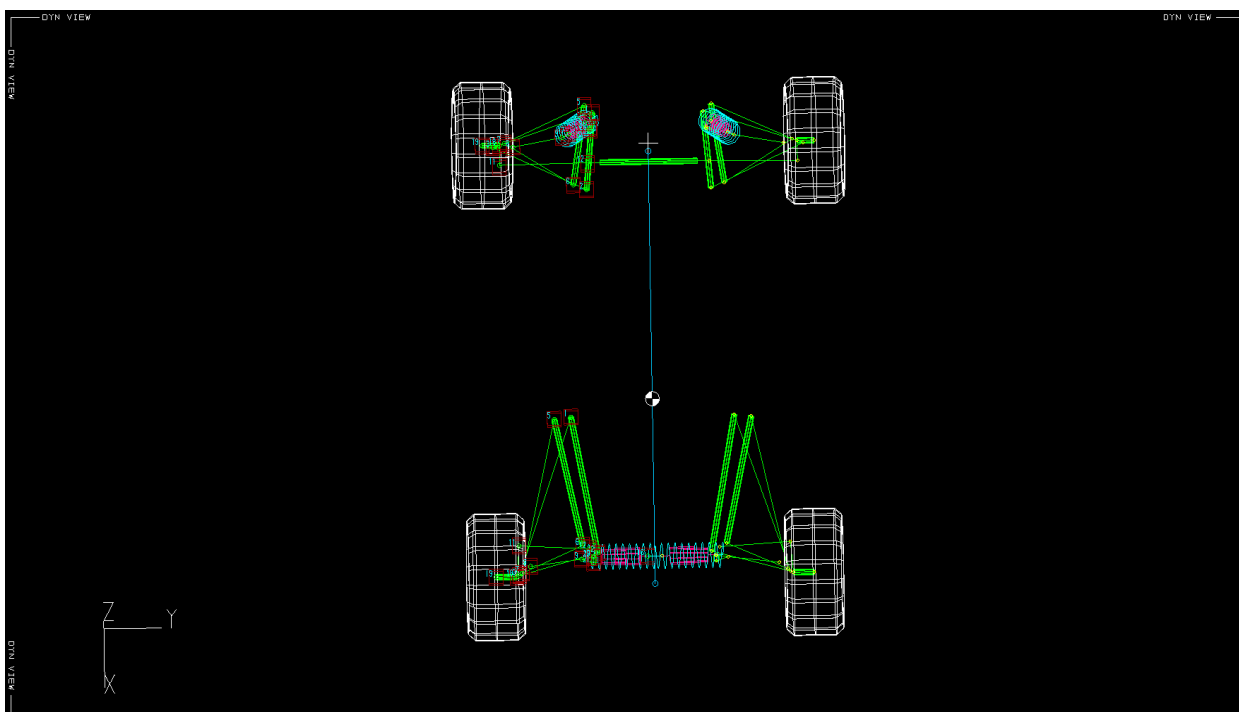


Рисунок 38 – Расчет подвески в программе Lotus Suspension Analysis (вид сверху)

После того, как геометрия подвески оптимизирована, полученные

координаты точек переносятся в программы для 3D-моделирования (наша команда использует КОМПАС 3D, Autodesk Fusion 360), чтобы установить элементы подвески на раму и спроектировать по данным точкам конструкцию отдельных узлов (рисунки 39-40).

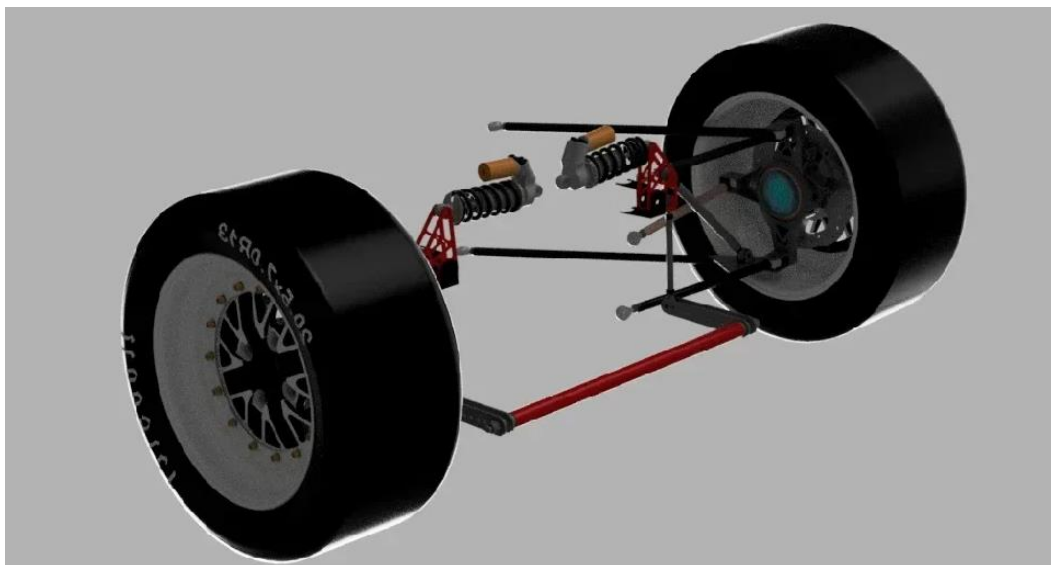


Рисунок 39 – 3D модель задней подвески

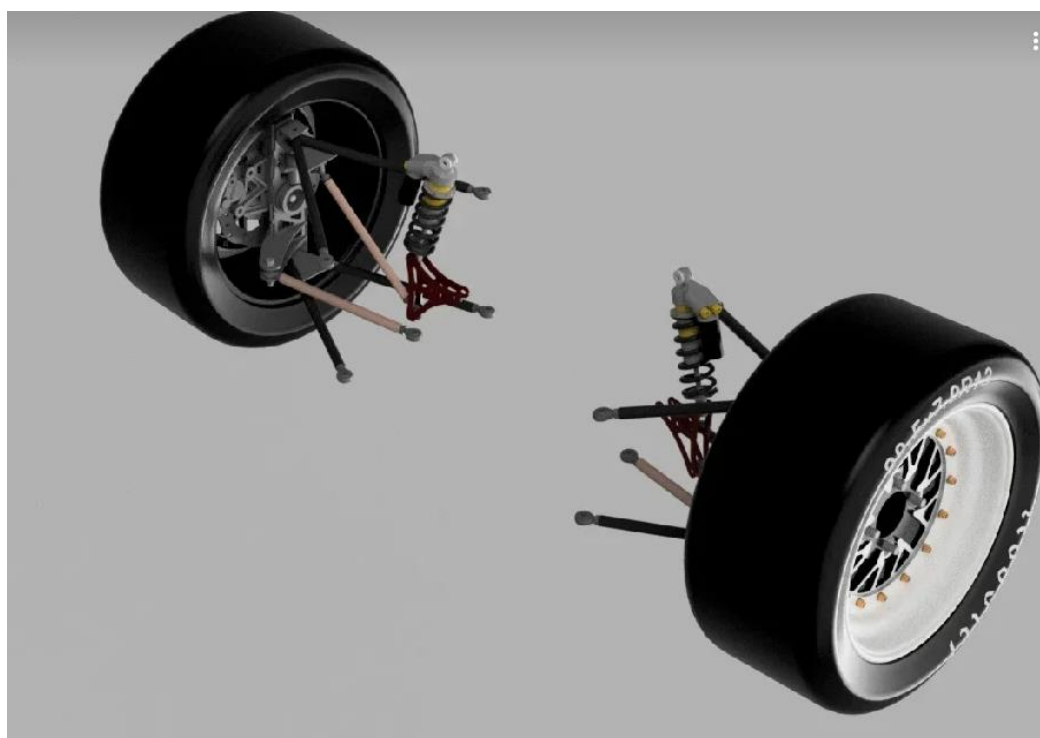


Рисунок 40 – 3D-модель передней подвески

Когда 3D-модель полностью собрана и скомпонована, начинается процесс проектирования оснастки для точной сборки компонентов, которые будут установлены на болид. Оснастка (рисунок 41) проектируется таким образом, чтобы при сборке соблюдались все углы и длины изделия, а так же исключались малейшие деформации металла при сварке.

