

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 Разработка рамы спортивного болида Formula Student класса EV

Обучающийся

Р.Р. Гизятулин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.Г. Доронкин

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

Тольятти 2022

Аннотация

Проект Formula Student входит в число самых популярных инженерных образовательных проектов для университетов по всему миру! В рамках данного проекта перед студентами стоит задача ежегодно разрабатывать, изготавливать и тестировать болид класса Formula Student.

С развитием проекта и общемировых трендов в 2010 году, наряду с классом автомобилей с двигателями внутреннего сгорания - CV, принимающих участие в соревнованиях, был также внедрен класс EV, который предполагал участие автомобилей с электрической силовой установкой.

Разработка такого автомобиля имеет ряд особенностей. Каждая из систем автомобиля должна соответствовать регламенту FS Rules. Одним из самых ответственных элементов конструкции является рама болида. При разработке необходимо обеспечить оптимальные весовые и прочностные характеристики.

В данной работе рассмотрен вопрос разработки рамы спортивного болида Formula Student класса EV.

Описаны требования регламента FR Rules 2022 к несущей конструкции и ее материалам.

Выполнен тягово-динамический расчет.

В ходе работы был проведен сравнительный анализ веса рамных конструкций, созданных ранее болидов с ДВС, а также проведены прочностные расчёты.

Выпускная квалификационная работа состоит из: 49 страниц, 9 таблиц, 33 рисунков, 6 листов графической части.

Содержание

Введение.....	4
1 Состояние вопроса	6
1.1. Цель и задачи проекта	6
1.2. Анализ рамных конструкций Formula Student	6
2 Требования регламента к несущей конструкции.....	12
2.1. Шаблон кокпита	12
2.2. Шаблон перцентилля.....	13
2.3. Шаблон поперечного сечения.....	15
2.4. Основные требования к несущей конструкции	16
3 Разработка несущей конструкции электробоида.....	20
3.1. Тягово-динамический расчет.....	20
3.2. Проектирование рамы гоночного болида на электротяге	35
Заключение	46
Список используемой литературы и используемых источников.....	47

Введение

Formula Student — это международный инженерный проект, включающий в себя одноименные соревнования. Задача команд данного проекта состоит в том, чтобы разработать и построить гоночный автомобиль с открытыми колесами за один учебный год. Автомобиль может быть представлен в одном из трех классов транспортных средств: ДВС, электрические и беспилотные [20].

Цель проекта – дать студентам практический опыт работы в крупных инженерных проектах, подготовить их к послевузовской работе [9].

Большинство участвующих команд сосредоточено в Европе, но Formula Student — это глобальное соревнование. В состав участников входят также команды из Северной и Южной Америки, Азии и Океании. Из-за логистических трудностей, наша команда в основном принимает участие в европейских и российских соревнованиях Formula Student.

Автомобили класса Formula Student — это одноместные автомобили с открытыми колесами и четырехтактным двигателем [1]. Автомобили сделаны настолько легкими, насколько это возможно, с акцентом на прижимную силу и управляемость, а не на мощность [2]. Это связано с тем, что, трассы на соревнованиях заданы таким образом, что автомобили никогда не развивают высоких скоростей, поэтому вышеупомянутые качества являются более ценными.

В рамках соревнований Formula Student проходят 8 различных этапов – дисциплин [21]:

- «Защита конструкции» - команда представляет автомобиль судьям, которые расспрашивают отдельных членов команды о процессе разработки конкретных систем. Чем лучше команда сможет ответить на вопросы, тем больше очков наберет. Максимальная сумма баллов – 150;

- «Отчет о стоимости и производстве» - аналогично дисциплине «Защита конструкции», но с опросом членов команды о процессе

производства конкретных систем. Если команда сможет убедить судей в том, что их автомобиль изготовлен наиболее эффективным способом, то сможет набрать максимальные 100 баллов;

- «Презентация бизнес-плана» - эта дисциплина проходит как инвестиционная встреча, где команда должна представить группе судей творческий способ продажи своего автомобиля. Максимальная сумма баллов по данной дисциплине – 75 и основывается на финансовом понимании, новизне идеи и качестве презентации;

- «Ускорение» - автомобили разгоняются по прямой со старта на трассе длиной 75 метров, 75 баллов выигрывает наименьшее время;

- «Восьмерка» – автомобили участвуют в гонке по трассе фактически изображающую цифру «8». Выигрывает 75 баллов та команда, чей автомобиль сможет проехать два круга в правую и два круга в левую сторону за наименьшее время;

- «Автокросс» – Автомобиль проезжает круг по узкой и извилистой трассе длиной около километра. Время прохождения круга определяет не только количество набранных очков (максимум 100), но и порядок старта автомобиля в гонке на выносливость;

- «Гонка на выносливость» – автомобиль должен проехать несколько кругов по трассе автокросса общей протяженностью 20 км со сменой водителя на полпути. На трассе могут одновременно находиться несколько автомобилей. Автомобиль, показавший самое быстрое время, набирает наибольшее количество баллов – 325;

- «Топливная эффективность» – Показатель потребления энергии автомобилем. Измеряется до и после гонки на выносливость и оценивается в баллах. Максимальная сумма баллов – 100.

В каждой из дисциплин команды оцениваются судьями индивидуально судьями – ведущими специалистами автомобильной отрасли и общая сумма баллов определяет победителя [25].

1 Состояние вопроса

1.1 Цель и задачи проекта

Проект Formula Student был создан для повышения качественного уровня инженерной подготовки благодаря развитию практических компетенций у студентов. Основными направлениями деятельности, осуществляемыми в рамках проекта, являются разработка новых технических и конструкторских решений, использование нового оборудования и изделий на базе передовых технологий производства.

Практико-ориентированное обучение позволяет сформировать у студентов знания, применяемые к решению комплексных производственных задач, связанных с проектированием, изготовлением конструкций, разработкой технологий, которые являются востребованными на рынке. [10]

Задачи проекта являются междисциплинарными, что позволяет реализовать взаимодействие студентов различных специальностей и направлений подготовки. Наряду с проектированием и разработкой конструкции перед командой проекта стоят задачи по выполнению технико-экономического обоснования изготовления продукта, а также составлению бизнес плана и презентации конструкторских решений.

Однако, главная задача проекта Formula Student – это ежегодное создание прототипа гоночного автомобиля в соответствии с требованиями FS Rules при ограниченных временных и финансовых ресурсах.

1.2 Анализ рамных конструкций Formula Student

Ежегодная разработка рамы болида класса «Формула Студент» должна вестись в полном соответствии с регламентом FS Rules, в котором содержатся актуальные требования к конструкции. Требования одинаковы

для всех команд международного проекта, однако, проектировщики находят и применяют различные конструкторские решения.

Для того, чтобы иметь представление о том какие конструкции существуют и являются наиболее распространенными, а также ошибки, которые можно учесть, рассмотрим несущие конструкции различных российских и европейских команд.

Первым примером послужит рамная конструкция команды из России - «Formula Neftegaz». Визуально (рисунок 1) вес такой конструкции кажется высоким из-за большого количества труб. Это связано с тем, что команды стараются повысить жесткость рамы, увеличивая количество труб, однако, без проверочных и подтверждающих расчетов, это может быть неэффективно и в результате только утяжелит конструкцию. Таким примером является вваренная дополнительная поперечная труба между передней перегородкой и передней дугой, здесь увеличение жесткости произойдет прямо пропорционально увеличению веса и не даст преимуществ.

Кроме того, передняя перегородка в форме шестигранника требует большего количества труб для выполнения условия триангуляции. Это заметно по боковой защитной конструкции, где добавлена дополнительная труба. Также данная рама не обладает распорками главной дуги, в нескольких узлах конструкции отсутствует триангуляция, а в задней части используется изогнутая труба без дополнительных диагональных распорок, что противоречит требованиям регламента. Для того, чтобы привести конструкцию в соответствие потребуется добавить еще трубы, что неизбежно приведет к увеличению веса.



Рисунок 1 – Рама команды Formula Neftegaz

3D-модель рамной конструкции другой российской команды «Formula Student USURT» представлена на рисунке 2. Конструкция имеет некоторые несоответствия регламенту, однако, окончательный вариант рамы может быть доработан перед изготовлением.

При рассмотрении данной конструкции сразу можно отметить, что передняя дуга достаточно узкая в верхней части, что может затруднить дальнейшее расположение панели приборов и прохождение проверки шаблоном поперечного сечения [11].

Также в заднюю часть конструкции необходимо добавить диагональную распорку.

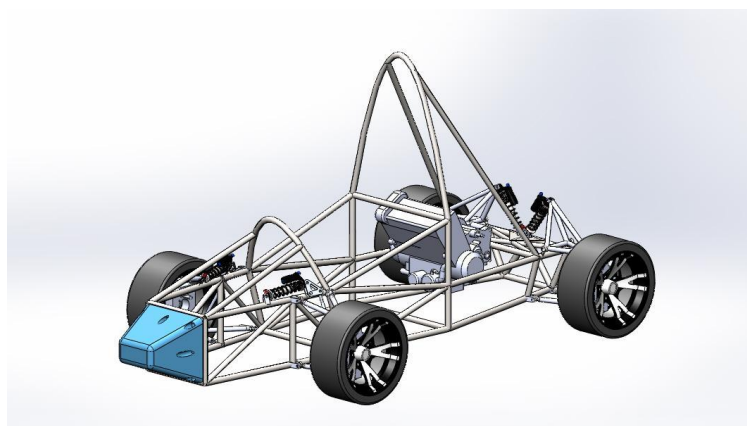


Рисунок 2 – УрГУПС (Россия)

Еще одним примером для рассмотрения является рама команды «KEFO Motorsport», изображенная на рисунке 3. Такую раму можно считать одной из типовых для команд проекта «Formula Student», поскольку минимальное количество труб полностью выполняет требование по триангуляции. Можно предположить, что и весовые характеристики у данной конструкции являются оптимальными.

Но все же есть элементы, которые необходимо оптимизировать или исправить, например, опора передней дуги. Для данного решения стоит учитывать рост пилотов, высоту самой передней дуги и боковой защитной структуры, поскольку это может осложнить быстрое покидание болида пилотом в случае опасных и чрезвычайных ситуаций.

Также присутствует недочет, который необходимо устранить для соответствия требованиям регламента – отсутствие диагонального элемента в правом нижнем углу передней структуры.

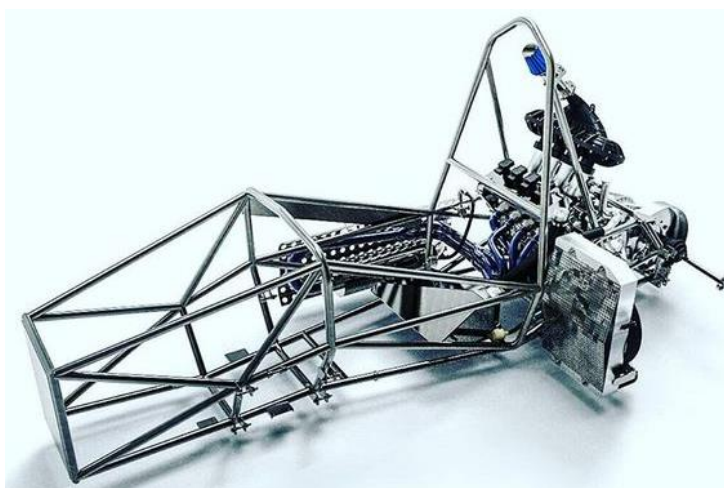


Рисунок 3 – KEFO Motorsport (Венгрия)

Рамная конструкция команды из Индии - «Ultimate Formula One Racers» представлена на рисунке 4. При рассмотрении данной рамы привлекает внимание необычная ее передняя часть.

Кроме того, в данной конструкции отсутствуют передние распорки передней дуги. Данные распорки необходимо добавить, это обязательное требование регламента: распорки передней дуги должны быть как спереди, так и сзади.

В нижнем левом углу передней части рамы не обеспечена триангуляция, чтобы исправить данную ситуацию, команде придется сварить дополнительную трубу.



Рисунок 4 – Ultimate Formula One Racers (Индия)

Кроме того, передние амортизаторы размещены неудачно – внутри рамной конструкции – это может привести к проблеме при прохождении теста шаблоном поперечного сечения кокпита.

Но к плюсам данной конструкции можно отнести минимальное количество труб задней части рамы и боковой защитной конструкции.

Далее на рисунке 5 рассмотрим пример рамной конструкции команды «FS Oulu». Несмотря на то, что рама покрашена в динамичный синий цвет, конструкция выглядит излишне перегруженной и нуждается в облегчении.

