

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 кафедры)  
15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
(код и наименование направления подготовки)  
Инжиниринг и производство транспортных средств  
(профиль)

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему Оптимизация конструкции рамы гоночного болида класса «Формула Студент»

Студент	<u>Е.И. Волкова</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>А.В. Бобровский</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультант	<u>А.Г. Егоров</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., доцент А.В. Бобровский \_\_\_\_\_

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.В. Бобровский  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) \_\_\_\_\_  
(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1 Состояние вопроса .....	4
1.1 Описание участие в FSAE .....	4
1.2 Существующие требования к конструкции и технологии сборки .....	5
1.3 Заполнение SES&DSS .....	14
2 Существующие варианты конструкций.....	24
2.1 Анализ существующих рамных конструкций.....	24
2.2 Анализ предыдущих конструкций команды TRT .....	33
2.3 Разработка рамной конструкции .....	37
2.4 Технологическая оснастка для изготовления рамы .....	42
3 Метод расчета на кручение .....	47
3.1 Существующие методы расчета на кручение .....	47
3.2 Предлагаемый метод расчета на кручение.....	48
4 Оптимизация рамной конструкции болида класса формула студент .....	51
4.1 Расчетно-аналитическая часть.....	51
4.2 Проведения нагружения первичной рамной конструкции.....	55
4.2 Анализ конструкционной прочности с использованием пакета конечно-элементного моделирования ANSYS.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	83
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	84

## **ВВЕДЕНИЕ**

В наши дни в очень многих университетах по всему миру развито направление, связанное с проектировкой и созданием гоночных болидов класса «Формула Студент». Одной из главных целей проекта является проектирование и создание гоночного болида, а также дать возможность студентом инженерных направлений получить реальную практику при работе со специализированными программами и работе с железом. После того, как конструкция автомобиля собрана – проходят международные соревнования, где разработанные студентами конструкции, соревнуются в ряде статических и динамических дисциплин.

Одним из самых важных элементов гоночного болида класса «Формула Студент» является его каркас – рама. Задача инженеров – спроектировать такой тип конструкции, который с одной стороны будет иметь достаточно легкий вес, но с другой стороны обеспечивать необходимую жесткость конструкции.

Цель работы: оптимизировать рамную конструкцию гоночного болида класса «Формула Студент».

# **1 Состояние вопроса**

## **1.1 Описание участие в FSAE**

Соревнования формата Formula Student предлагают студентам, обучающимся в университетах по программам бакалавриата и магистратуры, задачу: создать 3D модель гоночного автомобиля и собрать промышленный образец, на котором впоследствии принять участие в серии динамических дисциплин.

Перед началом создания концепта каждой команде необходимо ознакомиться с техническими правилами, описывающими ограничения для конструкции. Задача для команды – создать конкурентоспособный автомобиль для участия в следующих заездах: ускорение, «восьмерка», автокросс и гонка на выносливость. Уникальность соревнований Formula Student заключается в возможности познакомиться с командами из университетов со всего мира, набраться друг у друга, а также у лидеров инжиниринговых деятельности необходимого опыта и посоревноваться друг с другом, продемонстрировав свои инженерный и творческий подходы.

Помимо серии динамических испытаний очень важную роль в Formula Student играют статические дисциплины, делящиеся на три направления: бизнес-презентация, отчет о стоимости и защита конструкции автомобиля. В бизнес-презентации необходимо организовать воображаемую компанию по продаже собранного вами автомобиля с учетом анализа рынка, конкурентов, цеха сборки и финансов. Далее – происходит защита перед судьями, которые играют роль заинтересованных инвесторов. Во время защиты о стоимости команде необходимо представить отчет с ценами и процессами изготовления каждого узла автомобиля, в котором необходимо учесть все, включая каждый болт и шайбу. Одна из наиболее важных статических дисциплин – защита конструкции автомобиля. На данном этапе команде необходимо объяснить судьям свои инженерные решения, пояснить, почему был сделан именно

такой выбор и предоставить технические, физические и математические расчеты.

Важнейший этап соревнований – прохождение технической инспекции. Только после полного прохождения инспекции, команда может получить разрешение на участие в динамических дисциплинах. Для получения доступа, необходимо пройти проверку на полное соответствие автомобиля регламенту FSAE или FS Rules (в зависимости от типа соревнований), а также пройти тест на торможение, переворачивание и шум.

Официальный язык соревнований - английский. Вся заполняемая документация и отправляемая судья обязана быть только на английском языке, в независимости от страны проведения соревнований. Во время соревнований все статические защиты также проходят на английском языке.

Основная суть соревнований - дать возможность студентам применить все теоретические знания, полученные во время занятий в университете, на практике. Понять, как устроен процесс сборки, научиться работать с нужным оборудованием, освоить программы САД-моделирования, а также прикоснуться к сфере менеджмента и экономике. При выпуске из университета большинство участников данного проекта становятся грамотными специалистами в своей сфере.

## **1.2 Существующие требования к конструкции и технологии сборки**

### **1.2.1 Общие требования к конструкции**

У гоночного болида класса "Formula Student" должны быть четыре колеса «открытого» типа, не расположенные на 1 линии, если описывать точнее, то автомобиль должен соблюдать следующие ограничения:

- При виде сверху должны быть видны верхние 180 градусов колес;
- Никакие элементы не должны перекрывать колеса сбоку;

- "зеленые" зоны, изображенные на рисунке 1.1. Элементы автомобиля не должны попадать в "зеленую зону" в боковой вертикальной проекции при прямом расположении колес.
- Колеса автомобиля должны соответствовать требованиям регламента по размеру.

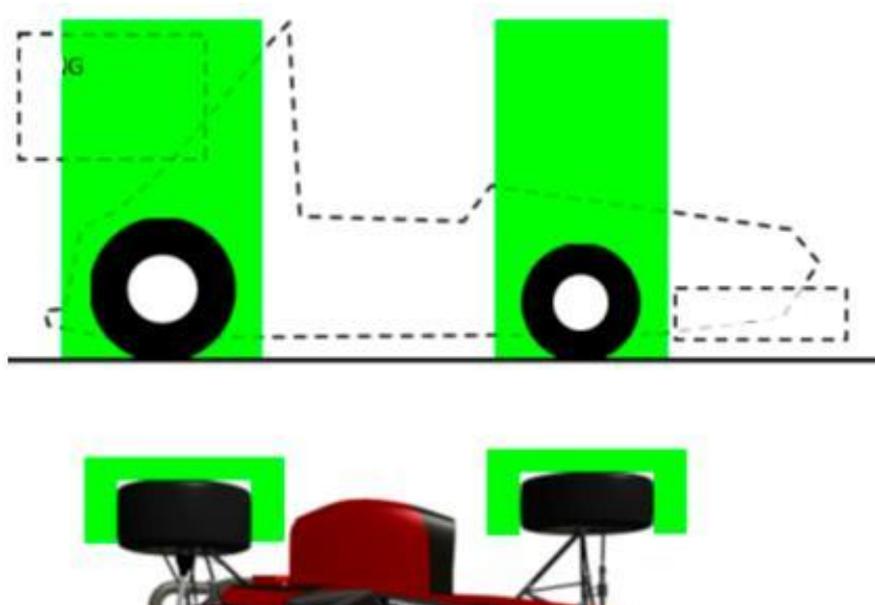


Рисунок 1.1 – «Зеленые зоны»

### 1.2.2 Колесная база и колея

Колесная база болида ограничена 1525 мм, то есть колесная база разрабатываемого автомобиля не может быть меньше данного числа. Колесная база измеряется от точки соприкосновения передней и задней шиной с дорожным покрытием. При измерении базы колеса автомобиля должны находиться в положении «прямо» (рисунок 1.2).

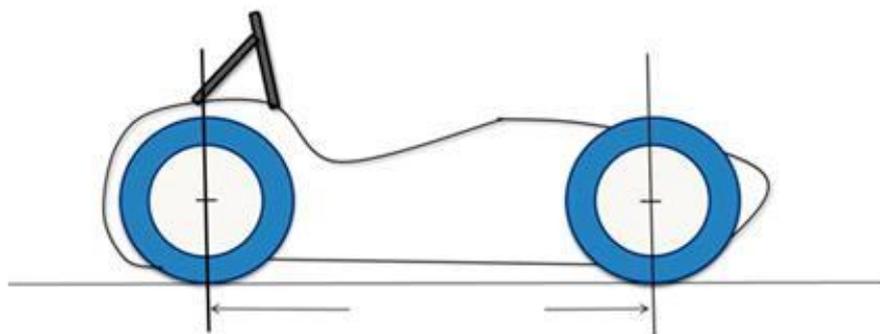


Рисунок 1.2 – Измерение колесной базы

Разница между передней и задней колеями не должна превышать 15%.

### 1.2.3 Требования к трубам

Основная конструкция автомобиля следует изготавливать из:

- Стальных труб: круглых, углеродистых или легированных.

Минимальные требования к размерам труб представлены в таблице 1.1;

- Альтернативных материалов, соответствующих тем же характеристикам, что описаны в пункте выше.

Таблица 1.1 – Минимальные требования к трубам

Наименование трубы	Размеры и толщина стенки
Основные дуги; Труба для крепления плечевых ремней	Сечение: круглое. Размеры: 25 мм в диаметре, толщина стенки 2,5 мм
Защитная конструкция; Передняя перегородка; Распорки основных дуг;	Сечение: круглое или квадратное. Размеры для круглого сечения: - диаметр 25 или 25,4 мм. - толщина стенок 1,75 или 1,6 мм соответственно. Размеры квадратного сечения: 25 на 25 мм, толщина стенок 1,2 мм.
Распорки передней перегородки; Поддерживающие элементы распорок главной дуги;	Сечение: круглое. Размеры 25 или 26 мм с толщиной стенок 1,5 или 1,2 мм соответственно.

В данной таблице описаны только минимальные требования, значения труб у вашей конструкции могут не сходиться с ними, но ни в коем случае не должны быть меньше, приведенных в таблице 1.1.

В регламенте также упоминается об использовании альтернативных материалов для труб основной структуры и для тяговой системы контейнера аккумулятора за исключением следующих:

- Главная дуга и ее распорки должны быть стальными
- Передняя дуга должна быть металлической
- Любые сварные конструкции первичной структуры должны быть стальными
- Однако передняя дуга может иметь алюминиевую сварную структуру

Если в основной структуре используются другие материалы, отличные от стальных труб, необходимо предоставить результаты физических тестов, показывающие эквивалентность минимальным требованиям стали.

#### 1.2.4 Главная дуга и ее распорки

- Одна из основных дуг гоночной машины обязана быть изготовлена из трубы, материал можно использовать только тот, который указан в таблице 1.1. Дуга не может состоять из нескольких сварных труб, то есть она должна быть сплошной. Для изготовления данной дуги запрещено использовать следующие материалы: титановый сплав, алюминий и композитные материалы;
  - главная дуга обязана соединить два противоположенных нижних участка рамы. Она должна начать подниматься с одной стороны, пройти через верх и опуститься с другой, абсолютно противоположенной стороны;
  - главная дуга автомобиля не может отклоняться более чем на 10 градусов, считая от вертикали в боковой проекции автомобиля;
  - главная дуга обязательно должна поддерживаться распорками, соединяющими главную дугу и основную конструкцию рамы; материал для распорок также описан в таблице 1.1;

- при фронтальной проекции между местом крепления главной дуги к основной конструкции и вертикальными частями дуги должно обеспечиваться расстояние, как минимум, в 380 мм;

Подробнее о распорках:

- распорки главной дуги должны быть симметричны и находится с обеих сторон болида;

- дуга должна опираться на распорки с той стороны, в которую наклонена;

- минимальный угол между главной дугой и ее распоркой - 30 градусов. Распорка не может быть ниже 160 мм, считая от самого верхнего элемента главной дуги;

- распорки обязательно должны быть прямыми, никакие изгибы не допускаются;

- в случае, если вы присоединяете к распорке иной элемент, не входящий в основную конструкцию рамы автомобиля, необходимы дополнительные поддерживающие элементы – распорки, чтобы не свернуло конструкцию.