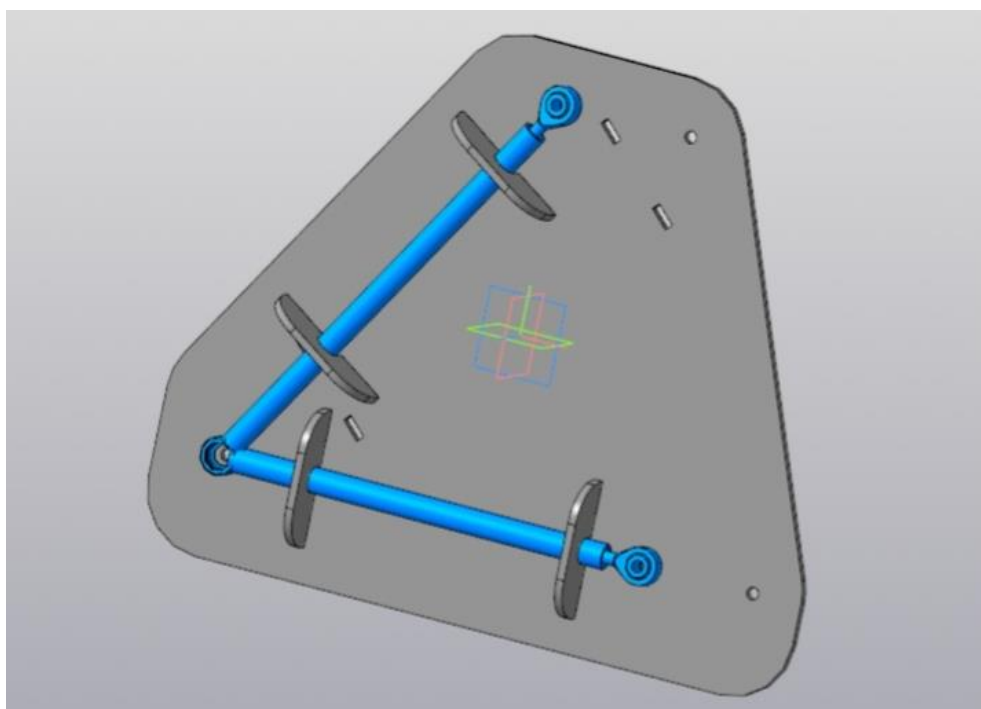


Рисунок 41 – 3D модель оснастки для сварки рычагов подвески

Далее идет моделирование поворотных кулаков. Поворотные кулаки гоночных болидов класса Formula Student у большинства команд изготовлены из алюминия [15]. 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 (рисунки 42-43).

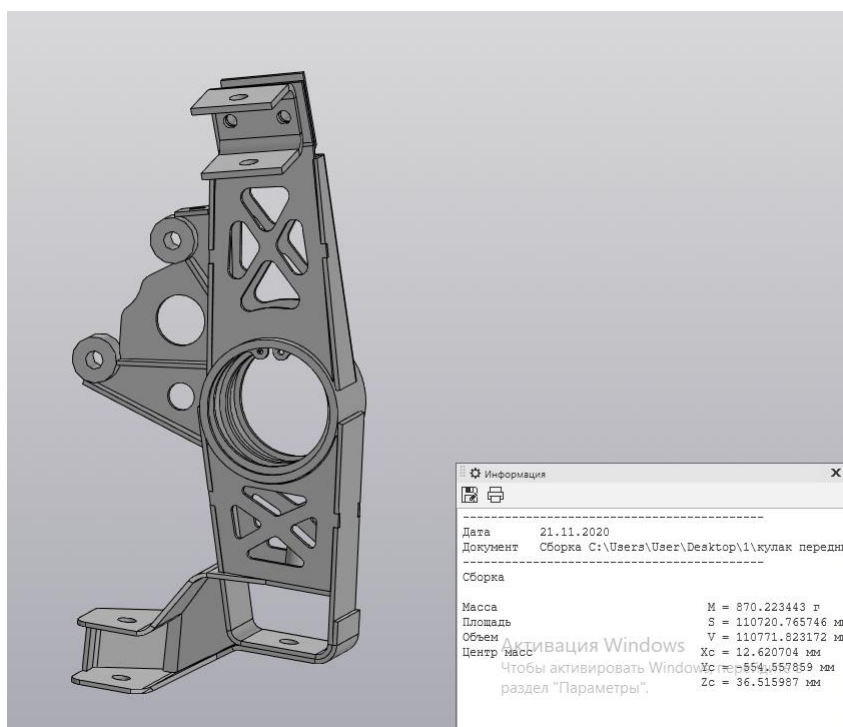


Рисунок 42 – Кулак поворотный предыдущей конструкции (масса 870 г)

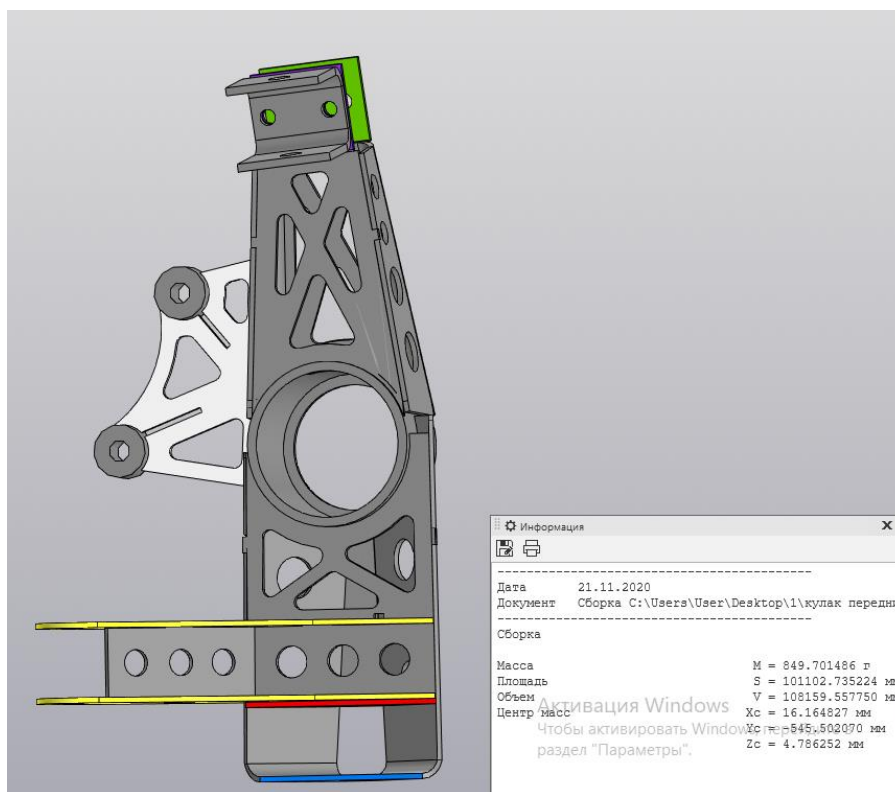


Рисунок 43 – Кулак поворотный новый (масса 849 г)

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 44), 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 неподдрессоренных 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 л. с.