Нельзя сказать, что команда не работала над этой задачей, поскольку был применен очень примечательный прием по снижению веса за счет уменьшения длины самых тяжелых труб, а именно в зоне боковой защитной

конструкции. Этот прием удалось воплотить благодаря размещению главной дуги под уклоном в 10° .



Рисунок 5 – FS Oulu (Финляндия)

При визуальном осмотре можно отметить, что рамная конструкция состоит из всех необходимых труб, а также обеспечен принцип триангуляции, как того требует регламент, однако, распорки передней дуги должны быть прямыми. Данная рама не пройдет проверку на соответствие регламенту.

Вывод по разделу

Анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод о том, проект является междисциплинарным, что позволяет реализовать взаимодействие студентов различных специальностей и направлений подготовки. Однако, главная задача проекта Formula Student – это ежегодное создание прототипа гоночного автомобиля в соответствии с требованиями FS Rules.

Для создания гоночного болида необходима основа – несущая конструкция. Не многим командам удастся избежать ошибок при ее проектировании. Но этого можно избежать строго опираясь на требования регламента и обобщив опыт других команд, представленный в данном разделе.

2 Требования регламента к несущей конструкции

Перед разработкой, несущей конструкции, необходимо изучить требования регламента, чтобы убедиться, что она им соответствует. [14] Данная информация содержится в разделах Т.3, Т.4 регламента FS Rules 2022, а также в них указаны способы проверки соответствия разработанной конструкции с помощью шаблонов кокпита, перцентиля и шаблона поперечного сечения кокпита, изображенных на рисунке 6. Их мы возьмем за основу требований.

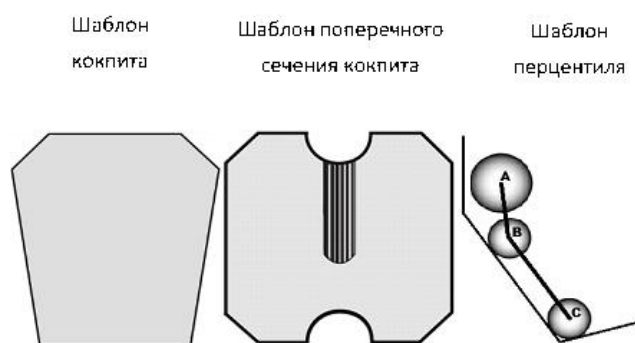


Рисунок 6 – Шаблоны для проверки конструкции рамы

2.1 Шаблон кокпита

Данный шаблон изображен на рисунке 7.

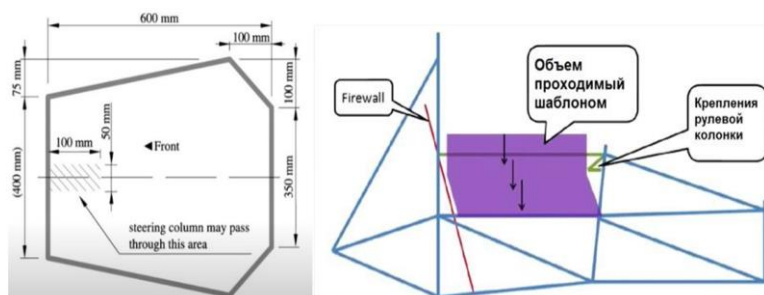


Рисунок 7 – Шаблон кокпита

О нем в пункте Т4.1 регламента сказано следующее:

- Т4.1.1 The size of the cockpit opening needs to be sufficient for the template to pass vertically from the cockpit opening to below the upper side impact member when held horizontally. The template may be moved fore and aft. Размер кокпита должен быть достаточным для того, чтобы шаблон проходил вертикально от кокпита до нижнего верхнего элемента боковой защитной конструкции в горизонтальном положении. Шаблон можно перемещать вперед и назад.
- Т4.1.2 If the side impact structure is not made of tubes, the template must pass until it is 320mm above the lowest inside chassis point between the front and main hoop. Если боковая защитная конструкция изготовлена не из труб, то шаблон должен проходить до тех пор, пока он не окажется на 320 мм выше самой низкой внутренней точки корпуса между передней и главной дугами
- Т4.1.3 «The steering wheel, seat and all padding may be removed for the template to fit. Any other parts may only be removed if they are integrated with the steering wheel» [23] «Рулевое колесо, сиденье и вся обивка могут быть сняты для подгонки шаблона. Любые другие детали могут быть сняты только в том случае, если они интегрированы с рулевым колесом» [23]

2.2 Шаблон перцентиля

Согласно требованию регламента Т.4.3.4 шаблон должен быть помещен следующим образом [23], как показано на рисунке 8:

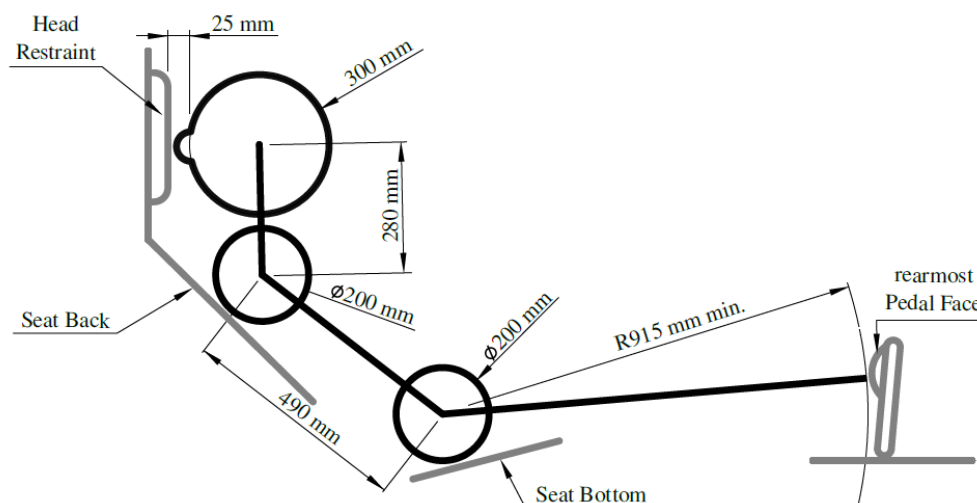


Рисунок 8 – Расположение шаблона перцентиля

- «The seat adjusted to the rearmost position» [23]
- «The middle circle positioned on the seat back» [23]
- «The bottom 200mm circle placed on the seat bottom. The distance between the center of the circle and the rearmost actuation face of the pedals must be minimum 915mm.» [23]
- «The upper 300mm circle positioned 25mm away from the head restraint» [23]
- «The pedals adjusted to the frontmost position» [23]
- «Сиденье отрегулировано в крайнее заднее положение» [23]
- «Средний круг должен быть расположен на спинке сиденья» [23]
- «Нижний круг диаметром 200 мм расположен на дне сиденья. Расстояние между центром круга и крайней задней поверхностью педалей для приведения в действие должно составлять не менее 915 мм.» [23]
- «Верхний 300-миллиметровый круг расположен на расстоянии 25 мм от подголовника» [23]
- «Педали установлены в крайнее переднее положение» [23]

Кроме того, если провести диагональную прямую от самой высокой точки главной дуги к точке передней дуги, то от края шлема пилота должно оставаться свободное расстояние в 50 мм, как показано на рисунке 9.

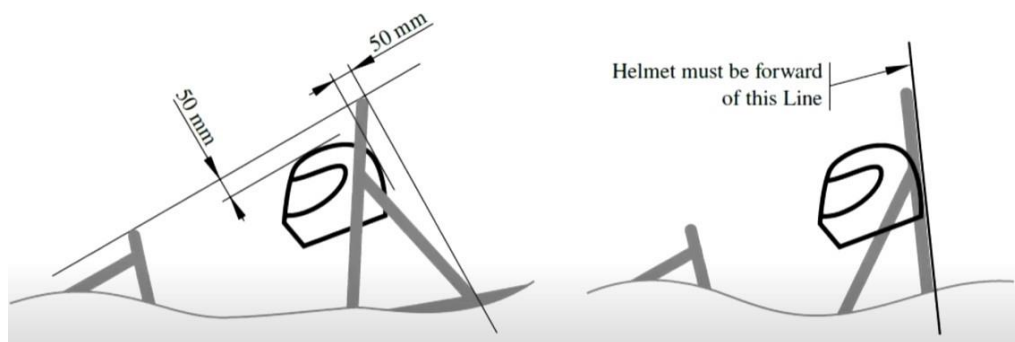


Рисунок 9 – Расположение главной и передней дуг

2.3 Шаблон поперечного сечения

Данный шаблон изображен на рисунке 10.

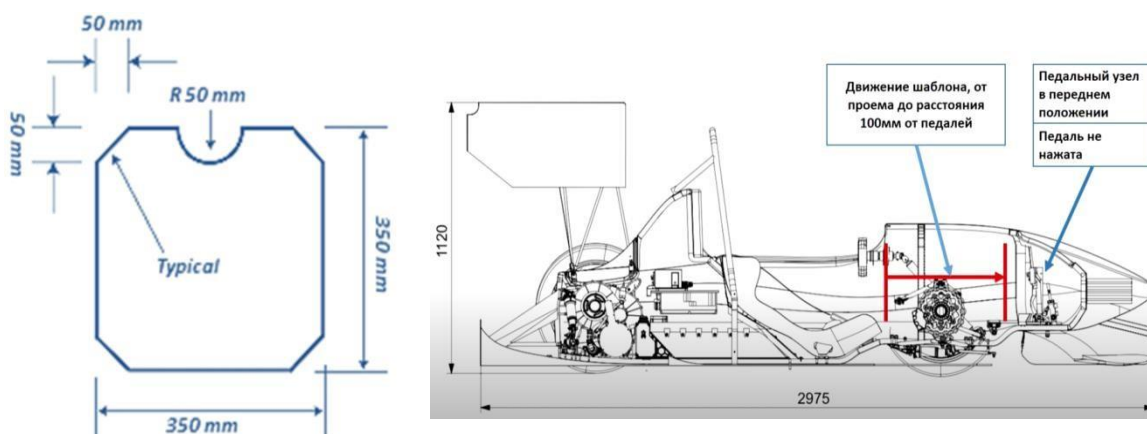


Рисунок 10 – Шаблон поперечного сечения кокпита

О нем в пункте Т4.2 регламента сказано следующее:

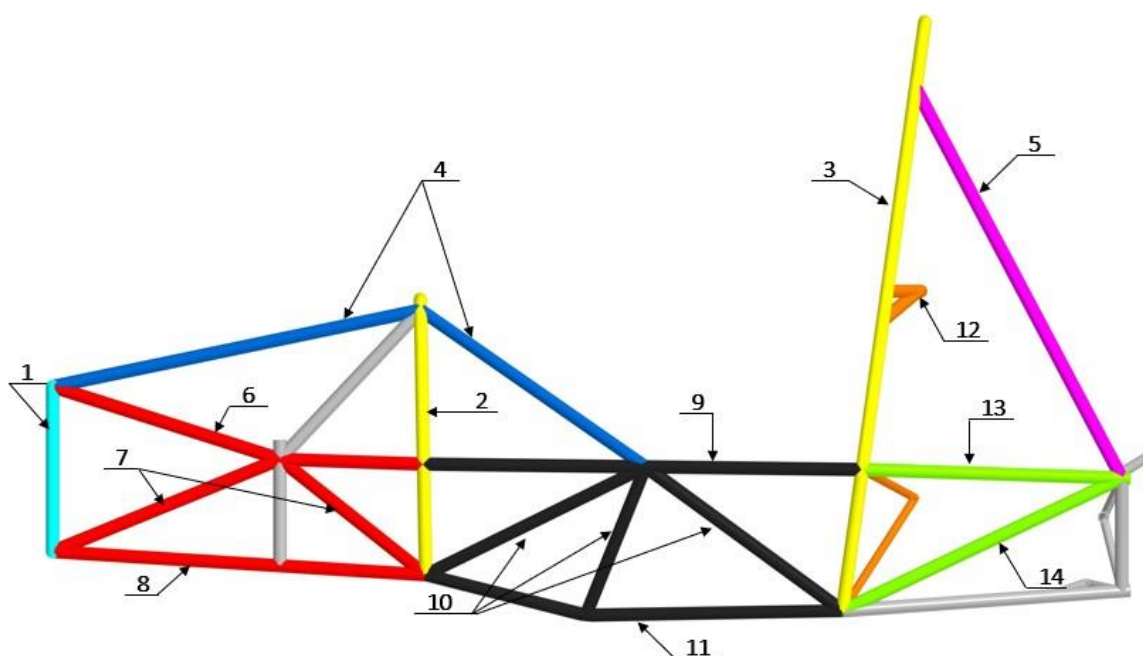
- T4.2.1 «The cockpit must provide a free internal cross section sufficient for the template to pass from the cockpit opening to a point 100mm rearwards of the face of the rearmost pedal in an inoperative position. The template may be moved up and down. Adjustable pedals must be in their most forward position» [23]
- «Кокпит должен иметь свободное внутреннее поперечное сечение, достаточное для того, чтобы шаблон проходил от отверстия кабины до точки, расположенной на расстоянии 100 мм от торца самой задне-расположенной педали в нерабочем положении. Шаблон можно перемещать вверх и вниз. Регулируемые педали должны находиться в самом переднем положении» [23]
- T4.2.2 «The steering wheel and any padding that can be removed without the use of tools while the driver is seated may be removed for the template to fit» [23]
- «Рулевое колесо и любая обивка, которую можно снять без использования инструментов, пока водитель сидит, могут быть сняты для подгонки шаблона.» [23]
- T4.2.3 «The driver's feet and legs must be completely contained within the primary structure when the driver is seated normally and the driver's feet are touching the pedals. In side and front views, any part of the driver's feet or legs must not extend above or outside of this structure» [23]
- «Ступни и ноги водителя должны полностью находиться внутри основной конструкции, когда водитель сидит нормально и ступни водителя касаются педалей. При виде сбоку и спереди любая часть ступней водителя не должна выступать выше или за пределы этой конструкции» [23]