#### 1.2.5 Передняя дуга и ее распорки

- Одна из основных дуг гоночной машины обязана быть изготовлена из трубы, материал можно использовать только тот, который указан в таблице 1.1. Дуга не может состоять из нескольких сварных труб, то есть она должна быть сплошной;

- передняя дуга обязана соединить два противоположенных нижних участка рамы. Она должна начать подниматься с одной стороны, пройти через верх и опуститься с другой, абсолютно противоположенной стороны;

- при верном закреплении вспомогательных элементов, переднюю дугу можно изготовить из нескольких труб;

- как минимум одна из поверхностей передней дуги должна быть выше при любом положении руля;
- расстояние от руля до передней дуги не должно превышать 250 мм;
- передняя дуга не должна иметь угол наклона свыше 20 градусов, в любую сторону. При наклоне дуги более чем на 10 градусов – необходимы дополнительные опорные элементы, поддерживающие дугу со стороны ее наклона;

Подробнее о распорках:

- распорки передней дуги должны быть симметричны и находиться с обеих сторон болида;
- распорка не может быть ниже 50,8 мм, считая от самого верхнего элемента дуги;
- распорки обязательно должны быть прямыми, никакие изгибы не допускаются;
- данные распорки необходимо для защиты ног водителя, находящегося внутри автомобиля. Распорки должны начинаться на передней дуге и заканчиваться на передней перегородке;

#### 1.2.6 Механические крепления распорок

- любое несварное соединение на каждом конце должно быть присоединено внахлест в двойные проушины, как показано на Рисунке 6, или встык с помощью втулки, как показано на рисунке 1.3.
- используемые резьбовые крепежные элементы считаются важными крепежными деталями и должны соответствовать требованиям регламента.
- сферические окончания труб запрещены.
- все соединения в двойные проушины, должны быть прикрыты металлической пластинкой (см. рис. 1.3)

– при соединении в двойные проушины, каждая проушина должна быть сделана из стали толщиной не менее 4.5мм, а болты и шпильки 10 мм класса 8:8 минимум. Отверстия в проушинах и распорках должны точно совпадать и плотно закрепляться с помощью шпилек или болтов.

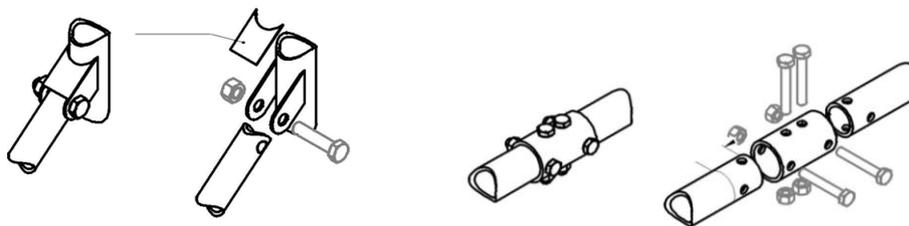


Рисунок 1.3 – а) крепление внахлест б) крепление встык

### 1.2.7 Передняя перегородка и ее опоры

– Руководствуясь регламентом, трубы перегородки должны быть замкнутыми и стальными;

– Перед передней перегородкой не должно располагаться никаких хрупких объектов, например, аккумуляторов, тормозного цилиндра и так далее;

– Чтобы определить, где должна располагаться передняя перегородка, необходимо посадить водителя в машину и поставите его ноги на педали, но не нажимать на них. Ноги должны оказаться сзади передней перегородки, то есть не входить в ее плоскость. При регулируемых педалях - их необходимо установить в максимально отдаленное положение.

Подробнее об опорах перегородки:

– данная перегородка должна быть очень прочно зафиксирована в раме болида;

– Опора передней перегородки на переднюю дугу должно осуществлять с помощью как минимум 3 элементов: нижнего, диагонального и верхнего. В итоге должна сформировать треугольная структура: нижний элемент закрепляется в основании перегородки и передней дуги; верхний - на расстоянии не более 50 мм от верха передней перегородки и в диапазоне от -

50 до 100 мм, считая от точки верхней боковой конструкции. В ином случае - необходима треугольная распорка для переноса и передачи нагрузки.

Также при проектировании данного элемента необходимо учитывать, что на переднюю перегородку по правилам соревнований должен быть закреплен аттенюатор – элемент, поглощающий удар, который может быть изготовлен по стандартному образцу или же команда самостоятельно может внести в него какие-либо изменения, но подтвердив их надежность всеми необходимыми тестами:

- Установлен спереди передней перегородки;
- Как минимум 100 мм в высоту и 200 мм в ширину, выходящий на расстояние как минимум 200 мм от передней перегородки;
- Таким, чтобы он не мог проникнуть в переднюю перегородку в случае удара;
- Надежно напрямую прикреплен к анти-ударной панели;
- Никаких некомпозитных деталей;
- Не может быть шире или выше, чем AIP;

#### 1.2.8 Боковая конструкция

Требования к боковой конструкции рамы, изготовленной из труб:

- данная конструкция состоит как минимум из трех элементов, которые располагаются по бокам от водителя, занимающего положение готовое к гонке (рисунок 1.4);

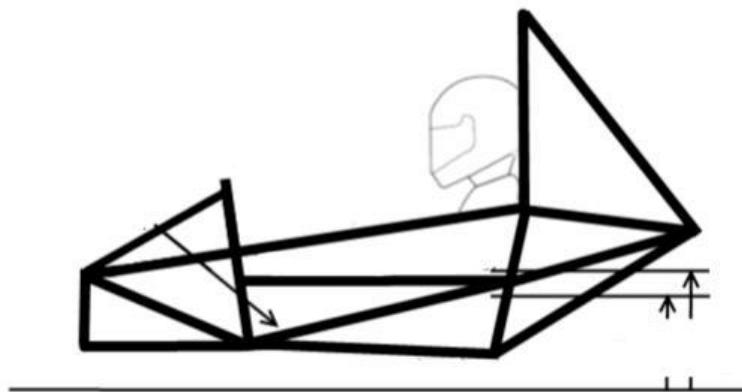


Рисунок 1.4 – Боковая структура трубчатой рамы

В данном примере боковая структура состоит из верхнего, нижнего и диагонального элементов. Самая верхняя труба не является элементом боковой конструкции - это распорка передней дуги.

- данная структура должна изготавливаться из материалов, указанных в таблице 1.1;

- данная структура может быть сделана из нескольких секций, то есть иметь более 3 труб, но в этом случае необходимо верно располагать косынки;

- верхний элемент боковой структуры соединяет основные дуги и находится на расстоянии 300-350 мм над землей. Необходимо также учесть вес водителя, находящегося в автомобиле в полной экипировке (75 кг.). Данный элемент также может выступать в виде верхнего лонжерона, если будет соответствовать всем необходимым требованиям;

- нижний элемент боковой проекции соединяет нижние точки основных дуг, а также может быть использован в качестве нижнего лонжерона при соответствии всем необходимым требованиям;

- диагональный элемент проведен из точки соприкосновения верхнего элемента с главной дугой до точки соприкосновения нижнего элемента с передней дугой.

### 1.2.9 Кокпит

- Для того, чтобы убедиться, что доступ в кокпит, обеспечиваемый проемом, достаточного размера, через проем кокпита должен быть протаснен шаблон, показанный на рисунке 11. Шаблон можно двигать вперед и назад;

- Если боковая ударная структура не сделана из труб, шаблон должен помещаться до 320мм выше нижней точки шасси между передней и основной дугой. Руль, рулевая колонка, сиденье и обивка могут быть демонтированы;

- Другие детали могут быть демонтированы только в том случае, если они объединены с рулем;

- У кокпита должно быть свободное проходное сечение достаточное для шаблона, изображенного на рисунке 1.5. Шаблон должен проходить от задней части передней дуги до точки, отдаленной назад на 100 мм от задней поверхности педали, находящейся в нерабочем положении. Шаблон можно перемещать вверх и вниз. Если педали регулируемые, то они должны быть установлены в наиболее переднее положение;
- Руль и другие детали могут быть сняты без использования инструментов, пока водитель сидит для того, чтобы шаблон поместился;
- Ступни и ноги водителя должны полностью находиться в основной структуре, когда он сидит и нажимает на педали. Его ступни и ноги не должны быть видны за пределами структуры.

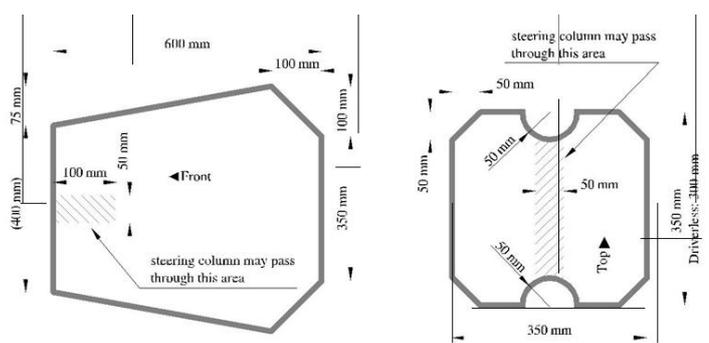


Рисунок 1.5 – Шаблон для проверки кокпита

### 1.3 Заполнение SES&DSS

SES – является одним из основных документов для заполнения до начала соревнований. Судьи обязаны подтвердить SES для дальнейшего участия в соревнованиях. Простыми словами – это документ, доказывающий соответствие рамной конструкции требованиям регламента и подтверждающий, что раму не скрутит во время ускорения или же поворота автомобиля во время гонки. В данном документе также указываются отверстия, просверленные в основной структуре за исключением отверстий для технической инспекции.



3. Лист с указанием материалов для каждого вида трубы. В нашем случае – основная конструкция состояла из 4 разных труб – соответственно лист содержал в себе таблицу из 4 строк (рисунок 1.8).

**Material Data Sheet**

Material Spreadsheet Code	Steel	Aluminium 1	Aluminium 2	Composite 1	Other 1	Other 2	Other 3	Other 4	Other 5	Composite AIP
Material name	Steel	Aluminium 1	Aluminium 2	T3 3D Laminate	Your Mat 1	Your Mat 2	Your Mat 3	Your Mat 4	Your Mat 5	Composite AIP
Youngs Modulus, E	2.00E+11	7.00E+10	7.00E+10	0.00E+00	1.00E+00	2.00E+00	3.00E+00	4.00E+00	5.00E+00	0.00E+00
Yield strength, Pa	3.05E+08	1.00E+00	2.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	2.00E+00	3.00E+00	4.00E+00	5.00E+00	0.00E+00
UTS, Pa	3.65E+08	1.00E+00	2.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	2.00E+00	3.00E+00	4.00E+00	5.00E+00	0.00E+00
Yield strength welded, Pa	1.80E+08	1.00E+00	2.00E+00	N/A	1.00E+00	2.00E+00	3.00E+00	4.00E+00	5.00E+00	N/A
UTS welded, Pa	3.00E+08	1.00E+00	2.00E+00	N/A	1.00E+00	2.00E+00	3.00E+00	4.00E+00	5.00E+00	N/A
UTS shear, Pa	2.19E+08	1.00E+00	2.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	2.00E+00	3.00E+00	4.00E+00	5.00E+00	0.00E+00

Steel properties based on SAE 1010 and are given in Rule T3.4.1 Note 4. Per rule T3.6 all steels are treated equally and are to use the above properties. Results from extra physical test required by T3.31.3 should be entered in the "Other x" materials column as required.

If alternative joint tests to enable lower minimum wall thicknesses have been used then indicate these used by selecting "YES" in the table below. Combinations other than those presented in the table are not allowed. Provide the steel and tube has equivalent EI (stiffness) and CSA (strength)

Note: for tube combinations with large outer diameters it is acceptable to increase the offset between the tube centre-lines in your test samples.

BASELINE JOINT		ALTERNATIVE JOINT		TESTED?	
25.4mm x 2.4mm to	25.4mm x 1.2mm	25.4mm x 2.4mm to	34.9mm x 0.9mm	NO	Enter your test results in this tab
25.4mm x 1.6mm to	25.4mm x 1.2mm	25.4mm x 1.6mm to	34.9mm x 0.9mm	NO	Enter your test results in this tab
25.4mm x 1.2mm to	25.4mm x 1.2mm	25.4mm x 1.2mm to	34.9mm x 0.9mm	NO	Enter your test results in this tab
25.4mm x 1.2mm to	25.4mm x 1.2mm	34.9mm x 0.9mm to	34.9mm x 0.9mm	NO	Enter your test results in this tab
				NO	Tab to copy for other combinations
				NO	

Рисунок 1.8 – Заполнения листа с материалом

4. Далее идет несколько страниц с заполнением данных по каждому узлу рамной конструкции: главная дуга, передняя дуга, передняя перегородка, боковая конструкция и т.д. Помимо внесения данных для автоматического подсчета – необходимо представить фотографию с сечением труб и указанием их диаметра, пример изображен на рисунке 1.9.