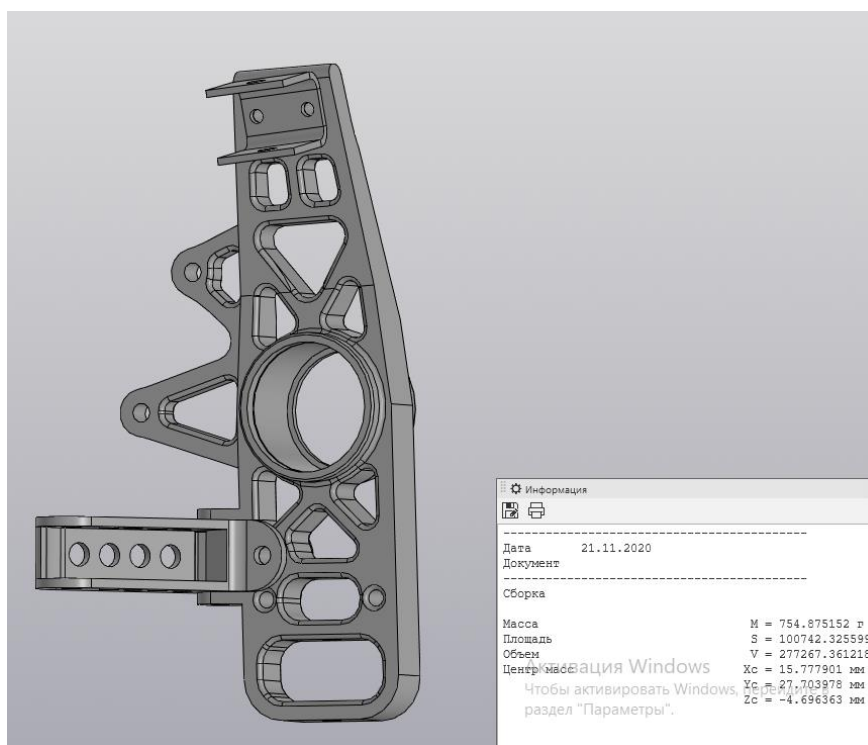


Рисунок 44 – Кулак поворотный из алюминия спроектированный в программе КОМПАС-3D (масса 754 г)

Причина в том, что колесо, кроме того, что движется поступательно с машиной, еще и вращается. И кроме массы имеет момент инерции, то есть к инерции поступательного движения добавляется инерция вращения.

Алюминиевые кулаки будут значительно меньше весить, чем стальные, и при этом не будут уступать им в прочности (рисунок 45).

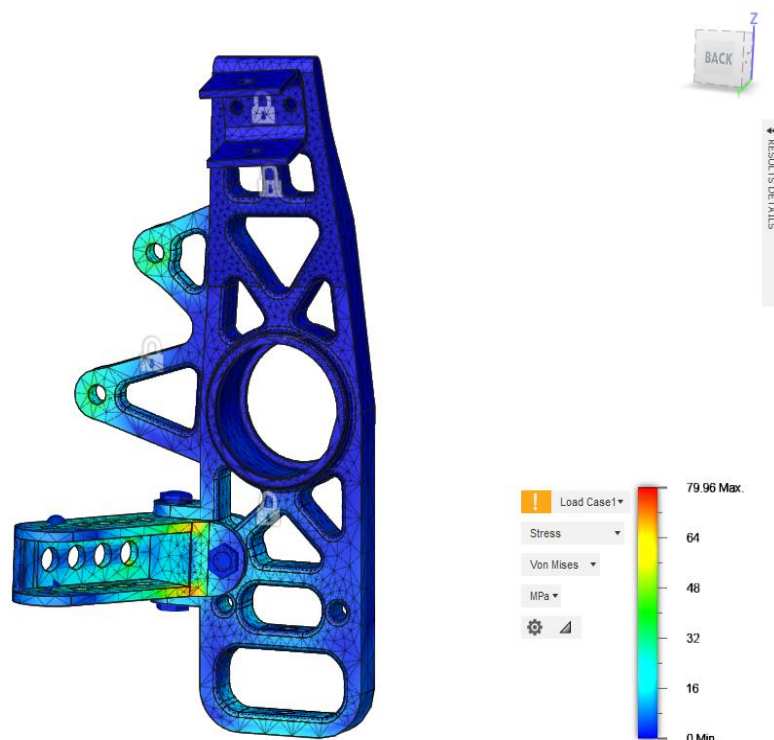


Рисунок 45 – Результаты нагружения алюминиевого кулака

Следующим шагом проведем анализ точек подвески болида предыдущей конструкции. Подвеска болида 2019 года показала себя хорошо на соревнованиях и во время испытаний.

Рычаги задней подвески спроектированы для снижения веса болида. Точки крепления задних рычагов отдалены друг от друга и смещены ближе к пилоту. Данное решение позволило скомпоновать подвеску, не добавляя в конструкцию рамы дополнительных элементов, и тем самым снижая вес и самой рамы.

Нижние рычаги как передней, так и задней подвески были установлены параллельно горизонту, то есть параллельно дороге. Данное расположение нижних рычагов подвески позволяет сохранять постоянную траекторию автомобиля.

Позиция рычага параллельно земле имеет несколько преимуществ:

- истирание шин будет минимальным при работе подвески;
- крен оси будет над землей и ниже точки раскладки рычагов;
- путь нагружения шасси – прямой.

Недостатки подвески предыдущей конструкции:

- недостаточная поворачиваемость;
- большое усилие для поворота руля;
- износ шин передней оси;
- угол развала передней оси изменялся до положительного во время поворотов, что снижало сцепление, и следовательно машина становилась менее управляемой (рисунок 46).



Рисунок 46 – Положительный развал 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.

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.

Далее был изменен кастор, то есть угол, под которым наклонена ось поворота колеса. Угол кастора был уменьшен, в прошлом году кастор составлял 5 градусов, в этом году было сделано 3 градуса. За счет этого мы снизили давление на переднюю ось, поэтому износ шин передней оси был так же уменьшен, и вращение рулевого колеса стало более легким.

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 47), на новый болид поворотный кулак спроектирован со 100 % статическим Аккерман (рисунок 48).