2.4 Основные требования к несущей конструкции

«В разделе Т.3 регламента сказано, что несущая конструкция должна следующие составляющие:

- передняя дуга с распорками и их опорами;
- главная дуга с распорками и их опорами;
- передняя перегородка и ее опоры;
- боковые защитные конструкции» [23]

Эталонная конструкция рамы болида представлена на рисунке 11.



- 1 – передняя перегородка; 2 – передняя дуга; 3 – главная дуга; 4 – распорки передней дуги; 5 – распорки главной дуги;
6 – верхний элемент опоры передней перегородки; 7 – диагональный элемент опор передней перегородки;
8 – нижний элемент опор передней перегородки; 9 – верхний элемент боковой защитной структуры;
10 – диагональный элемент боковой защитной структуры; 11 – нижний элемент боковой защитной структуры;
12 – монтажная перемычка плечевого ремня; 13 – верхний элемент опор распорок главной дуги,
14 – нижний элемент опор распорок главной дуги

Рисунок 11 – Эталонная конструкция рамы болида

Регламент FS Rules 2022 содержит требования по используемому материалу и его свойствам. Поскольку мы используем стальные трубы, то из регламента мы берем требования по минимальной толщине и площади труб,

минимальной площади момента инерции, которые представлены в таблице 1, а также следуем требованиям, описанным ниже.

Таблица 1 – Минимальные требования к трубам

Наименование трубы	Минимальная толщина	Минимальная площадь	Минимальная площадь момента инерции
Главная дуга	2 мм	175 мм ²	11 320 мм ⁴
Передняя дуга			
Крепление плечевых ремней			
Боковая защитная конструкция	1,2 мм	119 мм ²	8 509 мм ⁴
Передняя перегородка			
Распорка главной и/или передней дуги			
Опора передней перегородки	1,2 мм	91 мм ²	6 695 мм ⁴
Опора распорки главной дуги			

Также регламент требует соблюдения принципа триангуляции. Пример исполнения данного принципа изображен на рисунке 12.

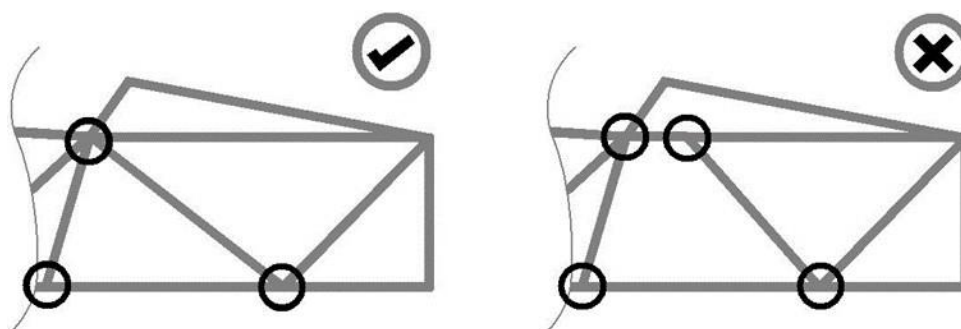


Рисунок 12 – Примеры правильной и неправильной триангуляции

«Триангуляция - это инженерная практика формирования жестких треугольников вместе с соответствующими крепежными элементами на стыках. Обычно это связано с использованием треугольных форм для придания устойчивости конструкциям.» [8]

Вывод по разделу

В данном разделе были рассмотрены требования регламента к несущей конструкции, а также способы проверки несущей конструкции на соответствие регламенту при помощи шаблонов: кокпита, перцентиля и шаблона поперечного сечения кокпита.

Была представлена эталонная рама болида с перечислением ее составляющих.

Также были описаны требования к используемым материалам. Все требования регламента необходимо изучить перед началом проектирования во избежание ошибок.

3 Разработка несущей конструкции электроболида

Перед началом проектирования необходимо изучить требования регламента FS Rules для электроболидов, это помогает правильно спланировать задачи и подход к разработке.

Особенностью разработки электроболида является необходимость начинать проектирование рамной конструкции одновременно с проектированием подвески и аккумулятора. [3] Это связано с тем, что в последствии придется столкнуться с рядом сложностей, поскольку это ограничит проектировщика в выборе геометрии и расположении точек подвески и аккумулятора, поскольку их необходимо будет согласовывать с уже выбранной геометрией рамы. [5]

На первом этапе проектирования будет выполнен тягово-динамический расчет. Затем будет выполнена общая компоновка несущей системы в соответствии с критериями вместимости тяговых и трансмиссионных компонентов. Далее будет создана одномерная расчетная модель для симуляции нагрузок и проверки конструкции.

3.1 Тягово-динамический расчет

«Исходные данные, которые понадобятся для проведения тягово-динамического расчета болида класса «Formula Student» запишем в таблицу 2. Расчеты проведем с помощью методики, описанной в источнике.» [19].

Таблица 2 - Данные для проведения тягово-динамического расчета

Параметр	Значение
Колесная формула	4x2
Количество мест	1
Снаряженная масса m_0 , кг	280

Продолжение таблицы 2

Параметр	Значение
Максимальная скорость V_{\max} , км/ч (м/с)	123,48(34,3)
Угловая скорость ω_e^{\max} , рад/с (об/мин)	3000
Максимальная мощность двигателя N_e^{\max} , кВт	52
Максимальный крутящий момент двигателя M_e^{\max} , Н·м	226
Тип и размерность колеса	200/75R13
Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x	0,7
Величина максимального преодолеваемого уклона i , %	0,34
КПД трансмиссии $\eta_{\text{тр}}$	0,93
Габаритная ширина автомобиля B , мм	1444
Габаритная высота автомобиля H , мм	1136
Коэффициент сопротивления качению f_0	0,02
Передаточные числа:	
Первая передача U_1	3

«Подготовим исходные данные для тягового расчета.

Полная масса болида:

$$m_a = m_0 + m_{\text{ч}} \cdot n + m_{\text{б}} \cdot n, \quad (1)$$

где: m_0 – снаряженная масса болида, кг;

$m_{\text{ч}} = 75$ кг – масса одного человека;

n – число пассажиров;

$m_{\text{б}}$ – вес багажа.» [19]

$$m_a = 280 + 75 \cdot 1 = 365 \text{ кг}$$

Полный вес болида:

$$G_a = m_a \cdot g, \quad (2)$$

где: g – ускорение свободного падения, м/с².

$$G_a = 365 \cdot 9,81 = 3580,7 \text{ Н}$$

«Болид имеет только задний привод, то есть задние колеса ведущие, примем распределение веса по осям в соотношении: 40% на передние колеса и 60% - на задние.» [19]

Вес, который приходится на ведущие колеса:

$$G_2 = 0,6 \cdot G_a = 0,6 \cdot 3580,7 = 2148,4\text{Н}$$

Вес, который приходится на ведомые колеса:

$$G_1 = 0,4 \cdot G_a = 0,4 \cdot 3580,7 = 1432,3\text{Н}$$

Параметры обтекаемости автомобиля.

Коэффициент обтекаемости

$$k = \frac{C_x \cdot \rho}{2}, \quad (3)$$

где: $\rho = 1,293$ – плотность воздуха в нормальных условиях, кг/м^3 .

$$k = \frac{0,7 \cdot 1,293}{2} = 0,452$$

Лобовая площадь автомобиля

$$F = 0,8 \cdot B \cdot H, \quad (4)$$

где: B – габаритная ширина автомобиля, м;

H – габаритная высота автомобиля, м.

$$F = 0,8 \cdot 1,44 \cdot 1,136 = 1,312 \text{ м}^2$$

«Так как размер шин был выбран 200/75R13, то радиус качения данной шины будет рассчитываться по формуле:

$$r_k = 0,5 \cdot d + \lambda_z \cdot H, \quad (5)$$

где: d – посадочный диаметр шины, м;

$\lambda_z = 0,85$ – коэффициент вертикальной деформации;

H – высота профиля шины, м.» [19]

$$r_k = 0,5 \cdot 0,33 + 0,85 \cdot 0,15 = 0,293 \text{ м}$$

«Внешняя скоростная характеристика (ВСХ) двигателя.

ВСХ двигателя рассчитывается по формуле:

$$N_e = N_{\max} \left[\frac{\omega_e}{\omega_N} + \left(\frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^2 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^3 \right], \quad (6)$$

где: ω_e – текущее значение угловой скорости вала, рад/с;

ω_N – угловая скорость вала при максимальной мощности, рад/с.

N_e – текущее значение эффективной мощности двигателя, Вт.

Для того, чтобы построить кривую эффективного момента M_e (Н·м) необходимо применить следующую формулу:

$$M_e = \frac{N_e}{\omega_e}, \quad (7)$$

Далее рассчитываем зависимости $N_e(\omega_e)$ и $M_e(\omega_e)$.

Данные, которые были получены при испытаниях двигателя, приведены в таблице 3. Результаты расчетов сводим в таблицу 7 и представляем в виде графика (рисунок 13, 14).» [19]

Таблица 3 - Результаты со стенда испытания двигателя.

M_e , Н·м	n_e , об/мин	N_e , кВт
225,4	1329	30556
223,4	1464	33378
221,4	1533	34644
216,6	1814	40098
212,6	1954	42382
210,4	1980	42518
208,4	2049	43568
210,4	2115	45426
222,8	2243	51004
204,2	2368	49362
196	2481	49616

Продолжение таблицы 3

$M_e, \text{Н} \cdot \text{м}$	$n_e, \text{об/мин}$	$N_e, \text{кВт}$
183,6	2545	47680
181,6	2575	47712
165	2706	45568
158,8	2782	45102
150,6	2823	43388
143,4	2882	42168
134,2	2966	40590