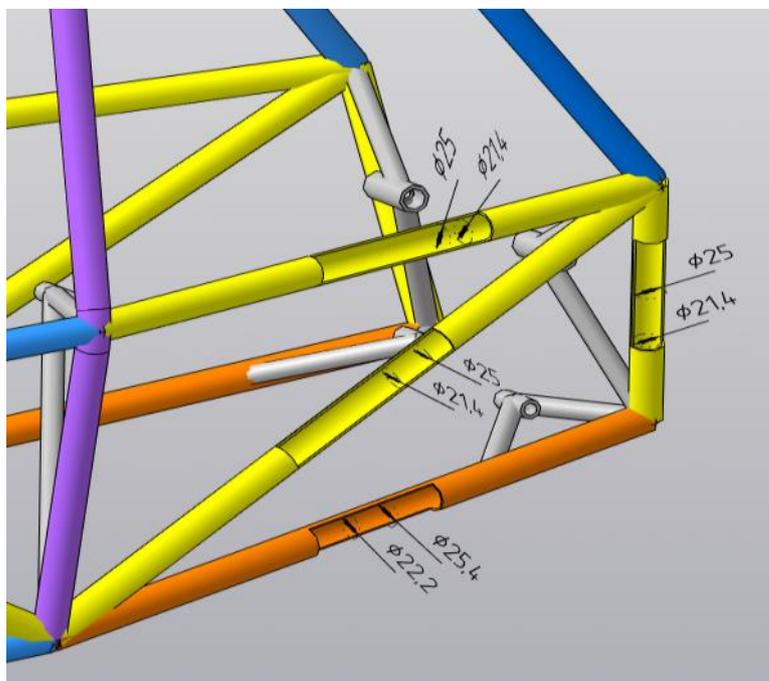


Рисунок 1.9 – Пример сечения труб

### 1.3.2 Заполнение документа SES (Structural Equivalency Spreadsheet), согласно требованиям SAE

Шаблон документа по требованиям SAE, начиная с 2019 года, отличается от шаблона по требованиям Rules. Немного отличаются и предоставляемые данные в документе и их форма.

Первое, что необходимо заполнить в данном документе, общие данные о команде, включая название университета, номер машины, контактные данные руководителя и капитана команды. Кроме того в документе представлен краткий свод правил, упрощающий заполнение самого файла. Так, в документе не должно остаться пустых темно-синих полей для фотографий; голубой цвет символизирует, что введенные данные соответствуют требованиям регламента, а желтый цвет говорит о необходимости заполнения дополнительных строк или предоставления дополнительных фотографий.

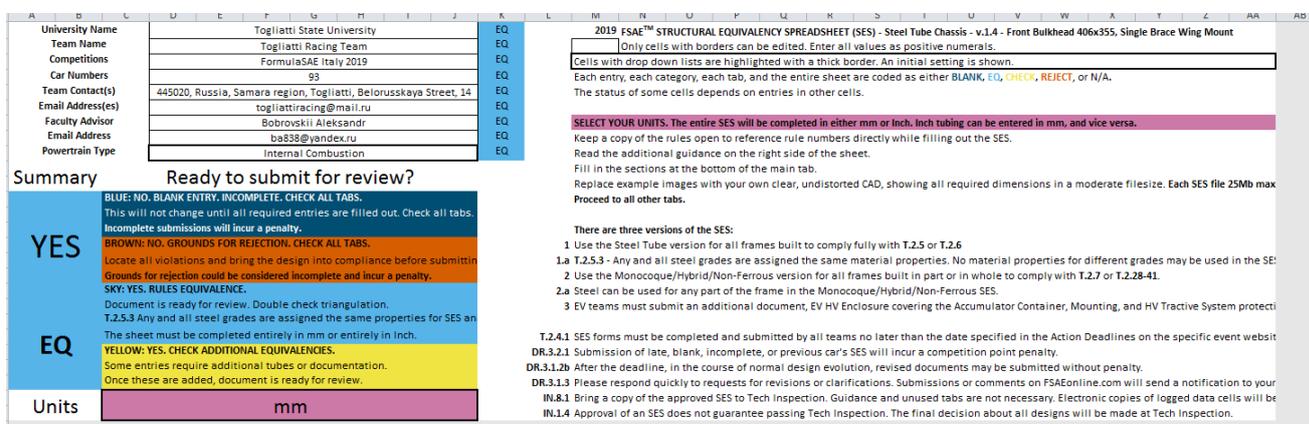


Рисунок 1.10 – Общие данные и основные правила заполнения

Также как и в предыдущем варианте, одной из необходимых фотографий является общий вид рамы, на котором цветом необходимо выделить трубы разной толщины. Как видно на рисунке ниже в концепции рамы нового болида используются 4 разных варианта труб.

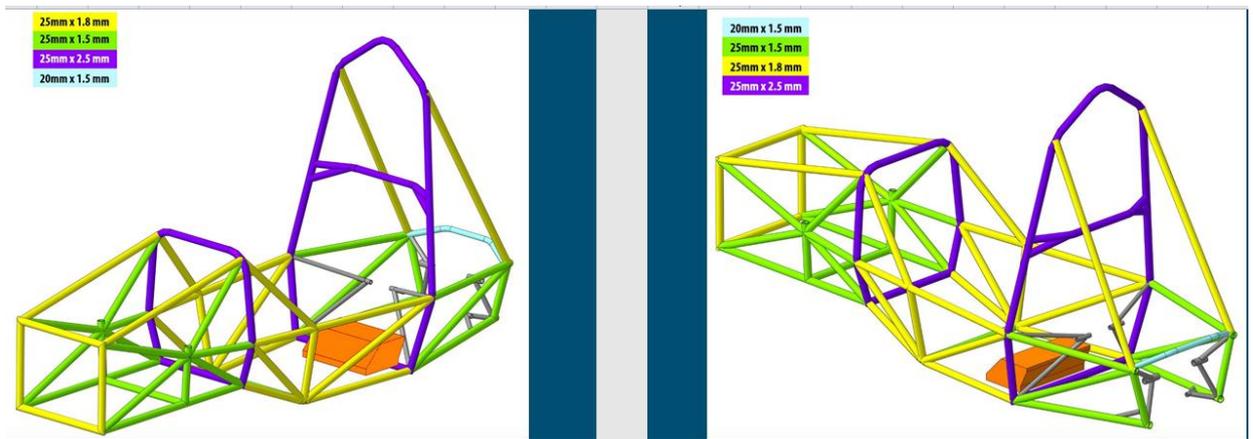


Рисунок 1.11 – Общий вид рамы с указанием толщин труб

После идет заполнение характеристик каждого элемента рамы, первыми из которых являются передняя перегородка с защитной пластиной и передняя дуга. В случае с пластиной перегородки необходимо указать, каким способом пластина крепится к перегородке и из какого материала она изготовлена. Далее для передней перегородки и передней дуги указывает вид профиля трубы, ее диаметр и толщина стенки. Для передней дуги дополнительно необходимо указать угол отклонения от вертикали и расстояние до руля. После заполнения всех характеристик необходимо также добавить фотографии данных элементов с указанием всех параметров, перечисленных выше.

EQ	Anti-Intrusion and Front Bulkhead	EQ	Front Hoop (FH)
T.2.22.1	Anti-Intrusion Plate (AI) material: <input type="text" value="Steel"/> EQ el: 1.5mm (0.060in), Aluminum: 4.0mm (.157in): <input type="text" value="1.5"/> mm EQ		T.2.12.2 - The FH runs from the lowest frame member on each side. T.2.12.3 - The FH may be multiple pieces. Side view bends must be braced per T.2.8.
T.2.39	- For AI plates made of any material besides steel or aluminum, either the IA test or 3-Point and Shear tests are required. In the latter case, the 3-Point and Shear tabs		EQ T.2.12 Front Hoop thinnest wall tube used: <input type="text" value="Round"/> EQ Wall thickness: <input type="text" value="2.5"/> mm EQ Outer Diameter (OD): <input type="text" value="25"/> mm EQ
T.2.22.2	AI Attachment: <input type="text" value="Welded"/> EQ AI plate must at least reach the centerline of Front Bulkhead tubes EQ At least half the perimeter must be welded: <input type="text" value="100"/> % EQ Shortest weld >= 25mm (1in): <input type="text" value="1362"/> mm EQ		T.2.5.1 - minimum Front Hoop tube size: Round: 25mm x 2.5mm (1in x .095in) T.2.6.3 - For alternate T.2.6 Front Hoop wall thicknesses as low as 2.0mm (.079in), the outer diameter must be increased to maintain the cross sectional area.
T.2.19	Front Bulkhead (FB) thinnest wall tube used: <input type="text" value="Round"/> EQ Wall thickness: <input type="text" value="1.8"/> mm EQ Outer Diameter (OD): <input type="text" value="25"/> mm EQ		EQ T.2.12.4 Turned Steering Wheel minimum below FH top: <input type="text" value="3"/> mm EQ
T.2.5.1 - minimum Front Bulkhead tube size: Round: 25mm x 1.75mm (1in x .065in) Square: 25mm x 25mm x 1.2mm (1in x 1in x .047in) T.2.6.3 - For alternate T.2.6 Front Bulkhead wall thicknesses as low as 1.2mm (.047in), the outer diameter must be increased to maintain the cross sectional area.			EQ T.2.12.5 FH to Steering Wheel gap <=250mm (9.8in) <input type="text" value="141"/> mm EQ
T.2.23.4	Impact Attenuator (IA) used: <input type="text" value="Standard"/> EQ Longest FB dimension (Height or Width): <input type="text" value="350"/> mm EQ Shortest FB dimension (Height or Width): <input type="text" value="300"/> mm EQ Optional Front Bulkhead Diagonal: <input type="text" value="Round"/> EQ Diagonal wall thickness: <input type="text"/> mm N/A Outer Diameter (OD): <input type="text"/> mm N/A No diagonal or X-brace required.		EQ T.2.12.6 Maximum Front Hoop side angle <=20 degrees: <input type="text" value="1.19"/> degrees EQ EQ T.2.14.5 rearward lean above Upper SIS <= 10, or braced: <input type="text" value="1.19"/> degrees EQ Rearward Front Hoop Brace is not required.

Рисунок 1.12 – Данные по передней перегородке и передней дуге

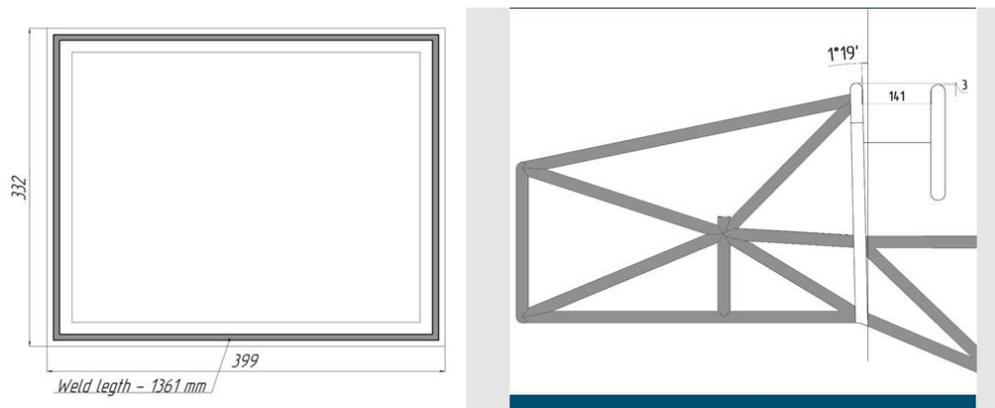


Рисунок 1.13 – Фотография передней перегородки и передней дуги

Следующими элементами для описания являются опоры передней перегородки, распорки передней дуги и боковая защитная структура. На фотографиях нижний элемент конструкции выделен желтым цветом, а верхний – голубым.

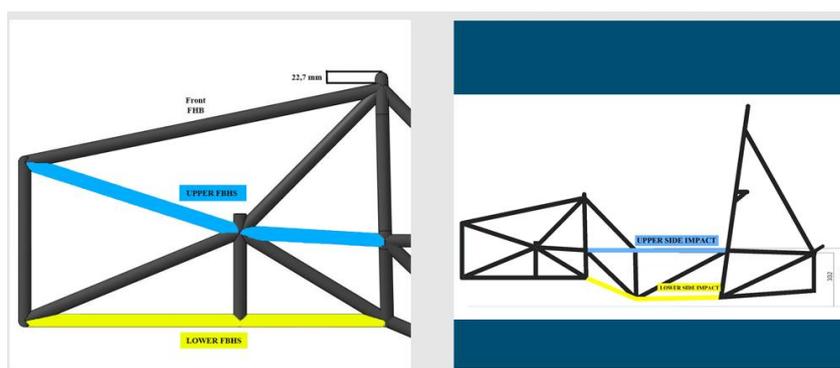


Рисунок 1.14 – Фотография распорок и боковой защитной структуры

У конфигурации опор передней перегородки существует три типа, которые в документе обозначены под буквами А, В и С. Возможные варианты расположения данной конструкции представлены на рисунке ниже.

А. К первому типу относится вариант, когда верхний элемент данной конструкции начинается сверху передней перегородке и соединяется с верхним элементом боковой защитной структуры. А нижний элемент начинается с низу передней перегородки и соединяется с нижним элементом боковой защитной структуры.