FRONT SUSPENSION - STEERING TRAVEL

LHS WHEEL (-ve Y)

TYPE 15 Double Wishbone, Rocker arm 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	36.14	-28.05	1.60	-2.66	62.01	2483.40
30.00	29.17	-24.05	0.50	-2.79	55.09	3084.64
25.00	23.29	-20.08	-0.32	-2.87	50.80	3869.77
20.00	18.03	-16.13	-0.96	-2.89	47.93	4996.56
15.00	13.17	-12.16	-1.47	-2.87	46.01	6819.12
10.00	8.60	-8.16	-1.88	-2.79	44.76	10391.36
5.00	4.23	-4.12	-2.21	-2.66	44.07	20973.91
0.00	0.00	0.00	-2.47	-2.47	43.84	0.00
-5.00	-4.12	4.23	-2.66	-2.21	44.07	20973.91
-10.00	-8.16	8.60	-2.79	-1.88	44.76	10391.36
-15.00	-12.16	13.17	-2.87	-1.47	46.01	6819.12
-20.00	-16.13	18.03	-2.89	-0.96	47.93	4996.56
-25.00	-20.08	23.29	-2.87	-0.32	50.80	3869.77
-30.00	-24.05	29.17	-2.79	0.50	55.09	3084.64
-35.00	-28.05	36.14	-2.66	1.60	62.01	2483.40

Рисунок 47 – Аккерман на предыдущем болиде

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 48 – Аккерман на новом болиде

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

2.4 Проектирование педального узла

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

Педальный узел присутствует практически в любом автомобиле, кроме специально переоборудованных для инвалидов и оснащенных ручным управлением. Педаль, наряду с рулевым управлением, входит в состав основных инструментов, при помощи которых водитель разгоняется, замедляет движение, останавливает автомобиль и маневрирует. Педальный узел прикреплен к кузову автомобиля. Устройство его практически идентично у большинства автомобилей.

Так же и гоночные автомобили оснащаются педальным узлом. Существует компоновка, состоящая из двух педалей, а также из трех педалей, в зависимости от способа переключения передач (подрулевые лепестки с пневмо- или же электроприводом, или же рычагом переключения передач (требуется педаль сцепления)).

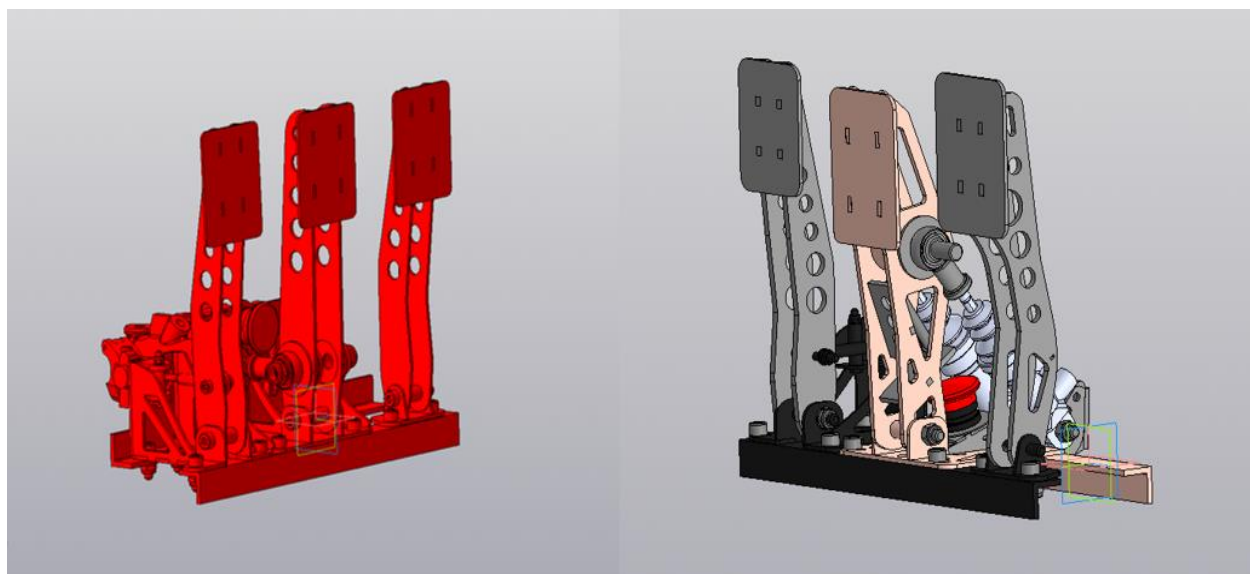
Педаль газа – педаль, отвечающая за изменение оборотов двигателя. При нажатии на педаль газа, пропорционально нажатию открывается дроссельная заслонка, что позволяет большему количеству воздуха поступить в цилиндр двигателя. За счет этого увеличиваются обороты двигателя, и соответственно скорость автомобиля тоже увеличивается. Педаль газа может быть с механическим принципом работы (открытие дроссельной заслонки с помощью тросика газа) или же с электронным принципом работы (электропривод дроссельной заслонки).

Педаль сцепления требуется, когда на автомобиле используется механический принцип переключения передач. Когда педаль сцепления нажата, фрикционный диск сцепления не в зацеплении с маховиком и не передает обороты двигателя на трансмиссию, таким образом, зубчатые колеса имеют возможность синхронизироваться, и пилот может переключить передачу [14, 17].

Педаля тормоза – когда педаля тормоза нажата, тормозные колодки блокируют колеса под гидравлическим воздействием, создаваемым усилием от педали на тормозные цилиндры. Тормозная педаля в данном узле играет очень важную роль в безопасности пилота. Поэтому к этой педали, особенно на гоночных автомобилях предъявляют жесткие требования к прочности и надежности.

Команда TRT с каждым годом старается модифицировать данный узел в болиде класса Formula Student (рисунок 49). Критерии, по которым производятся изменения:

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



а

б

Рисунок 49 – Педальный узел в сборе: а – предыдущая модель; б – новая модель

И педальный узел на новый болид затрагивает все данные пункты. Педальный узел болида предыдущей модели имел ряд недостатков, которые были исправлены инженерами команды TRT:

- большой вес стальной педали тормоза, а также кронштейна педали и тормозных цилиндров;
- недостаточная прочность педалей газа и сцепления, напечатанных на 3D-принтере из АБС-пластика;
- тормозные цилиндры заходили в зону передней перегородки, что запрещено регламентом соревнований;
- слишком близкое расположение педалей друг к другу, а также педаль газа была утоплена больше, чем педаль тормоза, что было неудобно нашим пилотам.

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.

В совокупности данное решение позволило снизить вес на 541 г.

На рисунке 50 можно увидеть экспериментальную педаль сцепления, которая ставилась на болид в 2019 году.



Рисунок 50 – Педаль сцепления, напечатанная на 3D-принтере из АБС-пластика

Эта педаль была изготовлена на 3D-принтере из АБС-пластика [9]. Облом педали произошел в месте, где была самая маленькая площадь поперечного сечения. Конечно же, изделие из пластика весит меньше, чем изделие из алюминия, однако педальный узел в первую очередь должен быть надежным, так как выход из строя педального узла означает потерю управления пилотом.

Данное решение на данный момент дорабатывается: подбирается более прочный материал для печати на 3D-принтере, а также проектируется более надежная конструкция пластиковой педали.