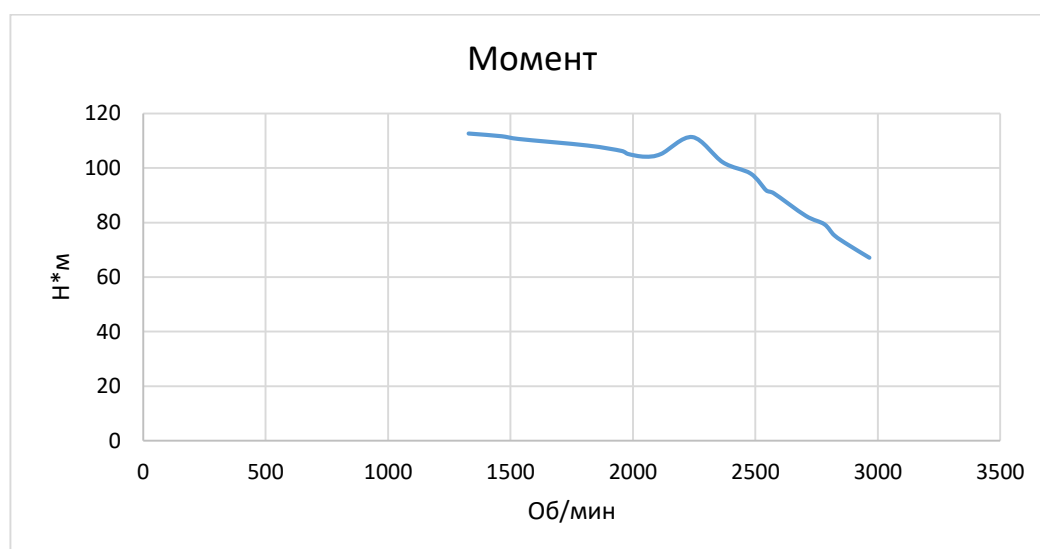


Рисунок 13 - График зависимости крутящего момента от частоты вращения со стенда

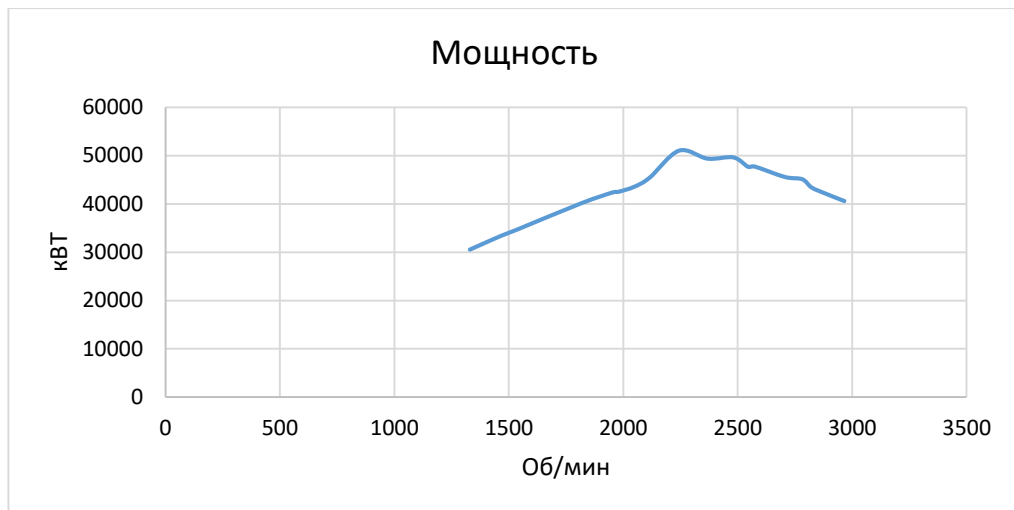


Рисунок 14 - График зависимости мощности от частоты вращения со стенда

«Передаточное число U_0 определяется, исходя из заданного значения максимальной скорости автомобиля V_{max} и передачи на которой мы хотим достигнуть эту скорость. Опыт прошлых лет показал, что на соревнованиях в динамических дисциплинах, не используется больше трех передач и нет возможности из-за конфигурации трассы достигнуть максимальную скорость. В болиде на электрической тяге отсутствует коробка переключения передач, потому исходя из этого подбираем главную передачу позволяющая достигнуть хороших показателей на всех дисциплинах.» [19]

Расчет производится по данной формуле:

$$U_0 = \frac{r_k \cdot \omega_{max}}{U_4 \cdot V_{max} \cdot U_0} \quad (8)$$

$$U_0 = \frac{0,293 \cdot 356,5}{1 \cdot 34,81} = 3$$

«Силовой баланс болида.

Уравнение силового баланса:

$$F_T = F_d + F_B + F_{и}, \quad (9)$$

где: F_T – сила тяги ведущих колес, Н;

F_d – сила дорожного сопротивления, Н;

F_B – сила сопротивления воздуха, Н;

$F_{И}$ – сила сопротивления разгону болид, Н (не учитываем).

Силу тяги рассчитаем по формуле:

$$F_{Ti} = \frac{U_{ki} \cdot U_0 \cdot M_e \cdot \eta_{тр}}{r_k}, \quad (10)$$

Силу аэродинамического сопротивления воздуха найдем из выражения:

$$F_B = k \cdot F \cdot V_a^2, \quad (11)$$

Силу дорожного сопротивления автомобиля (без учета сопротивления подъему) найдем из выражения:

$$F_d = G_a \cdot f, \quad (12)$$

где: $f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{V_a^2}{2000}\right)$ – зависимость коэффициента трения качения от скорости движения болида.» [19]

«Далее пользуемся выбранными при расчете ВСХ значениями ω_e , приводим в соответствие с ними скорости болида и результат сводим в таблицу 4.» [19]

Таблица 4 – Силовой баланс автомобиля

Рсц	2140	2140	2140	2140	2140	2140	2140	2140
об/мин	1300	1800	2000	2400	2700	2800	2900	3000
ω_e	157	188,5	240,9	261,8	303,7	324,6	345,6	356,5
M_e	226	220	210	204	164	150	142	134
V	15,333	18,410	23,527	25,569	29,661	31,702	33,753	34,818
Pt	2152,1	2094,8	1999,6	1942,5	1561,6	1428,3	1352,1	1275,9
Pв	139,43	200,99	328,27	387,70	521,74	596,02	675,63	718,92
Pд	75,646	79,160	86,424	89,815	97,465	101,70	106,24	108,71
f	0,022	0,023	0,025	0,026	0,028	0,030	0,031	0,032

На рисунке 15 представлено графическое отображение табличных данных.

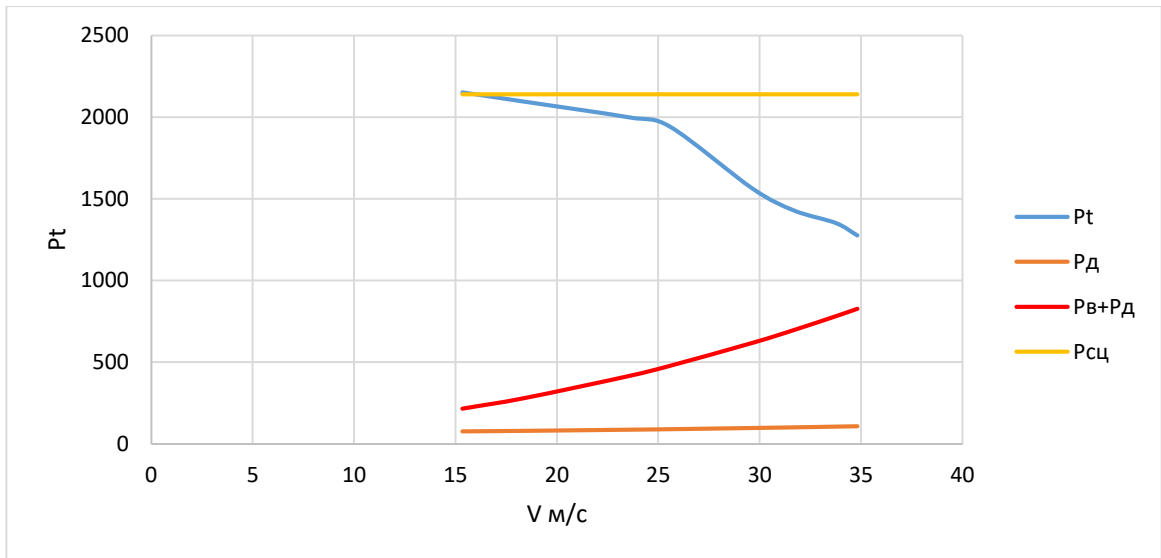


Рисунок 15 – Тяговый баланс болида

«Динамическая характеристика автомобиля

$$D = \frac{F_T - F_B}{G_a}, \quad (13)$$

По приведенной формуле и данным силового баланса мы можем рассчитать и построить динамическую характеристику болида, которая будет являться графическим изображением зависимости динамического фактора D от скорости движения при полной загрузке болида.» [19]

«Данные расчета занесем в таблицу 5 и представим графически на рисунке 16.

Для того, чтобы учесть влияние буксования ведущих колес, определим динамический фактор по сцеплению:» [19]

$$D_{сц} \approx \frac{G_{сц} \cdot \varphi}{G_a} = \frac{2030,4 \cdot 2,1}{3384,45} = 1,25.$$

$$G_{сц} = m_2 \cdot G_2 = 1,08 \cdot 2030,4 = 2192,83H$$

Таблица 5 - Данные расчета динамической характеристики

Динамическая характеристика автомобиля D							
0,594	0,559	0,493	0,459	0,307	0,245	0,199	0,165

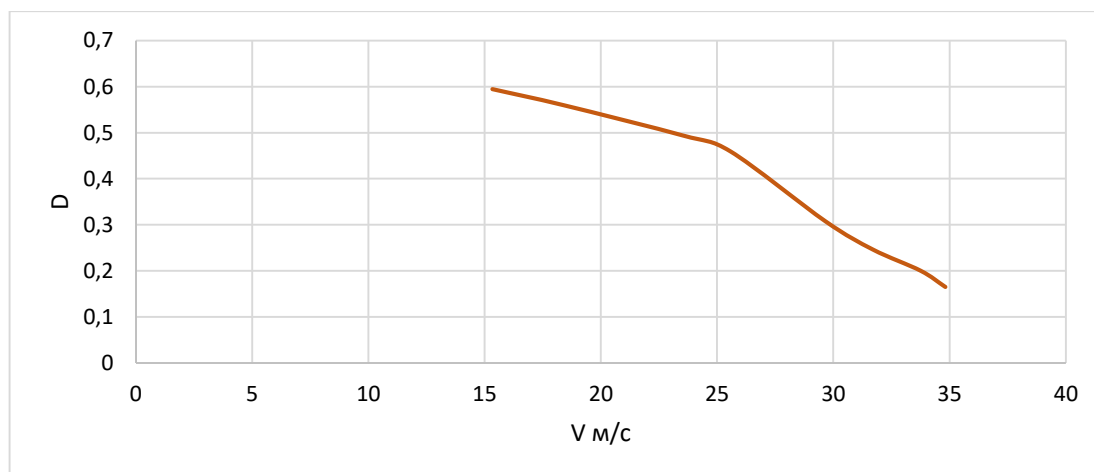


Рисунок 16 - Динамическая характеристика автомобиля

Разгон автомобиля.

«Ускорение во время разгона определим для такого случая, в котором автомобиль движется по горизонтальной дороге с твердым покрытием хорошего качества при максимальном использовании мощности двигателя и отсутствии буксования ведущих колес.

Ускорение найдем из выражения:» [19]

$$j = \frac{(D-f) \cdot g}{\delta_{вр}}, \quad (14)$$

«где: $\delta_{вр} = 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_k^2)$ – коэффициент учета вращающихся масс двигателя, который определим по формуле:

$$\delta_{вр} = 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_k^2) = 1 + (0,05 + 0,03 \cdot 3^2) = 1,32$$

Данные, полученные в ходе решения, представим в таблице 6 и изобразим графически на рисунке 17.» [19]

Таблица 6 – Значения ускорения при разгоне

Ускорение автомобиля j , m/c^2							
4,639	4,347	3,796	3,509	2,257	1,750	1,366	1,073

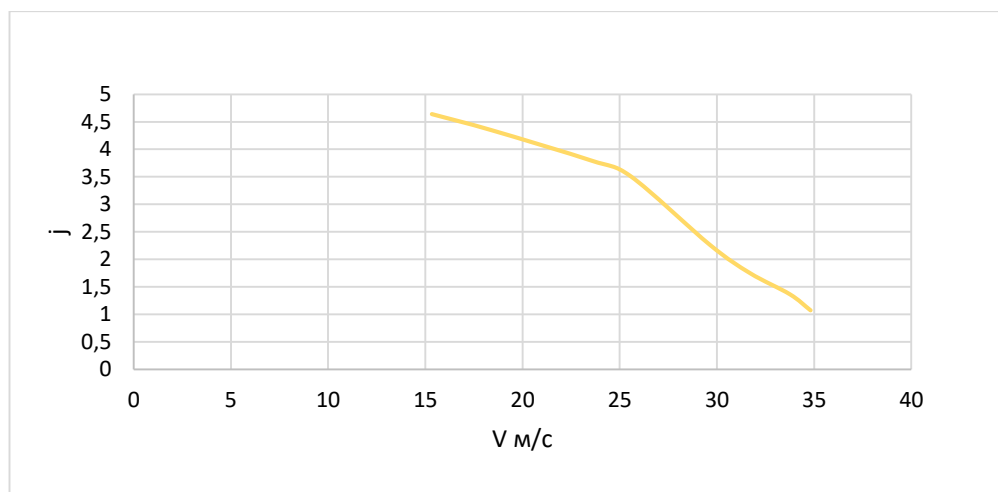


Рисунок 17 - Ускорение автомобиля при разгоне

«Далее определили значения обратных ускорений ($1/j$) и изобразили их на рисунке 18 и внесли их в таблицу 7. Так как при скоростях, близких к максимальным значениям, ускорение стремится к нулю, то для расчета обратных ускорений ограничиваются скоростью $V = (0,8-0,9) V_{max.}$ » [19]

Таблица 7 – Значения обратных ускорений.