В. Ко второму типу относится вариант, когда верхний элемент данной конструкции начинается сверху передней перегородки и соединяется с

передней дугой, выше боковой защитной структуры, в области задних распорок передней дуги. А нижний элемент начинается с низу передней перегородки и соединяется с нижним элементом боковой защитной структуры.

С. К 3 типу относится вариант, когда верхний элемент данной конструкции начинается сверху передней перегородки и соединяется с передней дугой, выше боковой защитной структуры, в области задних распорок передней дуги. А нижний элемент состоит из двух составляющих, одна из которых приходит к верхнему элементу боковой защитной структуры, в другая – к нижнему элементу.

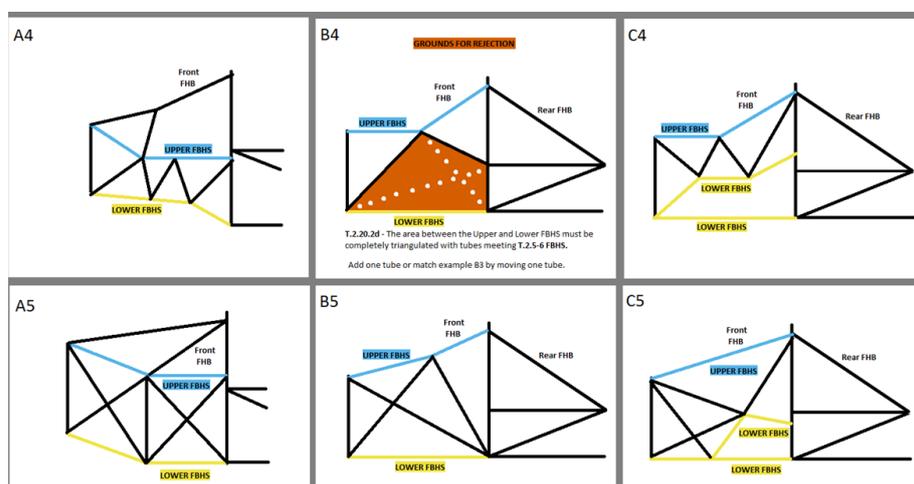


Рисунок 1.15 – Примеры конфигураций

Далее для каждого элемента конструкции заполняются общие сведения: материал, профиль трубы, диаметр.

EQ		Side Impact Structure (SIS)	
T.2.26.4 - Designate the Upper SIS along its entire length.			
T.2.26.5 - Lower SIS on each side from the bottom of the FH to the bottom of the MH. Designate the Lower SIS along its entire length.			
T.2.26.6 - The area between the upper and lower SIS must be completely triangulated with tubes meeting T.2.5-6 SIS.			
EQ		EQ	
T.2.26.4	West point of Upper SIS at ride height $\geq 300$ mm:	302 mm	EQ
	West point of Upper SIS at ride height $\leq 350$ mm:	327 mm	EQ
EQ		EQ	
T.2.26	Upper SIS geometry:	Straight	EQ
	Upper SIS thinnest wall tube used:	Round	EQ
	Wall thickness:	1,8 mm	EQ
	Outer Diameter (OD):	25 mm	EQ
EQ		EQ	
T.2.26	Lower and Diagonal SIS thinnest wall tube used:	Round	EQ
	Wall thickness:	1,8 mm	EQ
	Outer Diameter (OD):	25 mm	EQ
T.2.5.1 - minimum Side Impact Structure tube size: Round: 25mm x 1.75mm (1in x .065in) Square: 25mm x 25mm x 1.2mm (1in x 1in x .047in) <b>Bent Upper SIS: 35mm x 1.2mm (1.375in x .047in)</b>			
T.2.6.3 - For alternate T.2.6 Front Bulkhead wall thicknesses as low as 1.2mm (.047in), the outer diameter must be increased to maintain the cross sectional area.			
EQ		EQ	
T.2.20	Front Bulkhead Support (FBHS) thinnest wall tube:	Round	EQ
	Wall thickness:	1,5 mm	EQ
	Outer Diameter (OD):	25 mm	EQ
T.2.5.1 - minimum FBHS tube size: Round: 25mm x 1.5mm -or- 26mm x 1.2mm (1in x .047in) Square: 25mm x 25mm x 1.2mm (1in x 1in x .047in)			
EQ		EQ	
T.2.20.2a	Top of FB to Upper FBHS tube, 50mm vertical limit:	0 mm	EQ
EQ		EQ	
T.2.20.2ab	FBHS configuration:	A	EQ
	Top of Upper FBHS tube relative to top of Upper SIS tube:	Below	EQ
	Vertical limit 50mm below:	0 mm	EQ
Rearward Front Hoop Brace is not required.			
EQ		EQ	
T.2.14.4	Top of FH to top of FHB tube, 50mm vertical limit:	22,7 mm	EQ
EQ		EQ	
T.2.14	Forward Front Hoop Brace thinnest wall tube:	Round	EQ
	Wall thickness:	1,8 mm	EQ
	Outer Diameter (OD):	25 mm	EQ
Rearward Front Hoop Brace is not required.			
EQ		EQ	
T.2.20.2b	Rear Front Bulkhead Support thinnest wall tube:	Round	N/A
	Wall thickness:	mm	N/A
	Outer Diameter (OD):	mm	N/A
T.2.20.2b - minimum rearward Front Bulkhead Support tube size: Round: 25mm x 1.5mm (1in x .047in) Square: 25mm x 25mm x 1.2mm (1in x 1in x .047in)			
T.2.14.5 - minimum rearward Front Hoop Brace tube size:			

Рисунок 1.16 – Заполнение данных по боковой защитной структуре и распоркам передней дуги

Следующим важным элементом рамы является основная дуга и ее распорки с опорами.

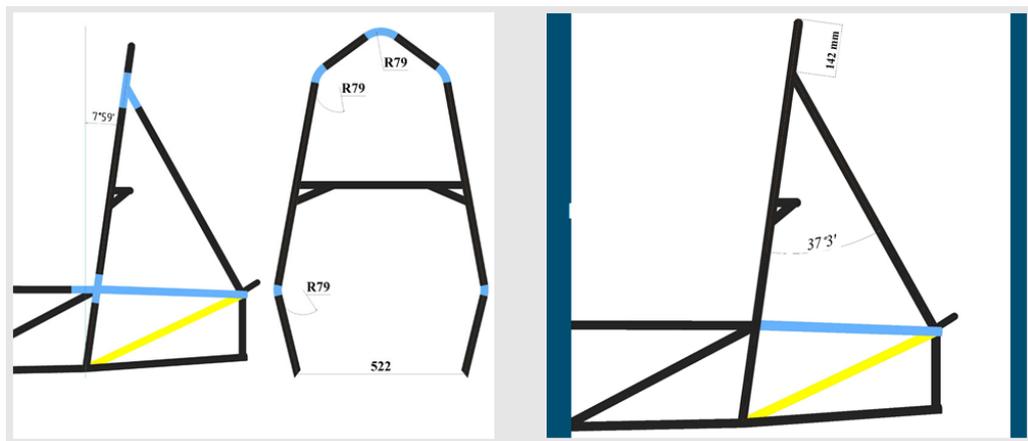


Рисунок 1.17 – Основная дуга и ее распорки с опорами

В данном разделе указывается радиусгиба основной дуги, ее наклон относительно вертикали, а также выделяются цветом верхний и нижний элементы опор распорок основной дуги.

EQ			
T.2.11	Main Hoop thinnest wall tube used:	Round	EQ
	Wall thickness:	2,5 mm	EQ
	Outer Diameter (OD):	25 mm	EQ
EQ			
T.4.5	Shoulder Harness Bar Geometry:	Straight	EQ
	Shoulder Harness Bar thinnest wall tube used:	Round	EQ
	Wall thickness:	2,5 mm	EQ
	Outer Diameter (OD):	25 mm	EQ
Shoulder Harness Bar does not require braces.			
T.2.5.1 - minimum Main Hoop and Shoulder Harness Bar tube size: Round: 25mm x 2.5mm (1in x .095in)			
T.2.6.3 - For alternate T.2.6 Main Hoop and Shoulder Harness Bar wall thicknesses as low as 2.0mm (.079in), the outer diameter must be increased to maintain the cross			
Shoulder Harness Bar does not require braces.			
EQ			
T.4.5.3b	Brace angle to plane of SH side view >= 30:		N/A
T.2.8.1 - The plane of a bent tube is defined by the straight axes on either side of the			
Shoulder Harness Bar does not require braces.			
EQ			
T.4.5	Shoulder Harness Brace:	Round	N/A
	Wall thickness:		N/A
	Outer Diameter (OD):		N/A
T.2.5.1 - minimum Shoulder Harness Brace tube size: Round: 25mm x 1.5mm -or- 26mm x 1.2mm (1in x .047in)			

Designate the Lower MHBS along its entire length.  
T.2.13.7, T.2.10.2 - The area between the Upper and Lower MHBS must be completely triangulated with tubes meeting T.2.5-6 FBHS.  
T.2.13.7a - A Shoulder Harness Bar and/or SH Brace may be used as part of the MHBS.  
T.2.13.9, T.2.10.2 - Any connecting tube will be considered the start of the Upper and Lower

T.2.11.3b - Main Hoop side view bends above Upper SIS must be braced to an MHBS nc

Main Hoop requires braces that run rearward.			
EQ			
T.2.13.3	Main Hoop brace direction:	Rearward	EQ
T.2.13.4	Angle between MH and MHB >=30 degrees:	37,3 degrees	EQ

EQ			
T.2.13.4	Top of MH of MHB tube, 160mm vertical limit:	140 mm	EQ

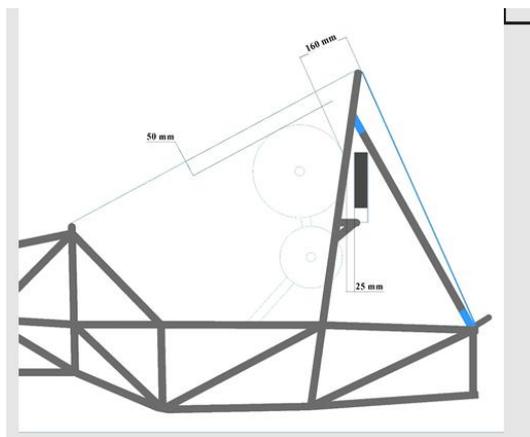
EQ			
T.2.13	Main Hoop Braces thinnest wall tube:	Round	EQ
	Wall thickness:	1,8 mm	EQ
	Outer Diameter (OD):	25 mm	EQ

T.2.5.1 - minimum Main Hoop Brace tube size:  
Round: 25mm x 1.75mm (1in x .065in)  
Square: 25mm x 25mm x 1.2mm (1in x 1in x .047in)  
T.2.6.3 - For alternate T.2.6 Main Hoop Brace wall thicknesses as low as 1.2mm (.047in), the outer diameter must be increased to maintain the cross sectional area.

EQ			
T.2.13	Main Hoop Brace Support (MBHS) thinnest wall:	Round	EQ
	Wall thickness:	1,5 mm	EQ
	Outer Diameter (OD):	25 mm	EQ

Рисунок 1.18 – Данные по главной дуге и ее распоркам

Последним элементом для заполнения является соответствие конструкции на некоторые правила регламента, касающиеся крепления заднего антикрыла, расстояние от шлема до трубы, подголовника.



considered the start of the Upper and Lower MHBS.  
T.2.13.9 - Place rear wing mounts at nodes, or away from the MHB.

EQ			
T.2.10.3a	Helmet >=50mm (2in) below Roll Hoop plane:	50 mm	EQ

EQ			
T.2.10.3bc	Main Hoop Braces protecting Helmet:	Rearward	EQ
T.2.10.3bc	Helmet >=50mm (2in) below Hoop/Brace plane:	160 mm	EQ

EQ			
T.2.2.1	Head Restraint >=0 from ground in any rollover:	243 mm	EQ

Note: A straight tube between the MHB tubes as part of the Head Restraint does not form part of the rollover envelope. A Head Restraint protruding behind the MHB tubes risks becoming part of the rollover envelope, and is strongly discouraged.

EQ			
T.2.13.9	ear Wing chassis mounting locations:	Wing mounted to MHB nodes	EQ

Рисунок 1.19 – Соответствие регламенту

### 1.3.3 Заполнение документа DSS (Design Spec Sheet)

Данный тип документа является обязательным для заполнения перед участием в соревнованиях. Обычно DSS необходимо отправить судьям соревнований примерно за 2-3 месяца до начала самого этапа. В данном документе описываются все основные характеристики всех узлов автомобиля, один из которых является рама.