На рисунке 51 (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.

Педальный узел был подстроен под пожелания пилотов, так как от удобства пилота в немалой степени зависит время, которое он покажет на треке. Из-за того, что левая нога отвечает только за педаль сцепления, а правая за газ и тормоз, было необходимо увеличить расстояние между педалью тормоза и сцепления, иначе ноги пилота могли пересекаться при одновременном нажатии на педали тормоза и сцепления.

Помимо этого, было принято решение педаль газа (рисунок 51) расположить ближе к пилоту, чем педаль тормоза. Данное расположение позволяет пилоту быстро переместить ногу с педали газа на педаль тормоза резким скользящим движением, что также положительно скажется на времени круга.

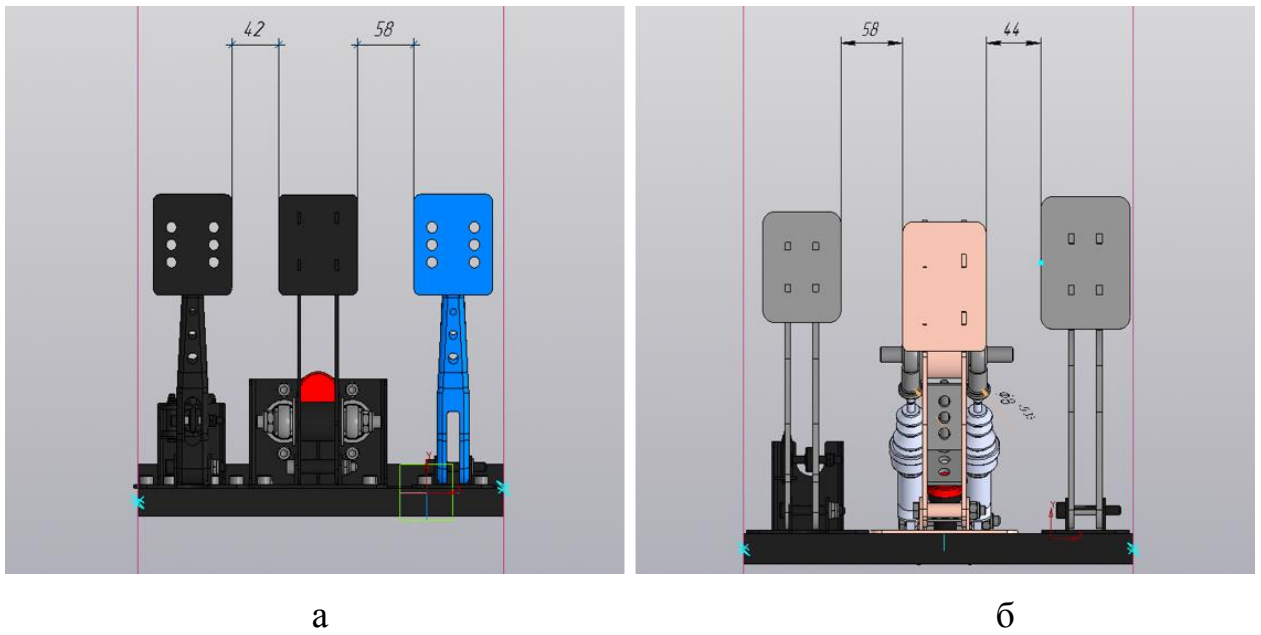


Рисунок 51 – Расстояние между педалью сцепления и педалью тормоза:
 а – предыдущая конструкция; б – новая конструкция

На рисунке 52 показано, каким образом изменяется усилие на тормозные цилиндры, а также, на сколько градусов изменяется ход педали в зависимости от настроенного угла установки тормозных цилиндров.

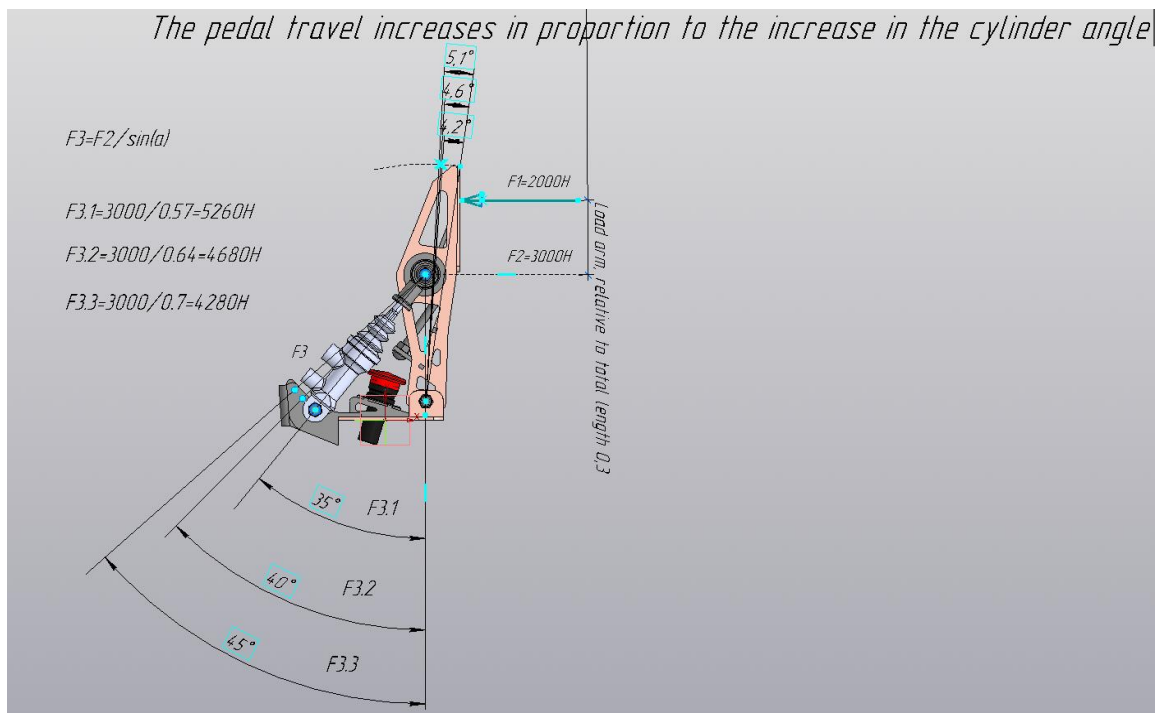


Рисунок 52 – Расчет усилий передаваемых на тормозные цилиндры при нажатии на педаль тормоза при разных углах

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 53-54.