Обратные ускорения								
0,2	0,215	0,230	0,263	0,284	0,442	0,571	0,732	0,931

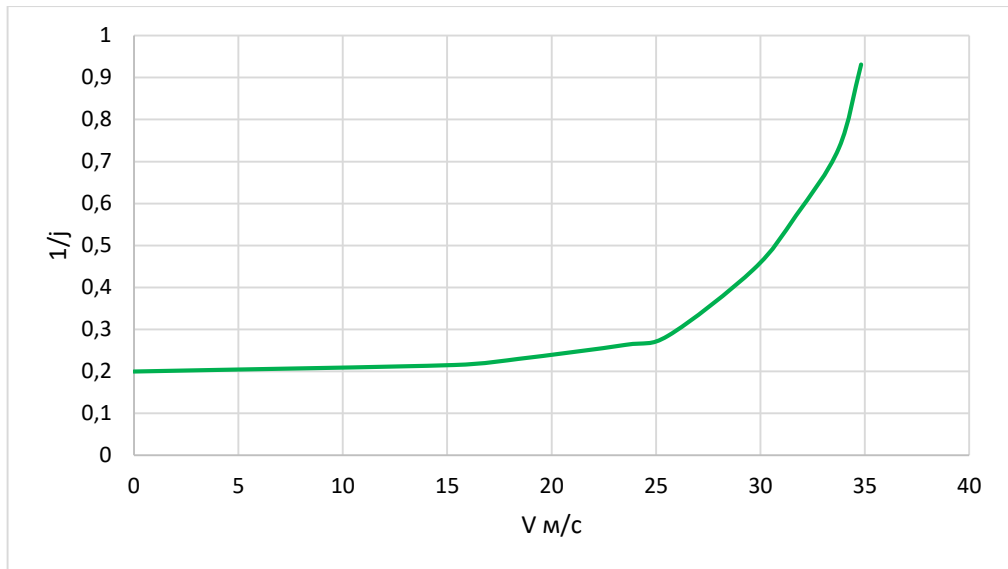


Рисунок 18 - Обратные ускорения автомобиля

Время и путь разгона.

«Время и путь разгона автомобиля мы определили графоаналитическим способом. Суть данного способа заключается в замене интегрирования суммой конечных величин:

$$\Delta t = \int_{V_i}^{V_{i+1}} \frac{1}{j} dV \approx \left(\frac{1}{j_{CP}} \right)_{i+1} \cdot (V_{i+1} - V_i) \quad (15)$$

Для этого кривую обратных ускорений разбивают на интервалы и считают, что в каждом интервале болид разгоняется с постоянным ускорением $j = const$, которому соответствуют значения $(1/j) = const$. Эти величины можно определить следующим образом:

$$\left(\frac{1}{j_{CP}} \right)_k = \frac{(1/j)_{k-1} + (1/j)_k}{2} \quad (16)$$

где: k – порядковый номер интервала.» [19]

«Если мы заменим точное значение площади под кривой $(1/j)$ в интервале ΔV_k на значение площади прямоугольника со сторонами ΔV_k и $\left(\frac{1}{j_{CP}} \right)_k$, перейдем к приближенному интегрированию:

$$\Delta t = \left(\frac{1}{j_{\text{ср}}}_k \right) \cdot (V_k - V_{k-1}), \quad (17)$$

$$t_1 = \Delta t_1, t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_2, t_n = \sum_{k=1}^n \Delta t_k.$$

где: t_1 – время разгона от скорости V_0 до скорости V_1 ;

t_2 – время разгона до скорости V_2 .» [19]

Результаты данного расчета сведем в таблицу 7 и изобразим графически на рисунке 19.

Таблица 7 – Значения скорости и времени

$V_a, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$
15,33	3
18,41	3,67
23,52	4,92
25,56	5,47
29,66	6,95
31,7	7,98
33,75	9,31
34,81	10,18

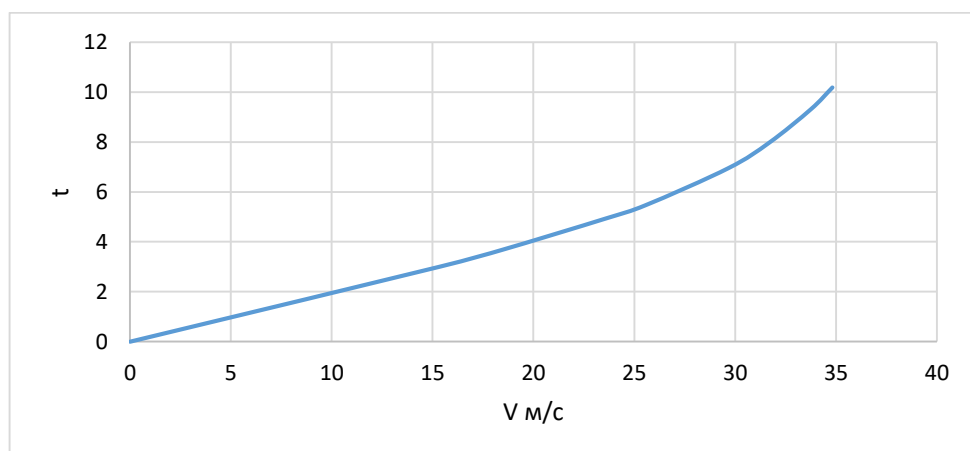


Рисунок 19 – Время разгона автомобиля

«Таким же образом провели графическое интегрирование (рисунок 20) зависимости $t=f(V)$ для получения зависимости пути разгона S от скорости болида.

В данном случае кривую $t=f(V)$ разбили на временные интервалы, для каждого из которых нашли соответствующие значения V_{cpk} .» [19]

«Площадь элементарного прямоугольника в интервале Δt_k - путь, преодолеваемый болидом от отметки t_{k-1} до отметки t_k , который движется с постоянной скоростью V_{cpk} .

Величину площади элементарного прямоугольника определили следующим образом:

$$\Delta S = V_{cpk} \cdot (t_k - t_{k-1}) = V_{cpk} \cdot \Delta t_k, \quad (18)$$

где: k – порядковый номер интервала, m выбирается произвольно.

Путь разгона от скорости V_0 до скорости V_1 : $S_1 = \Delta S_1$, до скорости V_2 :

$$S_2 = \Delta S_1 + \Delta S_2, \text{ до скорости } V_n: S_n = \sum_{k=1}^m \Delta S_k \text{ .}» [19]$$

Результаты внесем в таблицу 8 и изобразим графически на рисунке 20.

Таблица 8 – Значение пути и скорости разгона

$v_a, \text{м/с}$	$S, \text{м}$
15,33	22,99
18,41	34,29
23,52	60,49
25,56	73,92
29,66	114,78
31,7	146,38
33,75	189,9
34,81	219,72

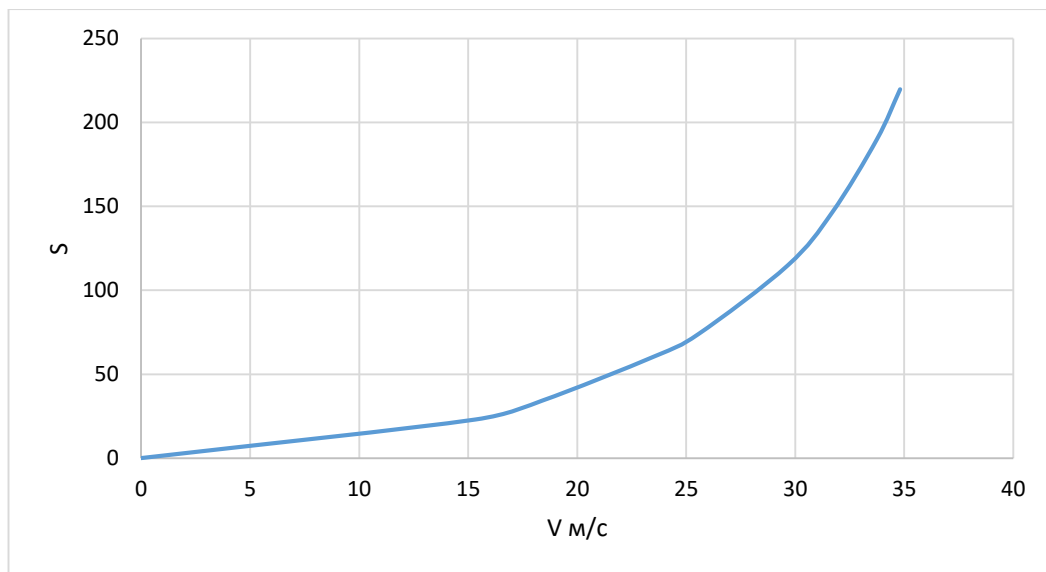


Рисунок 20 – Путь разгона болида

«Уравнение мощностного баланса:

$$N_T = N_e - N_{тр} = N_f + N_n + N_B + N_D \quad (19)$$

где: N_T – тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам, Вт;

$$N_T = N_e \cdot \eta_{тр} = N_e \cdot 0,93 ,$$

$N_{тр}$ – мощность, теряемая в агрегатах трансмиссии, Вт;

N_f – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления подъему, Вт;

N_B – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления воздуха, Вт;

N_D – мощность, затраченная на преодоление силы инерции электроболида Вт.

Внесем полученные данные в таблицу 9 и изобразим зависимости на рисунке 21.» [19]

Таблица 9 – Значения мощностного баланса болида

Мощностной баланс автомобиля								
N_T	32998,6	38567,1	47047,7	49668,7	46320,2	45281,7	45639,9	44427,0
N_D	1159,9	1457,3	2033,3	2296,5	2890,9	3224,3	3586,2	3785,3
N_{D+N_B}	3297,9	5157,7	9757,1	12209,8	18366,4	22119,7	26391,3	28817,1

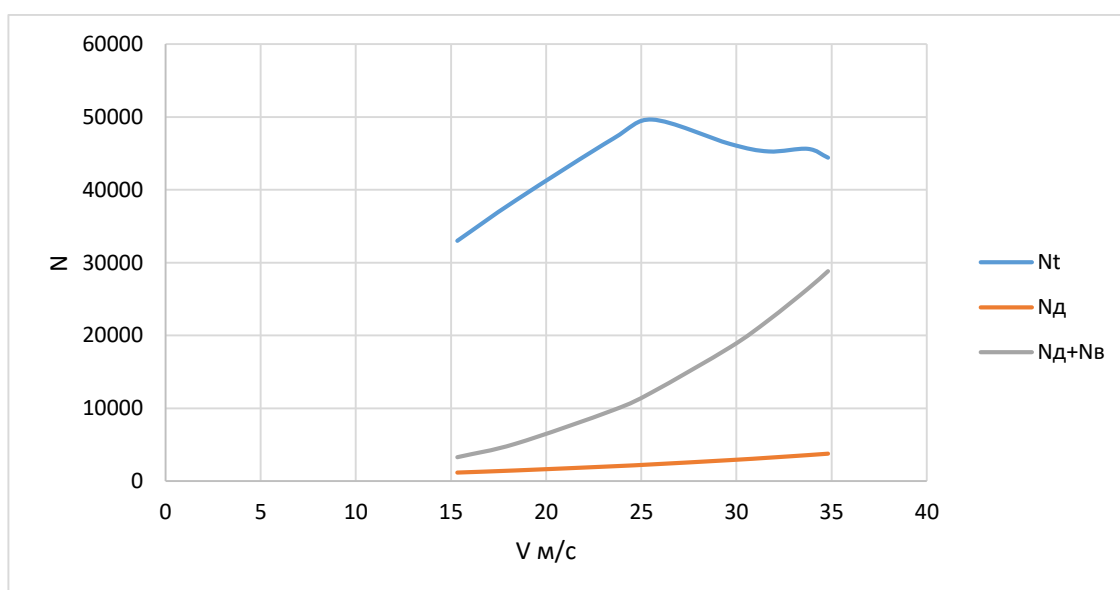


Рисунок 21 – Мощностной баланс автомобиля

Таким образом, получен комплекс необходимых характеристик для конструирования электроболида.