В перечень необходимых строк для заполнения входят:

- Тип рамной конструкции,
- Материал, используемый для изготовления рамы,
- Тип соединений труб между собой,
- Масса покрашенной рамы с учетом всех необходимых кронштейнов,
- Жесткость на кручение: целевая и фактическая,
- Метод расчета на жесткость,
- Конфигурация аттенюатора,
- Размеры аттенюатора,
- Поглощение энергии аттенюатором (в случае своего изготовленного образца).

67	<b>Frame</b>	<b>Units</b>			
68	Frame Construction		Steel Spaceframe		
69	Material		Steel AISI 1020		
70	Joining method and material		Semi-auto weld method		
71	Bare frame mass with brackets & paint	kg	Target: 25,0	Physical Test: 26,0	
72	Torsional stiffness	N-m/deg	Target: 2500-3000	Simulated: 2674	Physical Test: N/A
73	Torsional stiffness validation method		analysis torsional stiffness in ANSYS		
74	Impact Attenuator configuration		Standart IA IMPAXX 700		
75	Impact Attenuator dimensions	mm	Width: 350	Height: 300	Depth: 254
76	Impact Attenuator energy capacity	kJ	Energy: N/A	Method: N/A	

Рисунок 1.20 – пример заполнения раздела в DSS

## 2 Существующие варианты конструкций

### 2.1 Анализ существующих рамных конструкций

В рамках соревнований Формула Студент есть два типа рамных конструкций: пространственная рамная конструкция и монокок. Разница между конструкциями заключается в том, что у монокока вместо передней пространственной рамной конструкции использует корпус из композитных материалов. К материалам изготовления монокока также предъявляется ряд требований, описанных в регламенте соревнований. Многие успешные команды (в основном европейские) зачастую предпочитают использовать именно конструкцию монокок, так как это дает значительное снижения веса и увеличение жесткости, но несет за собой никаких убытков в прочности и жесткости конструкции. Но стоит отметить, что данный вариант является достаточно дорогостоящим и сложным в плане техники изготовления, именно поэтому большинство команд среднего класса предпочитает использование обычной пространственной рамной конструкции.



Рисунок 2.1 – Пример разработки монокока

Хочется еще раз отметить, что одно из самых важных условий в создании рамной конструкции для формулы студент – прослеживание триангуляции во всех элементах рамы. В рамной конструкции не должно

наблюдаться многоугольников (кроме треугольников), за исключением конструкции передней перегородки. Ниже представлены несколько вариантов неправильной конструкции рамы.

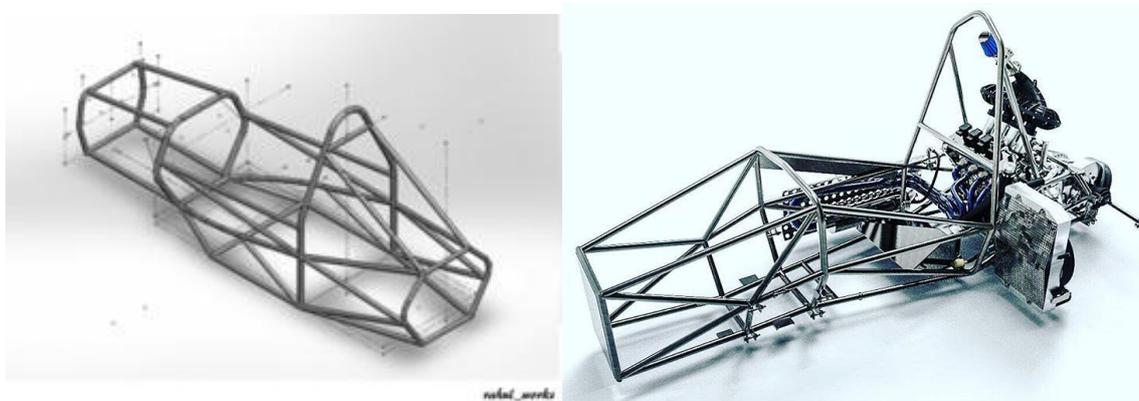


Рисунок 2.2 – Некорректные рамные конструкции

Испанская команда ETSEIB Motorsport в своей конструкции рамы использовала дополнительную секцию между передней перегородкой и передней дугой для усиления конструкции, так как у передней дуги присутствует достаточно большой наклон. Кроме того, наличие данной секции регламентируется правилами, так как элемент конструкции должен состоять как минимум из 5 труб, кроме того данный элемент может использоваться как дополнительное крепление для рулевой системы. Кроме того, за счет внедрения данного элемента передние распорки состоят из двух труб, первые из которых прямые, а последующие скрещиваются между собой, освобождая пространство для размещения амортизаторов. Данное решение позволяет амортизаторам находиться внутри рамы и не мешать при компоновке зоны кокпита. В целом, хочется отметить, что данная конструкция рамы является не совсем целесообразной, так как внедрение дополнительной секции между передней перегородкой и передней дугой существенно увеличивает вес конструкции, влияя на ее маневренность.

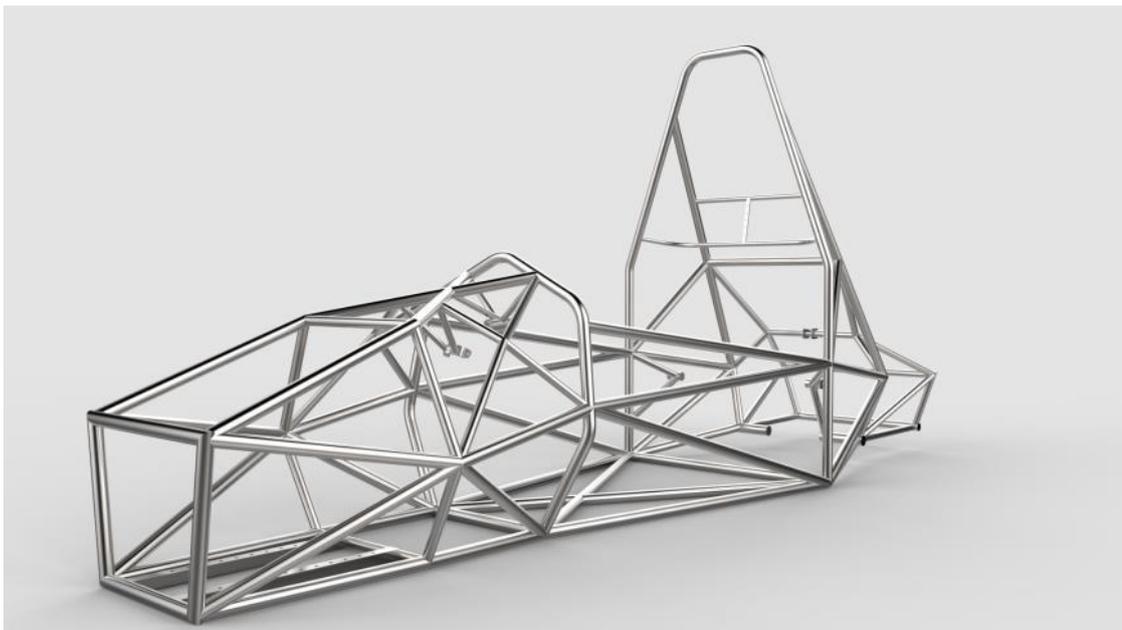


Рисунок 2.3 – Рамная конструкция команды ETSEIB Motorsport (Барселона, Испания)

Следующая рассматриваемая конструкция принадлежит одной из немецких команд HorsePower Hannover. В данной конструкции также прослеживается наличие дополнительной секции между передней перегородкой и передней дугой, но в отличие от предыдущего варианта данная команда использует передние распорки, полностью состоящие из прямых труб, причем они изготовлены из цельной трубы. Данная дополнительная секция также используется для крепления элементов рулевой системы и увеличения жесткости и соответствия всей конструкции требованиям регламента. Кроме того в передней перегородке используются дополнительные элементы в виде перекрещивающихся труб. Данное решение необходимо в силу разницы размеров передней перегородки и размеров аттенуатора, используемого командой.

Следующий рассматриваемый элемент данной конструкции – задняя часть рамы, изготовленная специально для закрепления двигателя. Так как команда решила не использовать двигатель, как конечный элемент рамы, что разрешено требованиями регламента, они добавляют несколько дополнительных труб, включая заднюю перегородку с использованием одной диагональной распорки, что значительно увеличивает вес всей конструкции.

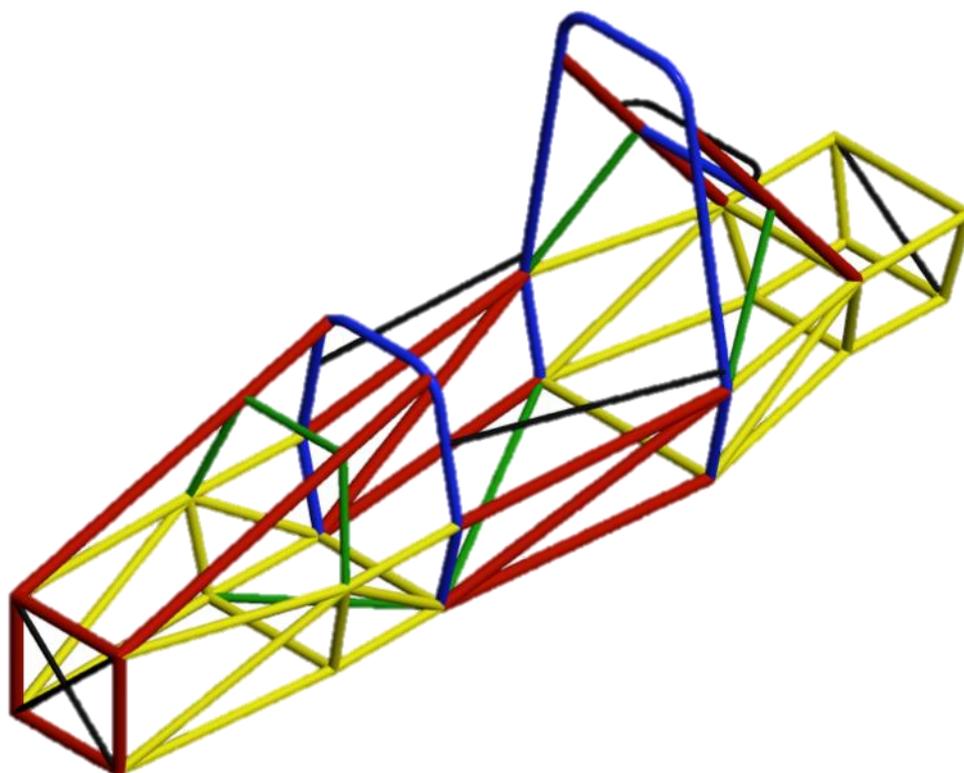


Рисунок 2.4 – Рамная конструкция команды HorsePower Hannover (Ганновер, Германия)

Еще одна рамная конструкция, принадлежащая венгерской команде Arrabona Racing Team. В данной конструкции, в отличие от предыдущих вариантов, отсутствует дополнительная секция, и передняя перегородка соединяется с передней дугой напрямую посредством передних распорок. Кроме того в данной конструкции расширена боковая защитная структура для более простого прохождения шаблона, установки сидения и большего объема пространства кокпита. Кроме того это решение позволяет увеличить длину подвески, что сделает ее более маневренной. Главная дуга в этом варианте очень сильно сужается кверху, что является не совсем удобным для размещения двигателя в раме, так как сверху получается очень небольшое расстояние между задними распорками, что затрудняет пронос двигателя, именно поэтому данное компоновочное решение ограничивает команду в выборе двигателя.



Рисунок 2.5 – Рамная конструкция команды Arrabona Racing Team (Дьер, Венгрия)

Следующая конструкция для рассмотрения принадлежит французской команде L'Écurie Piston Sport Auto. Хочется отметить, что данный вид конструкции наиболее приближен к варианту конструкции нашей команды. За исключением наличия дополнительной диагональной нижней трубы для крепления рулевой рейки и создания элементов триангуляции, что является необходимым условием для всех рамных конструкций и основным требованием регламента. Более того, в отличие от рамы нашей команды, где двигатель является ограничивающим элементом конструкции, данная команда использует для этого дополнительную трубу сзади, что влияет на общую массу конструкции.



Рисунок 2.6 – Рамная конструкция команды L'Écurie Piston Sport Auto (Лион, Франция)

Следующей рассматриваемой конструкцией является рама чешской команды UWB Racing team Pilsen. Данная команда также не используют дополнительных секций, напрямую соединяя переднюю перегородку и переднюю дугу, но в сравнении с предыдущими версиями они используют цельные передние распорки, перекрещивая их посередине, что дает им необходимое пространство для размещения амортизаторов и более удобной компоновки. Помимо этого в данной конструкции передняя дуга частично наклонена вперед, то есть основания передней дуги идет по прямой, после чего происходит необходимый для команды наклон для более удобного размещения рулевой системы. Данная команда, как одна из рассмотренных ранее, используют дополнительную рамную структуру для закрепления двигателя, что негативно влияет на массу конструкции и маневренность всего автомобиля. Но в отличие от всех примеров, рассмотренных ранее, задние распорки передней дуги в данной конструкции не уходят к началу главной дуги, а заканчиваются в начале боковой защитной структуры. Данное решение ничем не хуже по сравнению с предыдущим по всем

техническим и технологическим параметрам, но благоприятно сказывается на общем весе конструкции.