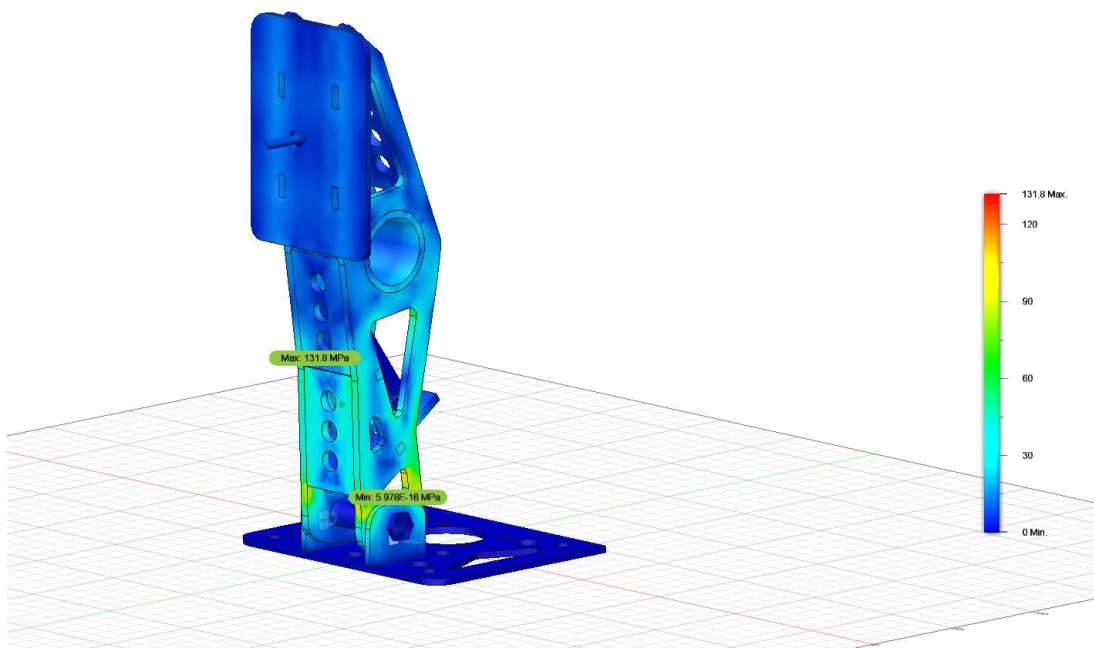


Рисунок 53 – Анализ напряженного состояния педали тормоза

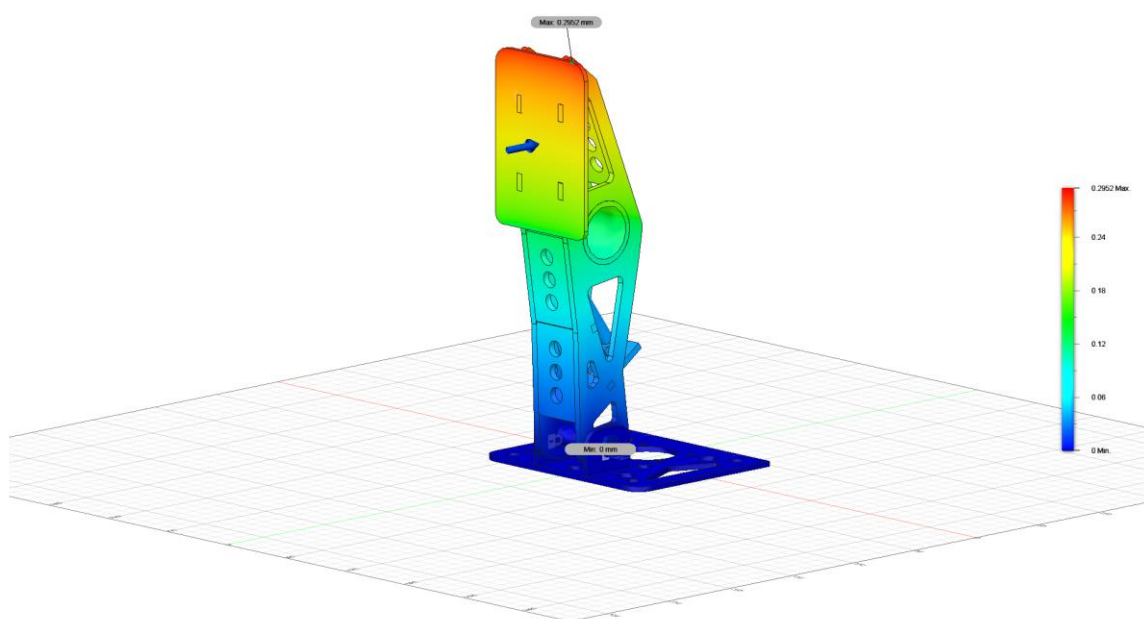


Рисунок 54 – Анализ деформации педали тормоза

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.

2.5 Проектирование системы 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.

Но так как это слишком большая длина и физически её очень сложно воплотить, то используют раннеры для 3 и 4 волны, что также позволяет сделать более плавный подъем для рассчитанных оборотов. Соответственно для 3 и 4 волн длина раннера получится 343 и 254 мм.

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.

На рисунке 55 представлена компоновка ресивера прошлого

ПОКОЛЕНИЯ.

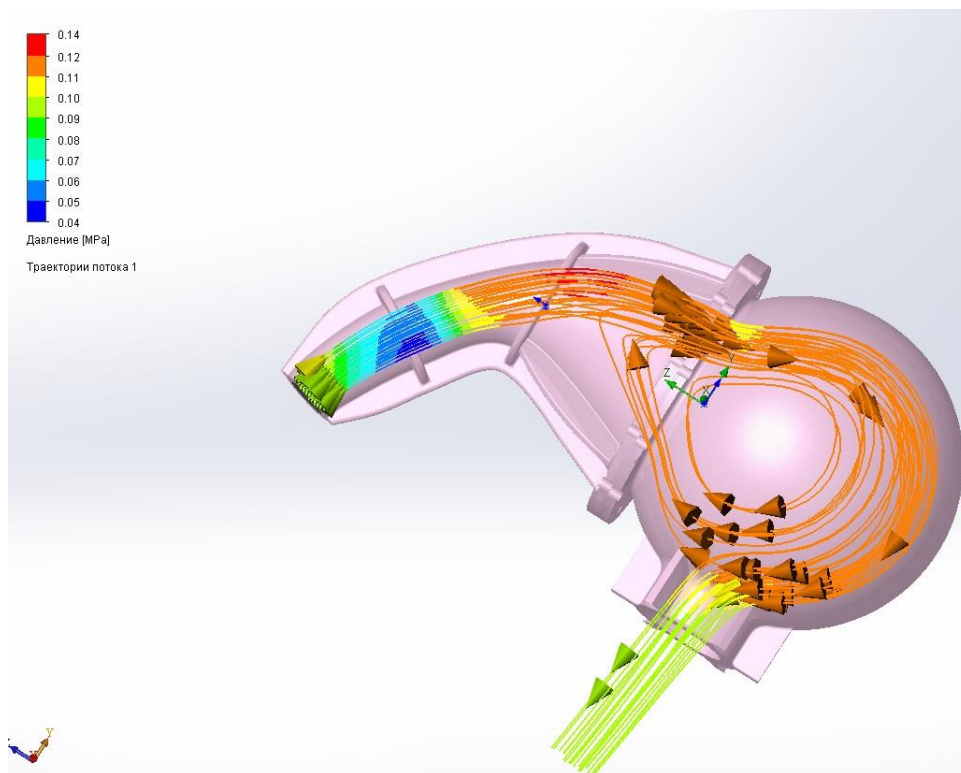


Рисунок 55 – Траектории давления потока в ресивере

Прошлая конструкция ресивера состоит из 2 частей, ресивера и коллектора. Объем ресивера составляет 3 л, что составляет примерно 4,3 объема двигателя. Впускной раннер имеет длину около 50 мм и не имеет раструба на входе. В конструкции довольно большое расстояние от дроссельной заслонки до основного объема ресивера, что негативно влияет на забор воздуха.