3.2 Проектирование рамы гоночного болида на электротяге

С 2014 года командой проекта «Формула Студент ТГУ» были разработаны семь автомобилей с двигателем внутреннего сгорания и рамы таких автомобилей ежегодно модернизировались для достижения более легких весовых характеристик. На рисунке 22 приведены весовые показатели рамных конструкций, разработанных болидов. Из диаграммы можно заметить, что с 2018 года рамы последующих болидов стали сравнительно тяжелее: это связано с повышением динамических показателей автомобилей.

Однако, в 2022 году причина увеличения веса рамной конструкции заключается в переходе от платформы автомобиля с двигателем внутреннего сгорания к платформе автомобиля с электродвигателем. В случае с EScorpion в задней части рамы были установлены два электродвигателя Revolt RV-160Em, два контроллера Kellycontroller KLS14401-8080I, а также на аккумуляторная батарея. Для размещения этих компонентов в конструкцию были внесены изменения и задняя часть рамы была удлинена.

Несмотря на существенные изменения, при сравнении весовых показателей рамных конструкций автомобиля 2014 года и автомобиля 2022 года можно видеть положительный тренд на снижение веса, разница составляет 14 кг (32%).

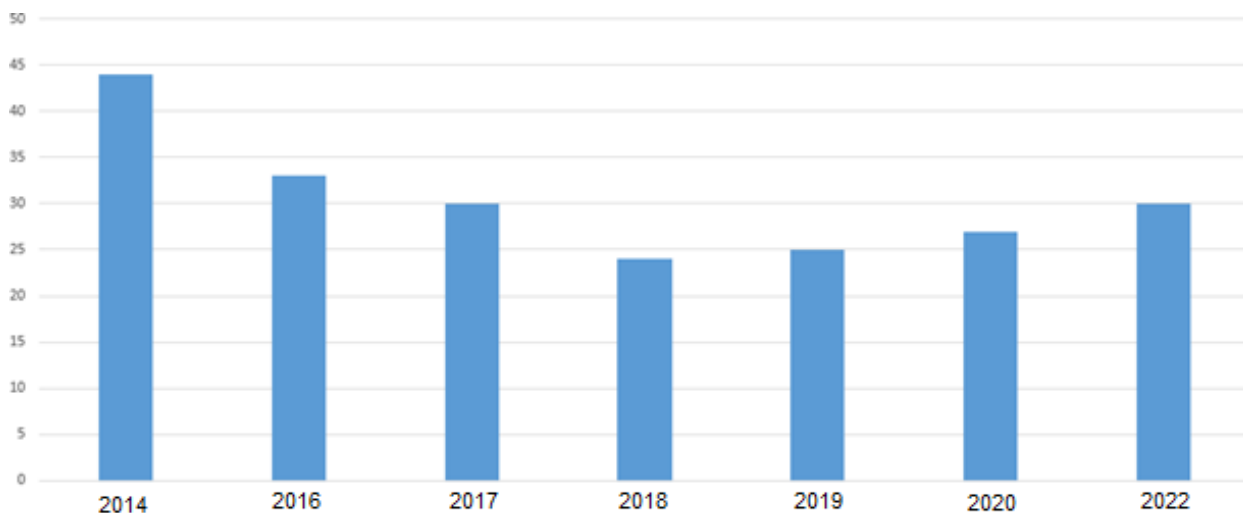


Рисунок 22 – Диаграмма весовых характеристик рамных конструкций созданных болидов

Требования регламента к рамной конструкции приведены в разделе 2 данной работы. Проанализировав их, в виду ограниченного времени и одновременной разработки трех систем автомобиля, было принято решение об изменении только задней части рамы. [16] Передняя часть рамы останется без изменений относительно предыдущего болида Red Scorpion G3. На рисунке 23 можно увидеть изменения, произведенные в рамной конструкции болида Escorpion (выделено красным) относительно Red Scorpion G3 (выделено черным).

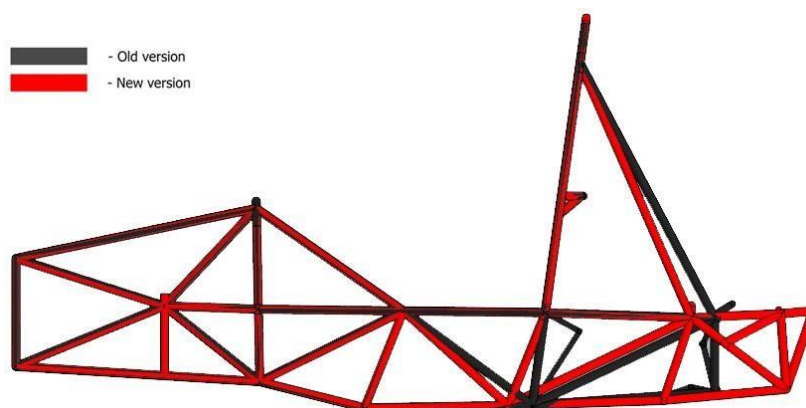


Рисунок 23 – Сравнение рамных конструкций

В автомобиле с двигателем внутреннего сгорания задача по оптимизации габаритов и соответственно уменьшения веса рамы решалась за счет относительно небольших габаритов самой силовой установки и применения рычагов подвески косоугольного типа [17]. Но в случае с электроболитом, изменения, которые были сделаны в задней части рамной конструкции были вызваны необходимостью компактного размещения, как показано на рисунке 24, и приобретения дополнительного пространства для аккумуляторной батареи, электродвигателей и контроллеров, поскольку требуется дополнительное пространство. [22]

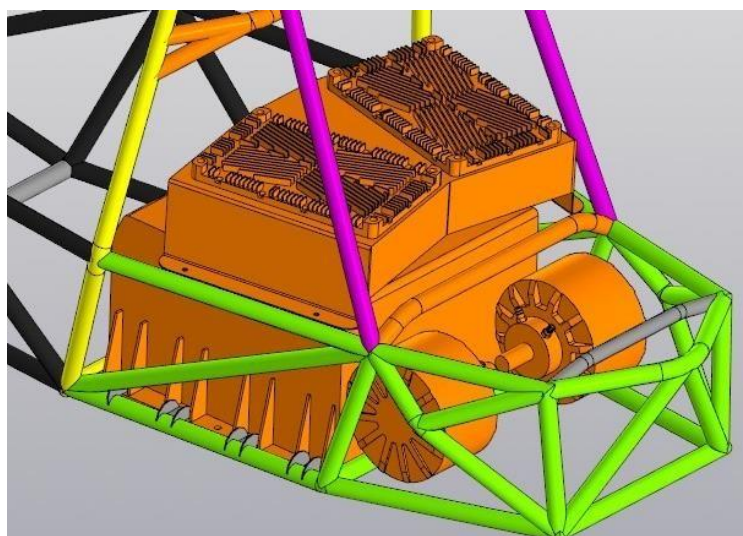


Рисунок 24 – Расположение элементов в задней части рамы

Согласно разработанной концепции аккумулятор должен располагаться ближе к центру болида, это необходимо для проведения работ по его снятию и установке [15]. В соответствии с этим главная дуга рамы была изогнута в нижней части, что позволило увести поперечную трубу нижней части вперед.

Далее было принято решение об удлинении рамы. В задней части появилась дополнительная рамная структура для размещения электродвигателей (рисунок 25).

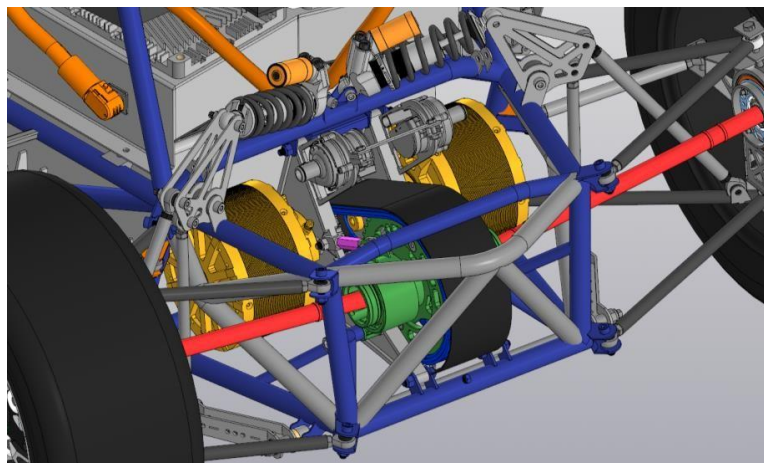


Рисунок 25 – Размещение электродвигателей

При завершении построения 3D-модели рамы необходимо определиться с выбором толщины стенок используемых труб. [24] Это также описано в требованиях регламента FS Rules. Поскольку вес аккумуляторной батареи электроболида больше веса ДВС, было решено применить трубы с большей толщиной стенки. Подбор толщины труб для рамной конструкции EScorpion представлен на рисунке 26.

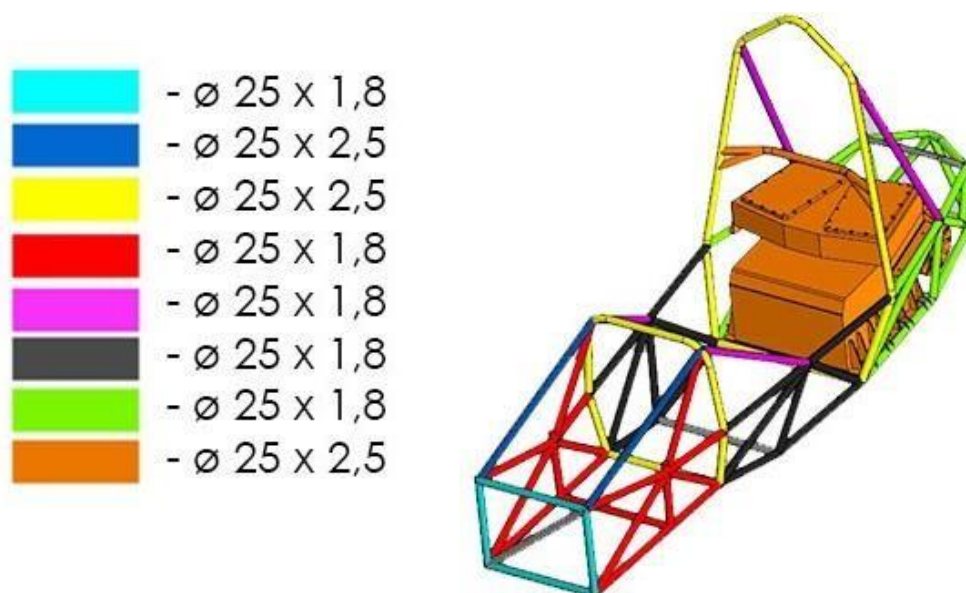


Рисунок 26 – Толщина труб рамы EScorpion

3.2.1 Создание расчетной модели

Следующим этапом разработки является создание одномерной расчетной модели с целью проверки несущей конструкции на жесткость на кручение в различных условиях. Данная модель представляет из себя видообразующие линии, по которым протянуты необходимые сечения. Кроме этого, также, была разработана модель подвески болида в упрощенном виде. Когда система была подготовлена, мы провели симуляцию нагружения и последующий анализ деформации. [12]

Схема нагружения, представленная на рисунке 27 была использована при расчете [4]. Чтобы получить скручивающий момент мы приложили равную нагрузку в двух направлениях. Сила нагружения была приложена удаленно в местах крепления рычагов передней подвески к раме, а в качестве точек фиксации были выбраны места крепления рычагов задней подвески. [21].

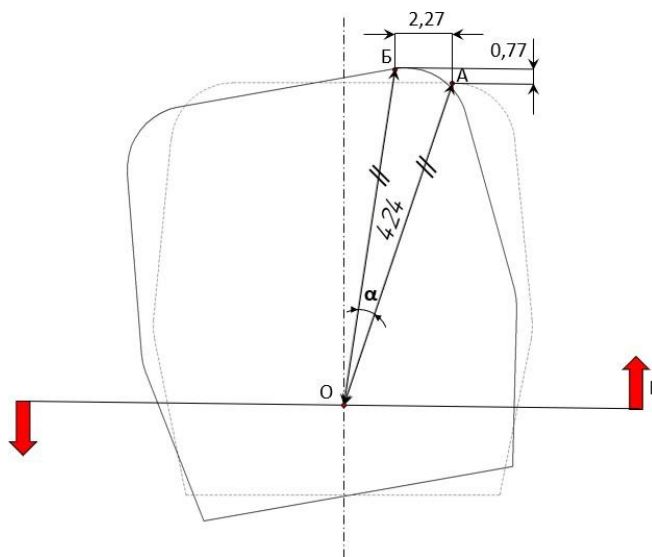


Рисунок 27 – Приложение нагрузки

«При скручивании рамы измеряется смещение. А сама жесткость на кручение C_p рассчитывается как отношение приложенного крутящего момента M_k к углу деформации рамы α_p :

$$C_p = \frac{M_k}{\alpha_p} \quad (20)$$

Величину крутящего момента рассчитаем по формуле:

$$M_k = P \cdot L \quad (21)$$

где P – величина силы, прикладываемой удаленно, Н;

L – половина длины трека, м.