Рисунок 2.7 – Рамная конструкция команды UWB Racing team Pilsen (Пльзень, Чехия)

Одна из американских команд из города Хэнфорд в своей рамной конструкции использует переднюю перегородку, состоящую не из 4 труб, как у всех предыдущих команд ранее, а из 6, что значительно увеличивает вес всей конструкции и автомобиля в целом. В целом непонятно, почему команда пришла к такому решению, скорее всего это связано с компоновочными узлами автомобиля, находящимися в этой области (например, педалями) или же креплением аттенюатора. Также, хочется отметить достаточно большой наклон передней дуги, что повлекло за собой создание дополнительных передних распорок, что, опять таки, повлекло за собой увеличение веса всей конструкции.

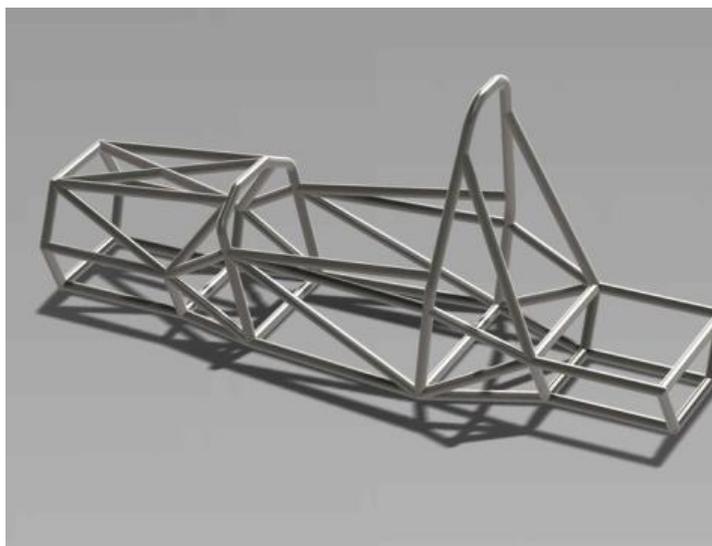


Рисунок 2.8 – Рамная конструкция команды из Хэнфорда (США)

Еще один вариант – рамная конструкция команды Kovinoelektra из Солина, Хорватия. В данном варианте конструкции также используется дополнительная секция между передней перегородкой и главной дугой, полностью дублирующая переднюю перегородку. Один из основных недостатков данной конструкции – слишком высоко расположенная задняя распорка передней дуги. Зачастую большинство команд пускает данную распорку либо по диагонали вниз, либо не доводит до главной дуги, но проводит также диагонально, соединяя с верхним элементом боковой защитной структуры.

Данная конструкция является непрактичной с точки зрения теста, проходящего по время технической инспекции, где водителю необходимо вылезти из автомобиля за 5 секунд. Кроме того такое расположение распорки влечет за собой дополнительные две трубы, которые будут обеспечивать триангуляцию и соединять ее с верхним элементом боковой защитной структуры.

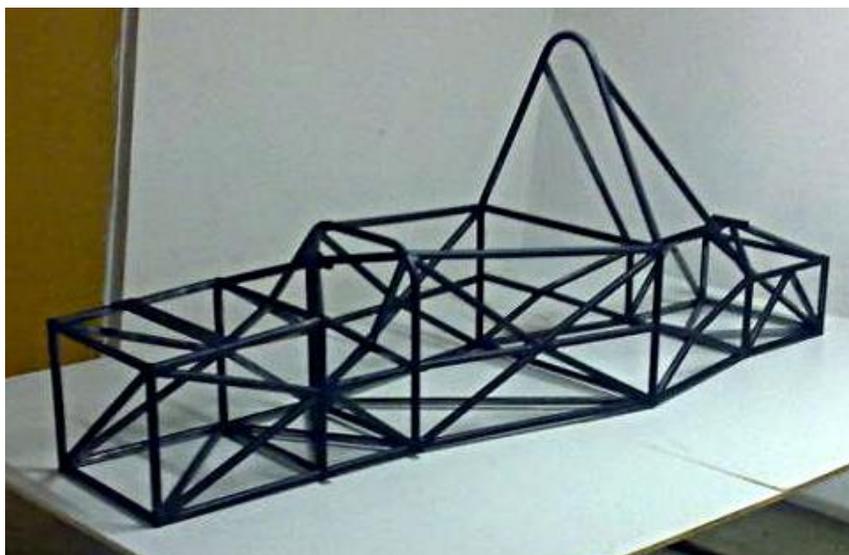


Рисунок 2.9 – Рамная конструкция команды Kovinoelektra (Солин, Хорватия)

Следующая рассматриваемая рамная конструкция принадлежит команде Hull University Formula Student из города Халл (Англия). В данной конструкции есть две промежуточные секции от передней перегородки до передней дуги, между этими перегородками закрепляются амортизаторы. Как и в прошлом варианте – слишком высокое расположение задней распорки передней дуги, что затрудняет быстрый выход водителя из автомобиля.

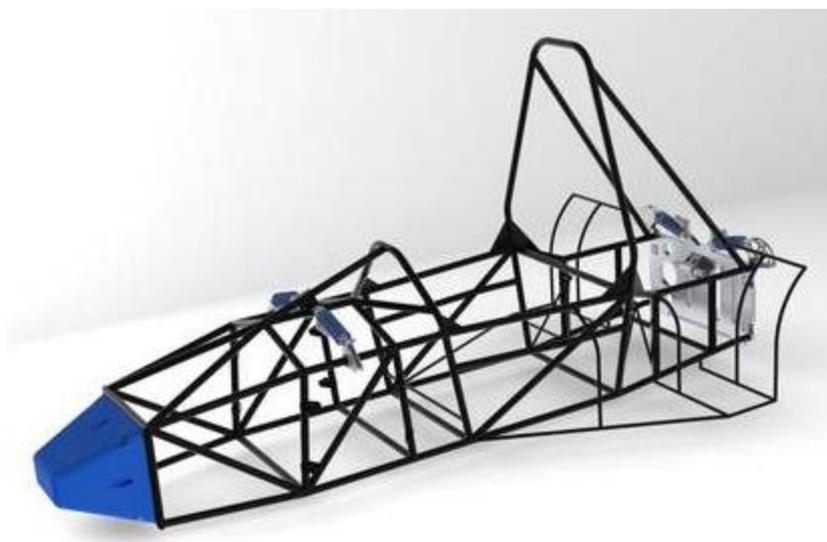


Рисунок 2.10 – Рамная конструкция команды HUFS (Халл, Англия)

## 2.2 Анализ предыдущих конструкций команды TRT

В период с 2014 по 2018 год команда Togliatti Racing Team построила 4 автомобиля, соответственно и 4 разных шасси. Как показывает динамика и анализ – масса шасси команды TRT с каждым годом становится все меньше и меньше. В сумме вес шасси, с учетом всех кронштейнов, был снижен на 30%. В 2014 году вес шасси White Shark составлял 44 кг, у последнего же болида, Black Scorpion (2018 год) вес шасси составил всего 28 кг. С чем же связана такая положительная динамика снижения веса (диаграмма 1.1).

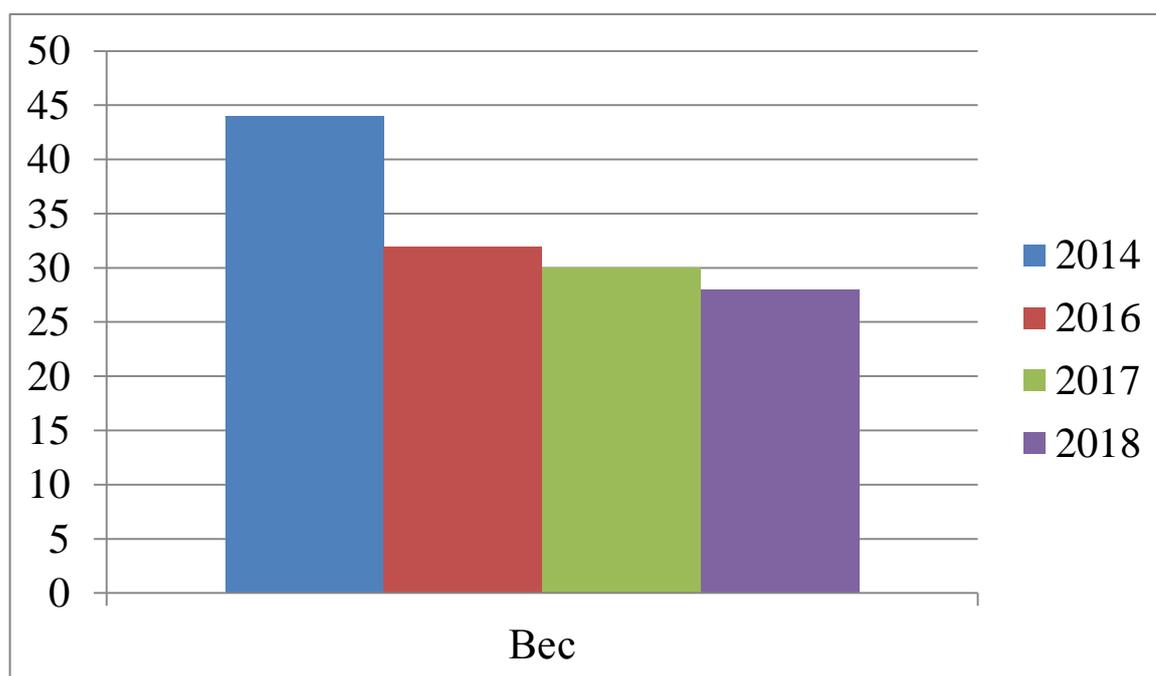


Диаграмма 1.1 – Снижение веса шасси

Внимательное изучение правил регламента, анализ рамных конструкций других команд и желание снизить вес всего гоночного автомобиля. Не смотря на то, что все 4 шасси автомобилей изготовлены из одного материала – сталь, вес у всех разный, потому что ранее – в 2014 году в раме использовались трубы с одинаковым диаметром и одинаковой толщиной стенки. В последней же версии шасси присутствуют четыре разновидности труб: диаметр у всех – 25, а вот толщина стенки варьируется от 1,6 до 2,5 мм.

Кроме того с каждым годом у команды все больше опыта в проектировании рамы – учась на своих ошибках и желая достигнуть лучших

результатов - меняется и сама концепция шасси. Так, например, в шасси 2014 года в основе передней перегородки лежал шестиугольник, состоящий из 6 труб, теперь же для изготовления передней перегородки используется только 4 трубы (рисунок 2.11-2.12). Кроме того, как можно заметить на рисунке 2.11, в конструкции рамы была внедрена дополнительная секция между передней перегородкой и передней дугой, что значительно увеличивало вес, а давало всего лишь небольшие преимущества, именно поэтому в раме 2015 года (рисунок 2.12) данная концепция была изменена: прямая труба посередине, связывающая все диагональные трубы, была немного продлена вверх, но не стала соединяться полностью дополнительной секцией, а соединилась посередине данного элемента. Это существенно снизило массу шасси, но никак не повлияло на жесткость всей конструкции.

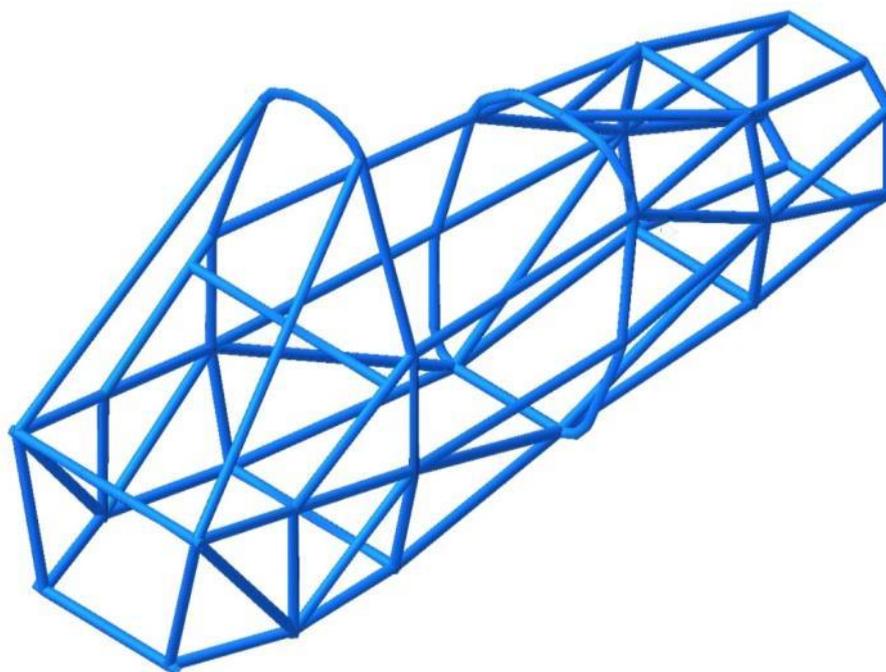


Рисунок 2.11 – Шасси автомобиля 2014 года

Кроме того в конструкции рамы 2015 было снижено количество используемых труб, но сохранен принцип триангуляции. Раннее каждая секция рамы дробилась примерно на 4 элемента, в 2015 году она уже дробится всего лишь на две.