Короткий раннер обеспечивает высокое наполнение на оборотах выше, чем обороты соответствующие максимальной мощности, большой объем ресивера сглаживает пульсации потока, но дает плохой отклик на педаль газа [11].

На основе вычисленных данных построили несколько вариантов модели, отличающихся объёмом, формой и углами изгибов. На рисунке 56 представлен итоговый вариант конструкции.

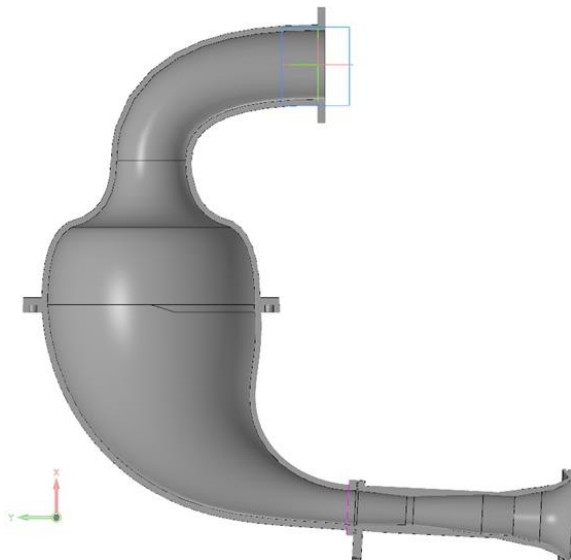


Рисунок 56 – Общий вид нового ресивера

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 57).

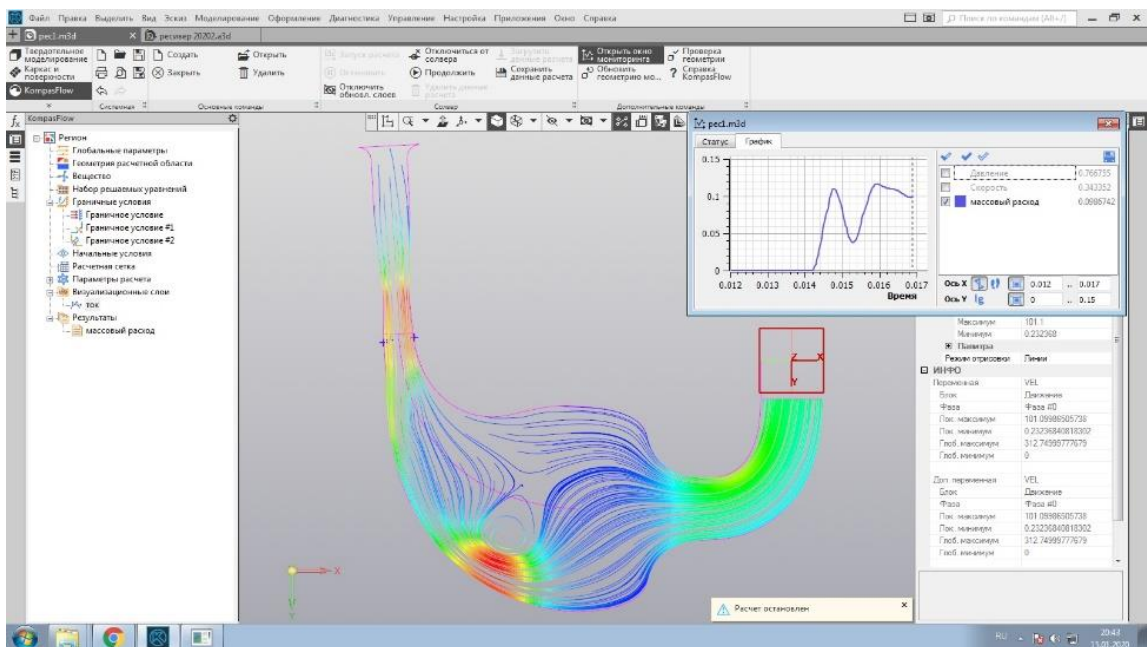


Рисунок 57 – Продувка ресивера в компас FLOW

В итоге видим равномерный забор воздуха из основного объема ресивера.

3 Компьютерная модель гоночного болида

В процессе проектирования были созданы детализованные 3D-модели гоночного болида с проработкой рамы, ходовой части, трансмиссии, педального узла, выполненной в программных пакетах Компас 3D, SolidWorks [13, 20]. Основные виды представлены на рисунках 58-60.