Нагрузку, прикладываемую на рычаги передней подвески, примем, исходя из анализа источников равной 1500 Н.» [6]

«Определить угол деформации можно по формуле, исходя из схемы нагружения рамы (рисунок 35). Из схемы видно, что точка А при кручении рамы перемещается в точку Б. Расстояние между точками определяется по теореме Пифагора:

$$AB = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (22)$$

где x , y – расстояние между точками А и Б в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

Из схемы нагружения следует, что точка О лежит на оси автомобиля, а угол α является углом деформации рамы. Для нахождения угла α , рассмотрим треугольник ΔOAB , в котором отрезки ОА и ОБ являются равными. По теореме косинусов получаем следующую формулу:

$$AB^2 = OA^2 + OB^2 - 2 \cdot OA \cdot OB \cdot \cos \alpha_p \quad (23)$$

Формулу (5) можно представить в удобном виде для нахождения угла деформации рамы:

$$\cos \alpha_p = \frac{OA^2 + OB^2 - AB^2}{2 \cdot OA \cdot OB}$$

Тогда:

$$\alpha_p = \arccos \left(\frac{OA^2 + OB^2 - AB^2}{2 \cdot OA \cdot OB} \right) (5) \gg [6]$$

Результаты показали, что точка передней дуги под нагрузкой по оси Y сместилась на 3,5мм (рисунок 28), а по оси Z смещение составило 8,6 мм (рисунок 29).

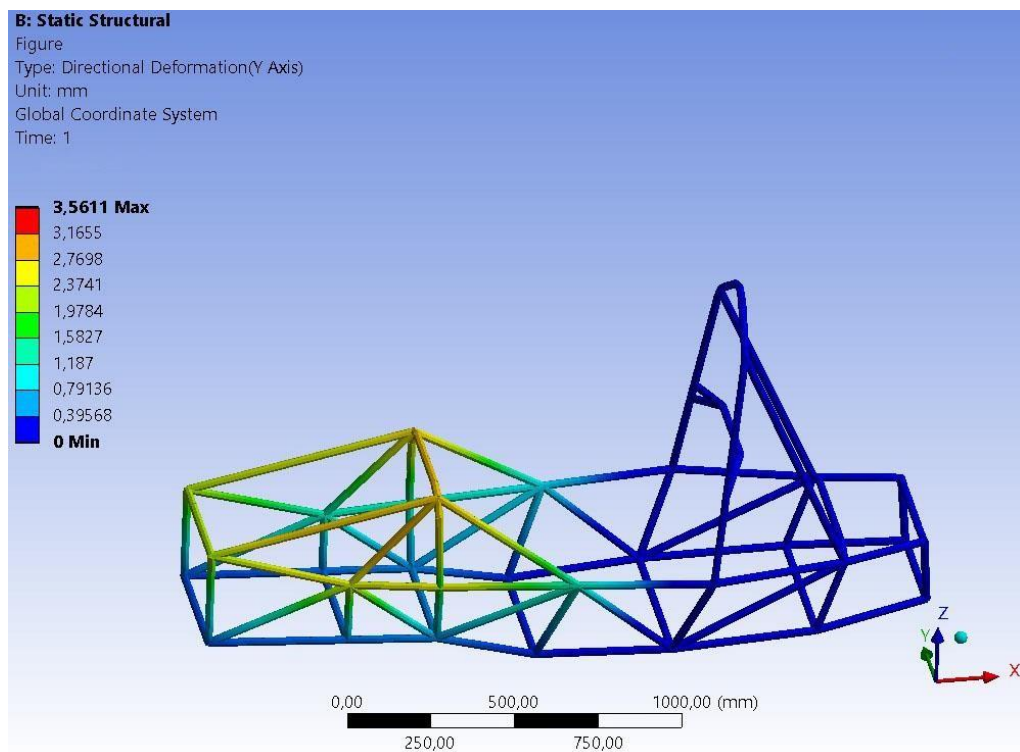


Рисунок 28 – Смещение точки по оси Y при повороте

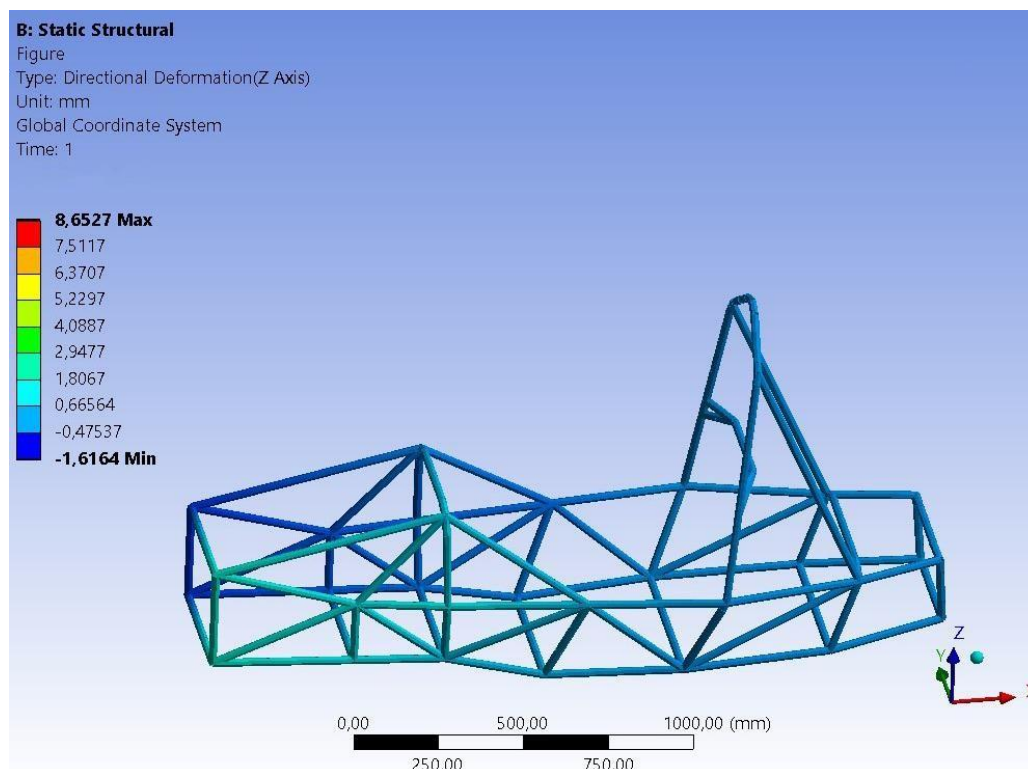


Рисунок 29 – Смещение точки по оси Z при повороте

По результатам прочностного анализа, жесткость рамы на кручение составила 2700 Н·м/град.

Далее был проведен расчет рамы на кручение при торможении [13], результаты которого отображены на рисунках 30 и 31. Максимальное смещение по оси Y составило 4,3 мм, а по оси Z – 2,1 мм.

В сравнении с результатами аналогичных расчетов, проводимых для несущей конструкции болида прошлого года это на 0,2 мм меньше.

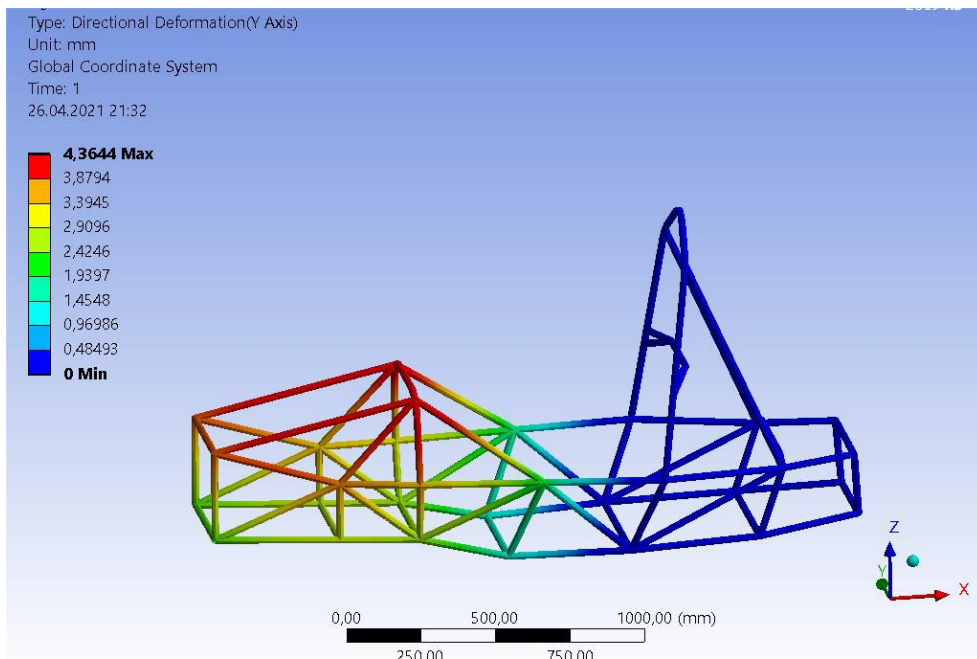


Рисунок 30 – Смещение точки по оси Y (при торможении)

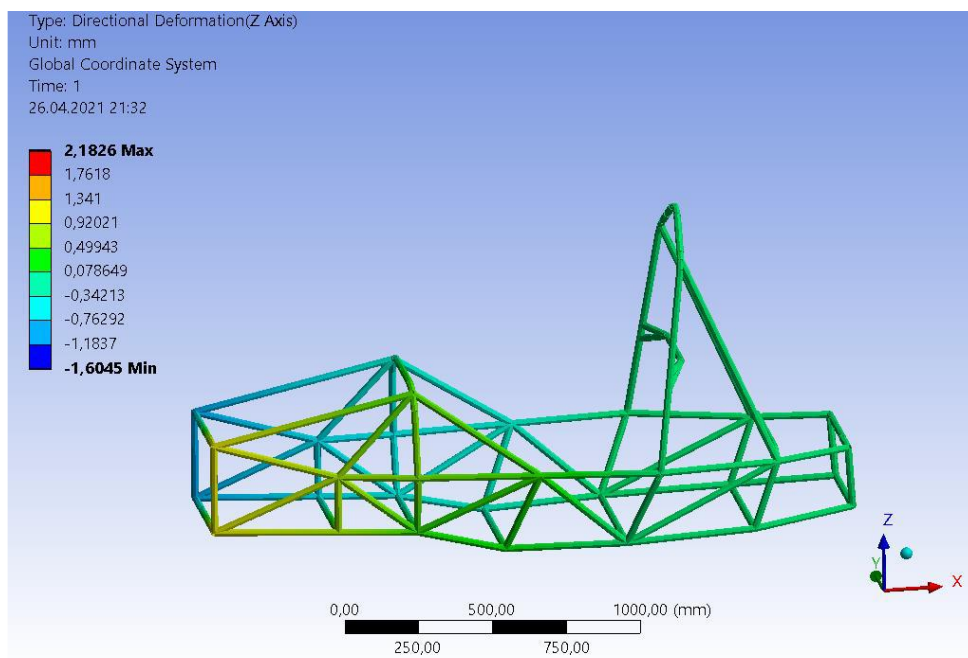


Рисунок 31 – Смещение точки по оси Z (при торможении)

Также, вес несущей конструкции болида электробоида по отношению к весу болида прошлого года (с ДВС) увеличился на 3 кг. Это связано с тем,

что была добавлена боковая защитная конструкция с толщиной стенки 2,5мм.

Однако, принимая во внимание все внесенные изменения, данная разница не является существенной.

3.2.2 Соответствие конструкции требованиям регламента FS Rules

Для того, чтобы рама электроболида соответствовала требованиям регламента FS Rules и, чтобы обеспечить защиту элементов тяговой системы в случае столкновения в задней части рамной конструкции во фронтальной и боковой проекциях необходимо провести триангуляцию [7]. На рисунке 32 изображен вариант выполненной триангуляции для болида EScorpion.