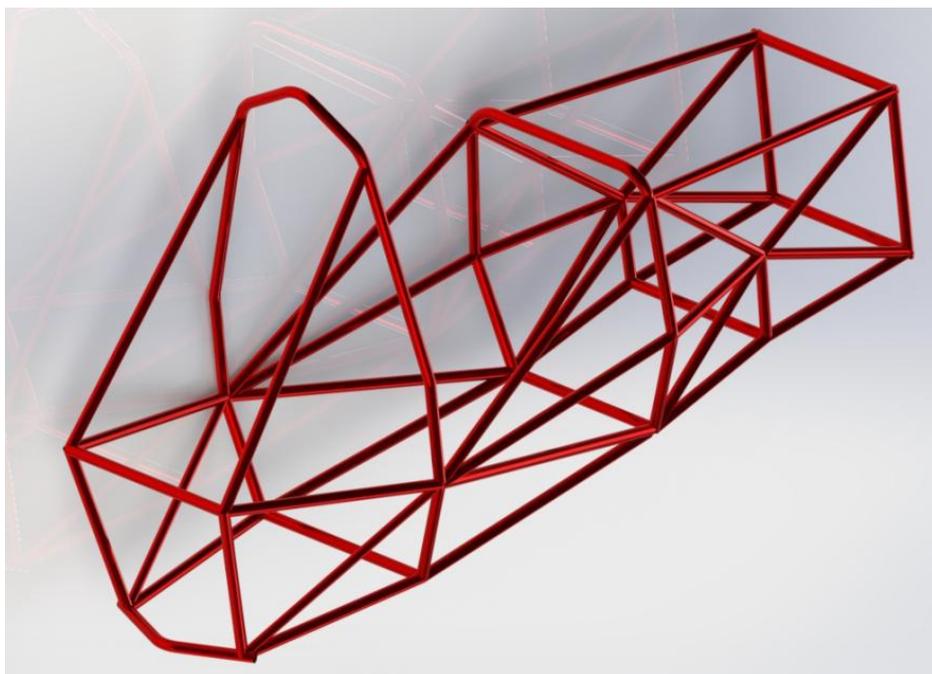


Рисунок 2.12 – Шасси автомобиля 2015 года

Если говорить об общей концепции рамы, то начиная с 2015 года – меняется концепция задней части шасси – теперь дифференциал закрепляется за двигатель, а не за раму как в 2014 году, что позволяет существенно снизить количество используемых труб, что и приводит к общему снижению веса. Кроме того в 2015 году была переработана область кокпита путем небольшого наклона передней дуги по сравнению с 2014 годом, что позволило использовать 2 цельных трубы вместо 7 труб с сохранением прочности рамы, а также убрать конструкцию из 6 труб между передней дугой и передней перегородки. В итоге снижение количества используемых труб приводит к меньшему количеству сварочных швов, что также сказывается на весе шасси.

В раме 2017 года изменена длина задней распорки передней дуги. Теперь данная распорка не соединяется с главной дугой, как это было на раме болида 2015 года. Кроме этого в данной конструкции рамы была изменена концепция главной дуги: ранее она состояла из 8 труб, теперь же она состоит из 6 труб. Последним значительным отличием рамы 2017 года стало отсутствие задней трубы между задними распорками главной дуги.

Теперь данным элементом выступает двигатель, который завершает конструкцию рамы.

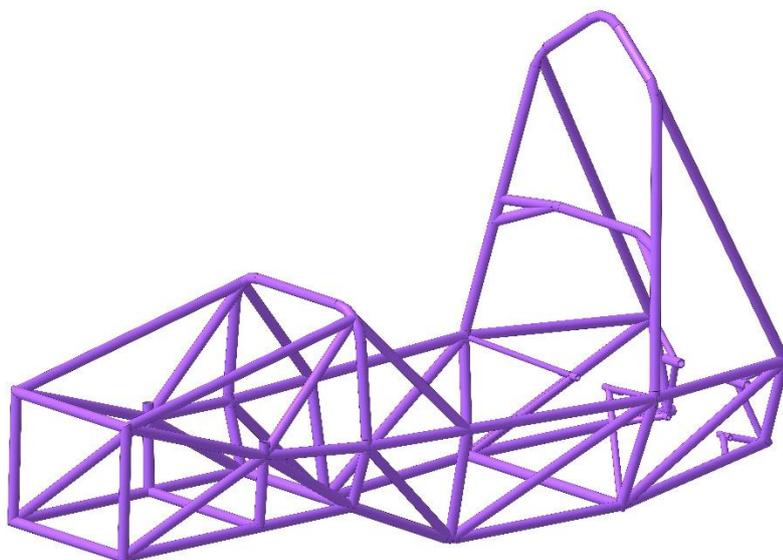


Рисунок 2.13 – Шасси автомобиля 2017 года

В 2018 году для лучшего компоновочного решения по расположению задних амортизаторов была добавлена задняя труба между задними распорками главной дуги. На данной трубе закрепляется кронштейн для первой точки амортизатора. Кроме того в данной раме было значительное изменение толщин используемых труб, если ранее мы использовали только три разновидности толщин, в этом же году использовалось 4 варианта, что существенно снизило вес рамы. Общая масса рамы с учетом всех кронштейнов составляет всего лишь 24 кг.

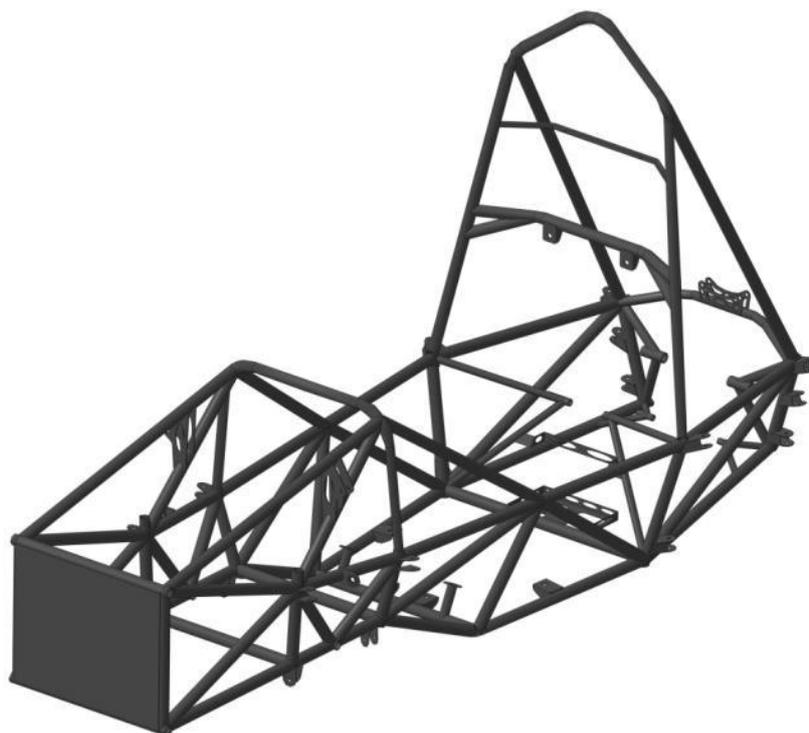


Рисунок 2.14 – Шасси автомобиля 2018 года

### **2.3 Разработка рамной конструкции**

Разработка конструкции рамы начинается с определения базовых расстояний и точек, от которых впоследствии будет проектироваться рама. Одним из таких расстояний является колесная база, которая, согласно регламенту, не должна быть меньше 1525 мм, максимальная длина не ограничена. Но чем длиннее колесная база, тем меньше маневренности будет у автомобиля. Колёсная база последнего болида составила 1530 мм, данное расстояние обеспечивает необходимую маневренность. После того, как определилось расстояние колесной базы, задаются оси шин, от которых с помощью программы LOTUS SUSPENSION, методом конечных элементов, рассчитываются точки подвески, в которых потом сходятся дуги и трубы рамы.

Рама гоночного болида класса "Formula Student" состоит из нескольких основных элементов, первым из которых является передняя перегородка. Ее размеры ограничены размерами аттенюатора. Передняя перегородка защищает ноги водителя, а также определяет переднюю плоскость для

основных компонентов рамы. В случае команды TRT передняя перегородка имеет размеры 415 на 410 мм (рисунок 2.15). По требованиям регламента, при выходе передней перегородки более чем на 25 мм за пределы аттенюатора, требуется диагональная распорка. Так как в конструкции автомобиля используется шаблон классического аттенюатора, то в переднюю перегородку вварена необходимая диагональная распорка. Передняя перегородка изготовлена из 4 замкнутых труб диаметром 25 мм. Диагональная распорка выполнена из стальной трубы такого же диаметра.

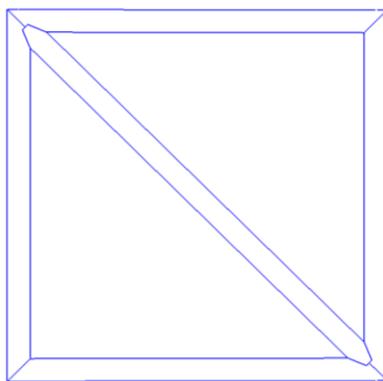


Рисунок 2.15 – Передняя перегородка

Передняя перегородка должна опираться на переднюю дугу посредством как минимум трех элементов рамы с каждой стороны болида: верхнего, нижнего и диагонального, чтобы соблюдался принцип триангуляции (рисунок 2.16)

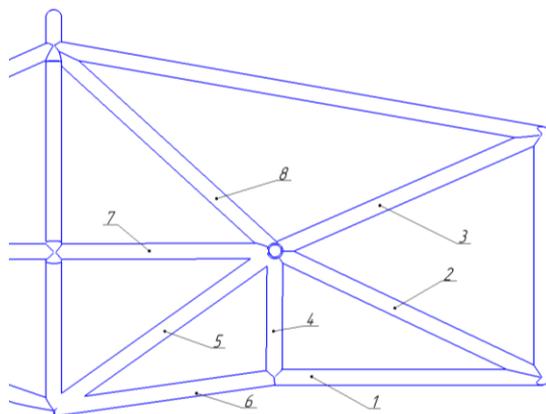


Рисунок 2.16 – Опоры передней перегородки

Следующим основным компонентом рамы гоночного болида является передняя дуга. Данная дуга изготовлена из сплошной стальной трубы диаметром 25 мм и толщиной стенок 2,5 мм. Длина передней дуги болида составляет 1460 мм. Угол отклонения дуги от вертикали составляет 0 градусов. Так как дуга не наклонена ни назад, ни вперед, то наличие распорок необязательно. Но для того, чтобы обеспечить максимальную жесткость, передняя дуга поддерживается как передними, так и задними распорками (рисунок 2.17).

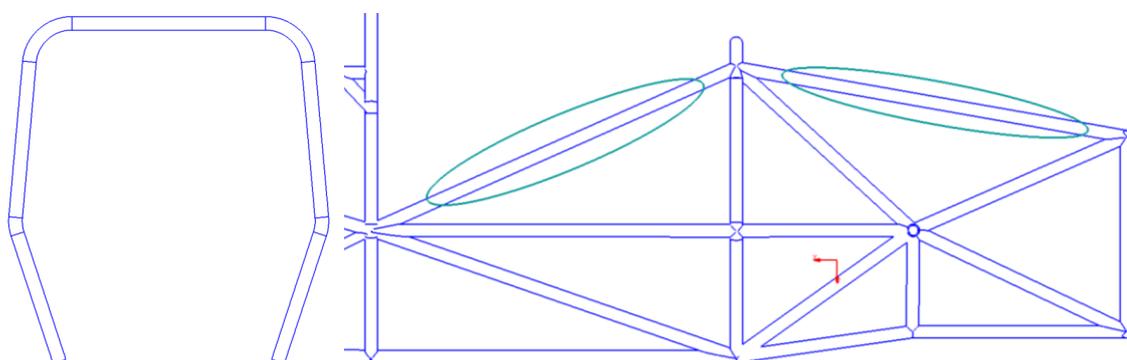


Рисунок 2.17 – Передняя дуга и распорки передней дуги

Распорки расположены спереди и сзади передней дуги по левой и правой стороне автомобиля. Распорки выполнены из стальных труб диаметром 25 мм и толщиной стенок 2,5 мм.