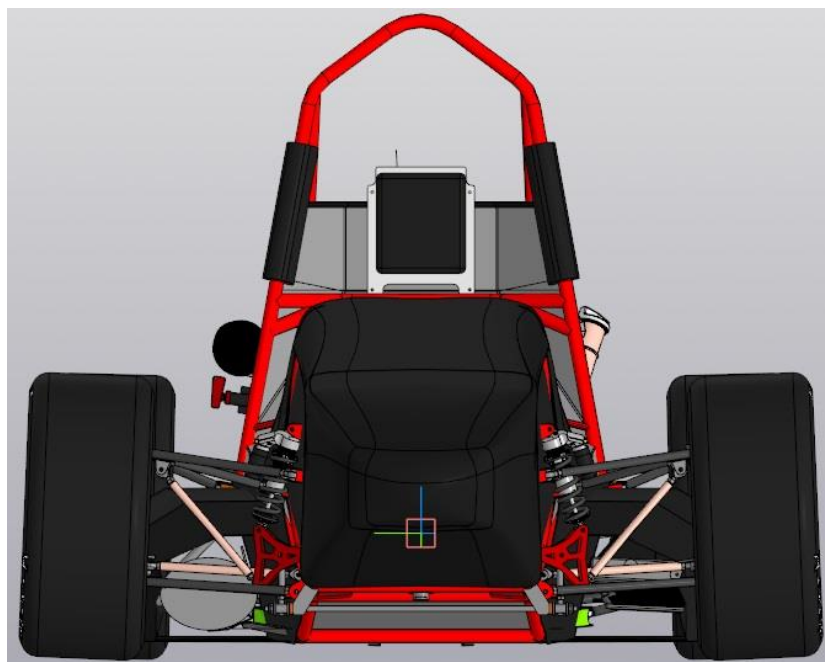


Рисунок 58 – 3D-модель гоночного болида: вид спереди

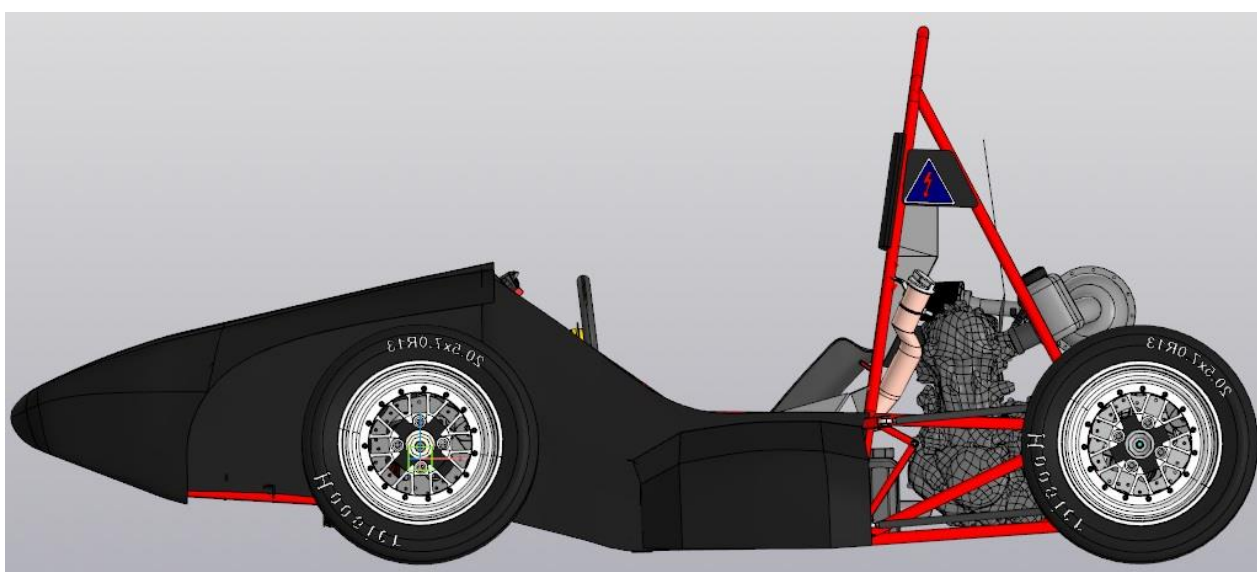


Рисунок 59 – 3D-модель гоночного болида: вид сбоку

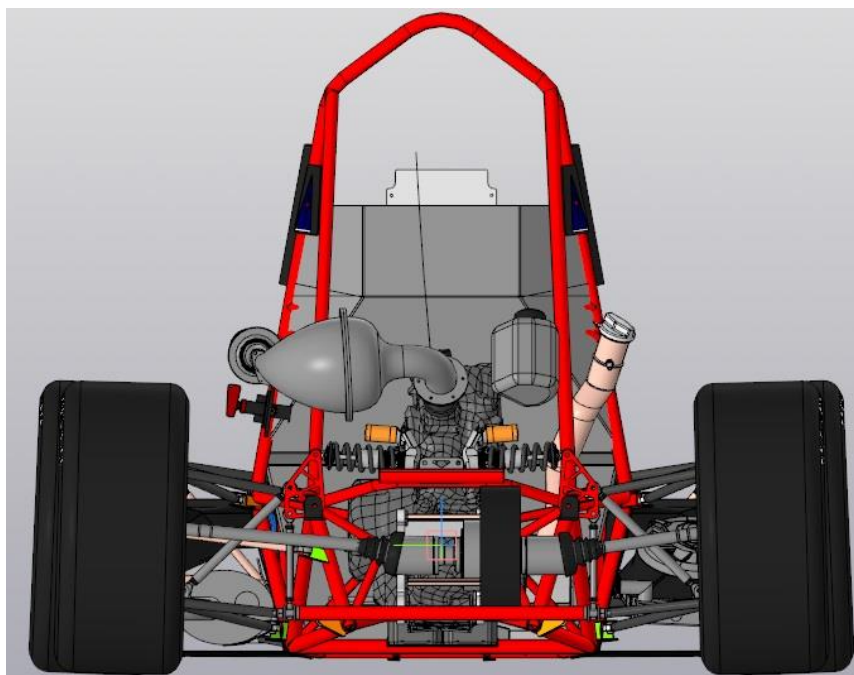


Рисунок 60 – 3D-модель гоночного болида: вид сзади

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

Деятельность проектного центра Formula Student структурирована на ряд групп, решающих различные задачи, направленные на создание гоночного автомобиля и участие в соревнованиях. Задачи и формируемые на их основе группы могут быть разделены по принадлежности непосредственно к проектированию и изготовлению болида и его систем на «инженерные» и «обеспечивающие».

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.

Проведен анализ конструкционной прочности деталей и узлов методом конечно-элементного моделирования в специализированных системах автоматизированного проектирования.

При моделировании несущей системы использовали одномерные конечные элементы. Анализ жесткости рамы показал величину в 2235 Н·м/град, что при весе рамы 27 кг является хорошим результатом.

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

При проектировании подвески, чтобы избавиться от эффекта недостаточной поворачиваемости был увеличен угол Аккермана.

Уменьшен вес педального узла за счет перехода на алюминиевый сплав АМг6. При этом, максимальное напряжение при нагрузке в 2 кН составило 131,4 МПа.

В системе впуска изменили длину раннера, что в итоге позволило обеспечить равномерный забор воздуха из основного объема ресивера.

Список используемых источников

1. Airfoil Tools [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://airfoiltools.com> (дата обращения 17.12.2020).
2. Auer B., McCombs J., Odom E. Design and Optimization of a Formula SAE Frame // Journal of Passenger Car: Mechanical Systems Journal. 2006. № 115. P 917-922.
3. Chandan S. N. Design, Analysis and Optimization of Race Car Chassis for its Structural Performance // International journal of engineering research and technology. 2016. № 5. P 361-367.
4. Fazidah S. Stress and Modal Analysis Assessment of Race Cars Chassis Structure // Applied Mechanics and Materials. 2014. № 663. P 103-107.
5. Formula SAE [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE (дата обращения 18.09.2020).
6. 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).
7. Lim J. W., Sivaguru S. Chassis Structural Design of Track Racing One Manned Formula Car // International Journal of Engineering and Technology. 2018. № 7. P 71-75.
8. Wordley S., Saunders J. W. Aerodynamics for Formula SAE // Initial Design and Performance Prediction. 2006. № 8. P 134-146.
9. Каменев С. В., Романенко К. С. Технологии аддитивного производства : учеб. пособие. Оренбург : ОГУ, 2017. 145 с.
10. Кокпит гоночного автомобиля [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ready-to-race.ru/2020/04/08/76-fsrules2020-cockpit/> (дата обращения: 18.09.2020).
11. Колчин А. И., Демидов В. П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей : учеб. пособие для вузов. М. : Высшая школа, 2003. 496 с.

12. 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.
13. Молибошко Л. А. Компьютерные модели автомобилей : учебник. Минск : Новое знание, 2017. 295 с.
14. Раймпель Й. Шасси автомобиля: конструкции подвесок. М. : Машиностроение, 1989. 326 с.
15. Решетов А. В. Описательный анализ поворотных кулаков автомобиля / Сборник трудов 4-го Всероссийского форума «Студенческие инженерные проекты». М. : МАДИ, 2016. С.32-34.
16. 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.
17. Скутнев В. М. Основы конструирования и расчета автомобиля: учеб. пособие. Тольятти : ТГУ, 2012. 294 с.
18. Хаммилл Д. Подвеска и тормоза: как построить и модифицировать спортивный автомобиль. М. : Легион-Автодата, 2005. 96 с.
19. Чмиль В. П., Чмиль Ю. В. Автотранспортные средства : учеб. пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2016. 335 с.
20. Эксплуатация автомобильного транспорта : учеб. пособие. Оренбург : ОГУ, 2017. 221 с.