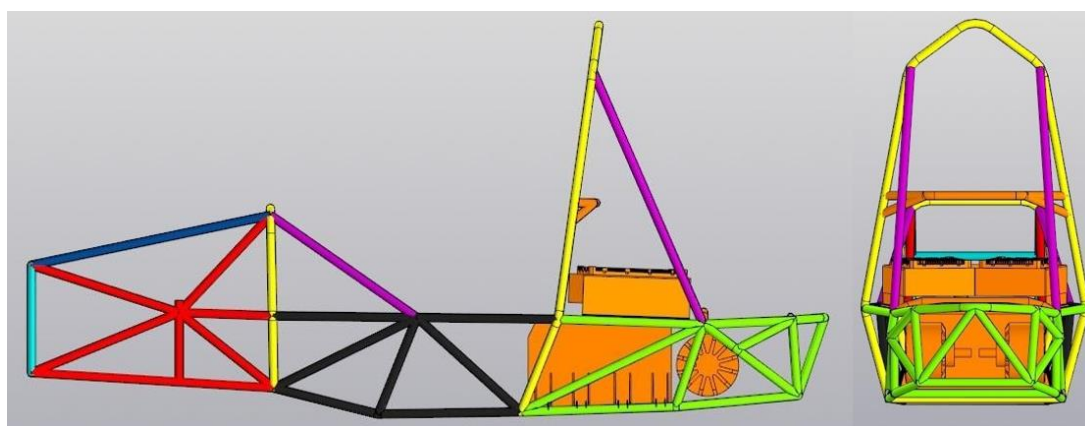


Рисунок 32 – Триангуляция рамы

Наряду с этим, одним из главных требований регламента FS Rules [20] является способность конструкции крепления аккумулятора выдерживать нагрузку по всем направлениям равную 20 000 Н. Для этого были проведены тесты с симуляцией напряжения, по результатам которых видно, что предельные напряжения не превышают предела прочности, используемой стали (рисунок 33) [18].

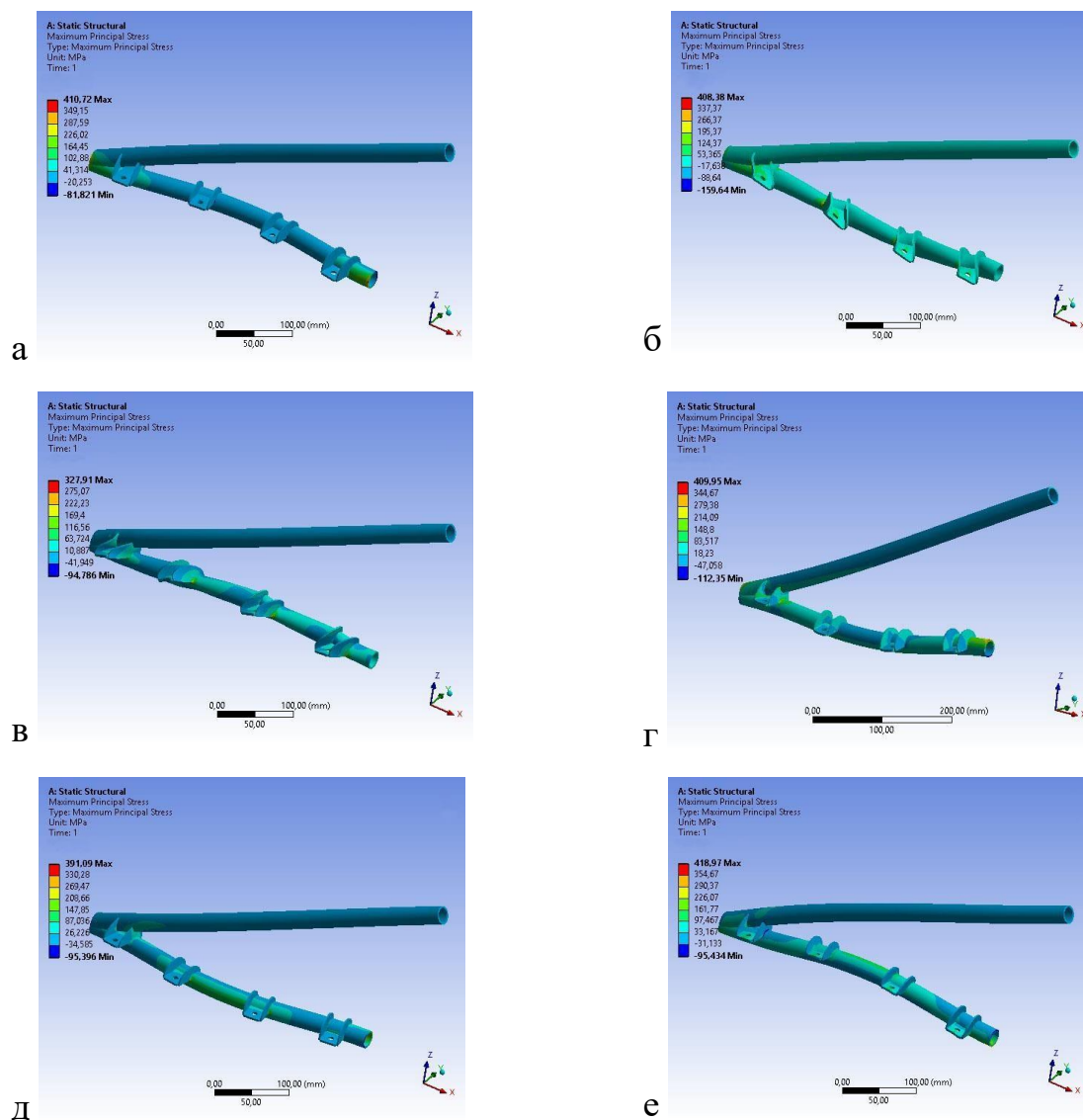


Рисунок 33 – Распределение напряжений в кронштейнах: а-е – деформации по координатным осям соответственно

Вывод по разделу:

- при разработке несущей конструкции выбор сделан в пользу пространственной рамы;
- тренд на снижение веса сохранен: рамная конструкция весит 30 кг, что на 14 кг меньше, чем вес рамы первого болида «White Shark»;
- жесткость рамы на кручение равна 2700 Н·м/град.;
- конструкция несущей системы электроболида соответствует регламенту.

Заключение

Formula Student — это международный инженерный проект, включающий в себя одноименные соревнования.

В рамках проекта Formula Student перед студентами стоит задача ежегодно разрабатывать, изготавливать и тестировать болид класса Formula Student.

Основой конструкции такого автомобиля является его несущая система. Она имеет ряд особенностей: при ее разработке необходимо обеспечить оптимальные весовые и прочностные характеристики.

В данной работе был рассмотрен вопрос разработки рамы спортивного болида Formula Student класса EV.

В первом разделе были описаны цели и задачи проекта, а также приведен анализ состояния вопроса с описанием опыта разработки несущих конструкций других команд.

Во втором разделе были описаны требования регламента FR Rules 2022 к несущей конструкции и ее материалам.

В рамках работы над третьим разделом было описано проектирование пространственной стальной рамы гоночного болида на электротяге с приведением сравнительного анализа веса несущих конструкций, созданных ранее болидов с ДВС, а был проведен тягово-динамический расчет электроболида и прочностные расчеты несущей конструкции конструкции.

В результате работы была разработана несущая конструкция для спортивного болида класса EV, изготавливаемый с целью участия в спортивных соревнованиях Formula Student Russia.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Автомобиль гоночный: № 2018501726: заявл. 17.09.2018: опубл. 13.08.2019. – Бюл. № 8 / А. В. Бобровский, Д. А. Горохова, О. О. Шерстобитова [и др.]; патентообл. ФГБОУ «ТГУ». – 2 с.
2. Автомобиль гоночный: № 2019504854: заявл. 01.11.2019: опубл. 21.09.2020. – Бюл. № 10 / А. В. Бобровский, Д. А. Горохова, О. О. Шерстобитова [и др.]; патентообл. ФГБОУ «ТГУ». – 3 с.
3. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. Т.3. - 8-е изд. Перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестоковой. / В.И. Анурьев. - М.: Машиностроение, 2001. - 864 с.
4. Брюхов А. П. Оценка и оптимизация крутильной жесткости рамы болида «Формула Студент» ПНИПУ / Брюхов А. П., Головин Д. В., Козырин Н. С. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2015. – С. 5-19.
5. Головин Д. В., Разработка общей концепции болида «Формула Студент»/Д. В. Головин//Сборник трудов конференции «Проблемы функционирования систем транспорта». – 2015. – 165-171 с.
6. Иванов А. С., Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учебное пособие / А. С. Иванов, П. А. Давыденко, Н.П. Шамшов. - М.: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 276 с.
7. Кулагин А. Л., Исследование Свойств Пассивной Безопасности Пространственного Каркаса Рамы Спортивного Автомобиля Класса «Формула Студент» / Кулагин А. Л., Гончаров К. О., Тумасов А.В., Орлов Л. Н.// Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6
8. Кулагин А. Л., Комплексная разработка и оценка прочности пассивной безопасности и элементов спортивных автомобилей класса «Formula Student» на основе композиционных материалов / А. Л. Кулагин, Р.В. Денужаев, К. О. Гончаров, А. В. Тумасов, Л. Н. Орлов // Сборник трудов 4-го Всероссийского форума «Студенческие инженерные проекты» – 2016. – 75-80 с.

9. Кутепов Н. Ю. Разработка методики оптимизации конструкции поворотных кулаков гоночного болида проекта Formula Student / Н. Ю. Кутепов, Р. З. Манджапарашвили // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук: материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых, 2020. – С. 869-872.

10. Логинов Н. Ю. Образовательная модель проектно-ориентированной подготовки молодых специалистов инженерно-технических направлений в концепции индустрия 4.0 / Н. Ю. Логинов, Д. Г. Левашкин, А. А. Козлов, В. А. Гуляев // Инженерное образование. – 2018. – № 23. – С. 77-82.

11. Осепчугов В.В., Фрумкин А. К. Автомобиль: анализ конструкций, элементы расчета: учебник для студентов вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

12. Основы расчетов на прочность и жесткость элементов конструкции [Электронный ресурс] // URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/d/DROBCHIK/materiali/Posobiya/Tab/sopromat.pdf> (дата обращения: 11.04.2022)

13. Пути повышения жесткости конструкции [Электронный ресурс]// URL: https://student.com/503035/tehnika/puti_povysheniya_zhestkosti_konstruktsii (дата обращения: 15.04.2022)

14. Родионов В. Ф., Фиттерман Б.М., Проектирование легковых автомобилей. – М.: машиностроение, – 1980. – 479 с.

15. Сапон В. М. Оптимизация пространственной трубчатой рамы болида класса «Формула Студент» / В. М. Сапон // E-SCIO. – 2020. – С. 526-539.

16. Скутнев В. М. Основы конструирования и расчета автомобиля: учеб. пособие / В. М. Скутнев. – Тольятти: ТГУ, 2012. – 294 с.

17. Хаммилл Д. Подвеска и тормоза: как построить и модифицировать спортивный автомобиль / Д. Хаммилл. – М.: Легион-Автодата, 2009. – 96 с.
18. Хусаинов А. Ш., Пассивная безопасность автомобиля: учебное пособие для студентов направлений 190100.62 «Наземные транспортно-технологические комплексы» по профилю – Автомобиле- и тракторостроение и 190109.65 «Наземные транспортно-технологические средства» по специализации «Автомобили и тракторы» / А. Ш. Хусаинов, Ю. А. Кузьмин. – Ульяновск: УлГТУ, 2011 – 89 с.
19. Черепанов Л. А. Расчет тяговой динамики и топливной экономичности автомобиля: электрон. учеб.-метод. пособие / Л. А. Черепанов. – Тольятти: ТГУ, 2016. – 60 с.
20. 2022 Rules Release [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fsaonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=51cf7622-651e-4b57-8c9c-e0391bc08edc> (дата обращения 22.05.2022).
21. Chambers A. E. Development of a Test Standard for Determining the Torsional Rigidity of a Formula SAE space Frame / A. E. Chambers, S. A. Rodriguez, R. M. Walsh, D. Wootton // American society for Engineering Education, 2016.
22. Elgowainy A. Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles / A. Elgowainy. – NY: Springer, 2021. – 534 p.
23. Formula SAE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fsaonline.com/> (дата обращения 22.05.2022).
24. Gillespie T. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Revised Edition R-506/ T. Gillespie. – SAE International, 2021. – 510 p.
25. Pascale V. D. Torque Vectoring Control for Fully Electric SAE Cars / V. D. Pascale, B. Lenzo, F. Farroni, F. Timpone, X. Zhang // Proceedings of XXIV AIMETA Conference, 2019. – P 1075-1083.