Следующий элемент конструкции автомобиля - боковая или же защитная структура (рисунок 2.18), которая создается методом триангуляции. Данная структура должна состоять как минимум из трех труб. В данной конструкции нижний элемент боковой структуры (позиция 1) соединяет нижнюю часть главной и передней дуг, верхний элемент (позиция 3) соединяет переднюю и главную дуги, а диагональный элемент (позиция 2) должен соединять верхний и нижний элемент боковой конструкции. Боковая структура выполнена из стальных труб диаметром 25 мм с толщиной стенок 2,5 мм. Длина боковой структуры составляет 730 мм.

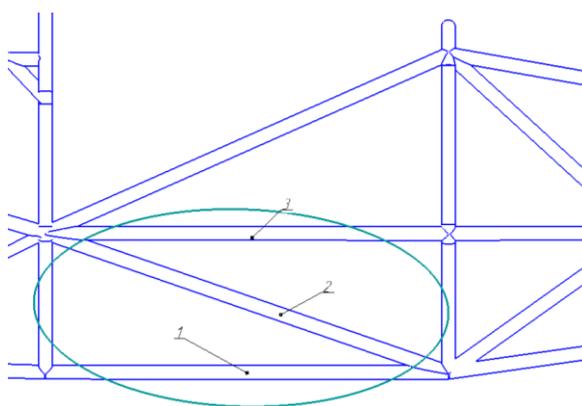


Рисунок 2.18 – Боковая структура

Еще одним важнейшим элементом конструкции рамы является главная дуга. Данная дуга изготовлена из сплошной стальной трубы диаметром 25 мм и толщиной стенок 2,5 мм. Длина передней дуги болида составляет 2640 мм. Угол отклонения дуги от вертикали составляет 0 градусов.

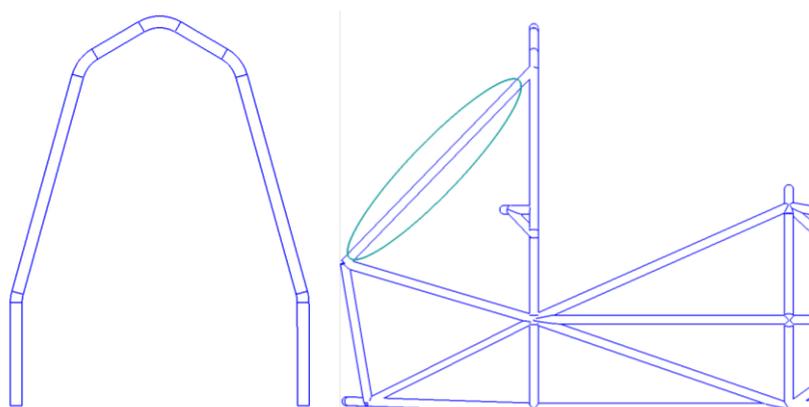


Рисунок 2.19 – Главная дуга и распорки главной дуги

Распорки главной дуги могут располагаться как спереди, так и сзади главной дуги (рисунок 2.19). Главная функция распорок – перенос нагрузок с главной дуги на основную конструкцию рамы. В данном варианте распорки главной дуги расположены сзади. Распорки выполнены из стальной трубы длиной 780 мм и диаметром 25 мм с толщиной стенок 2,5 мм. Распорки главной дуги и сама дуга образуют острый угол равный 43,5 градусам, что превышает установленный регламентом минимальный угол в 30 градусов.

Размеры главной и передней дуг рассчитываются с учётом 95-го перцентиля человека. При спроектированной раме расстояние от головы

водителя до прямой линии, проведенной через верхнюю точку главной дуги и верхнюю точку передней дуги должно быть не менее 50,8 мм. А расстояние между головой и прямой линией, проведенной через верхнюю точку главной дуги и нижнее основание распорок главной дуги не должно быть меньше 50,8 мм (рисунок 2.20).

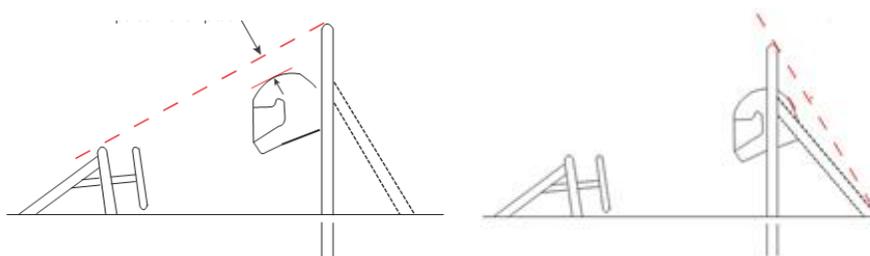


Рисунок 2.20 – Требования 95-го перцентиля

После того как была задана главная дуга, сзади нее помещается двигатель, тем самым получают задние точки рамы. Хочется отметить также, что во всей конструкции рамы используется метод триангуляции, именно поэтому во всей ее конструкции прослеживаются треугольные структуры (рисунок 2.21).

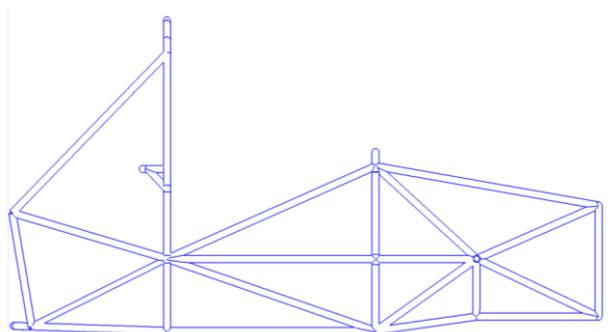


Рисунок 2.21 – Рама болида в сборе

Элементы рамы свариваются между собой с катетом сварочного шва 2-3 мм в среднем.

Для того чтобы определить ширину рамы, необходимо воспользоваться специально предоставленными шаблонами FSAE, размерность которых указана на рисунке 2.22. По регламенту следует, что размеры кокпита

должны быть такие, чтобы первый шаблон на данном рисунке мог спокойно вертикально проходить через него вплоть до верхнего участка боковой структуры, находясь в горизонтальном положении. При выполнении данного теста, необходимо учесть, что огнеупорная стенка должна оставаться в автомобиле. Второй шаблон на рисунке 2.22 должен обеспечивать его свободное перемещение по горизонтальной составляющей от лица водителя до самой задней точки педалей, установленных в самом переднем положении (при регулируемых педалях).

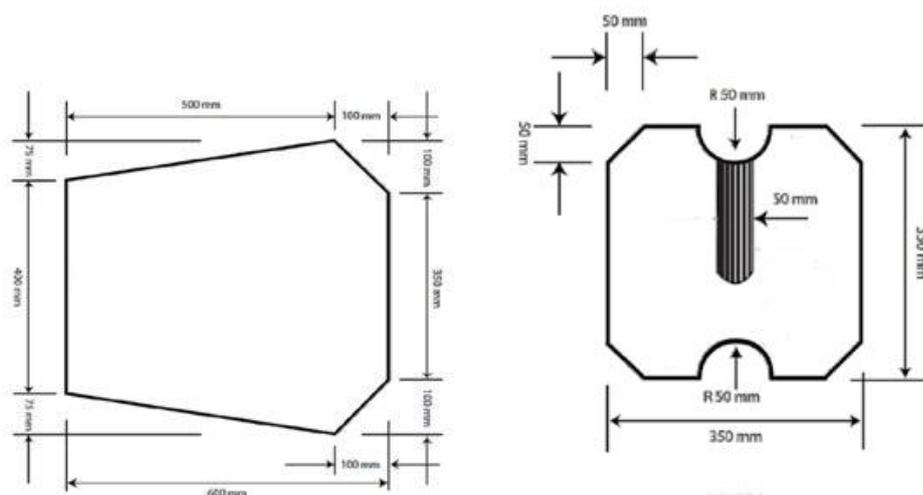


Рисунок 2.22 – Шаблоны для кокпита

Помимо этого, нужно учесть, что у водителя должна быть возможность покинуть гоночный автомобиль в течение 5 секунд в случае непредвиденной ситуации.

#### 2.4 Технологическая оснастка для изготовления рамы

В наши дни для изготовления рамной конструкции можно выбрать один из множества вариантов, конечно, это еще и зависит от типа производства: единичное или же массовое.

В проекте Formula Student команда TRT предпочитает использование уникальной само разработанной оснастки – стапель, состоящий из множества пластин, играющих роль направляющих. Так, для более мелких рамных конструкций, например, для рамы мотоцикла (рисунок 2.23) был изготовлен

стапель из дерева, а для картинга использовался стапель из стали, но меньшего размера.



Рисунок 2.23 – пример стапеля из дерева

Наиболее подходящим материалом для создания стапеля для объемной рамной конструкции является конструкционный материал Сталь 3, так как он является недорогим, технологичным и при его использовании погрешность сборки будет минимальна. Удобность данного метода заключается в том, что это обеспечивает рамному изделию высокую точность, маленькое время сборки. Немаловажно также упомянуть и о принципе модульности. Например, рама для болидов 2017 и 2018 года отличалась всего лишь несколькими трубами, этот факт позволил использовать «модульность» стапеля, и, слегка его модернизировав, данный стапель использовался для сварки рамы болида 2018 года. К тому же, совсем необязательно вновь разбирать и собирать стапель – сваренная рама с легкостью достается из данного стапеля без его полного разбора.

Стапель для болида "Black Scorpion" состоит из 12 базирующих пластин, на которых закрепляются 4 основные пластины (рисунок 2.24).

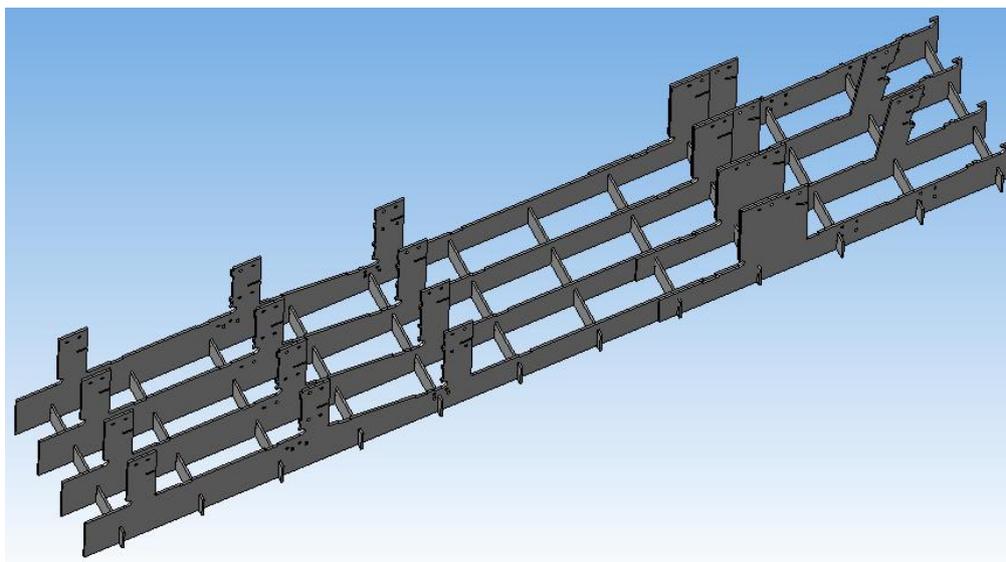


Рисунок 2.24 – Сетка стапеля для рамы автомобиля

Далее на основные пластины устанавливаются направляющие пластины, обеспечивающие нужный наклон и направление труб. Данные пластины закрепляются в стапеле посредством пазов или же посредством сварки. После того, как стапель был полностью собран, в нем начинают собирать раму, начиная с установки основных дуг. Постепенно в стапеле сваривается вся рама автомобиля (рисунок 2.25).

После создания 3D-модели необходимой оснастки был проведен деформационный анализ стапеля с толщиной пластин 5 мм. В процессе сварки рамы происходит перераспределение напряжений, что приводит к короблению. Для того чтобы минимизировать данные изменения, необходимо перед изготовлением стапеля провести деформационный анализ модели для определения наиболее нагруженных мест, деформации и коэффициента запаса прочности. В ходе анализа на стапель моделируются нагрузки, получаемые им в процессе сварки.

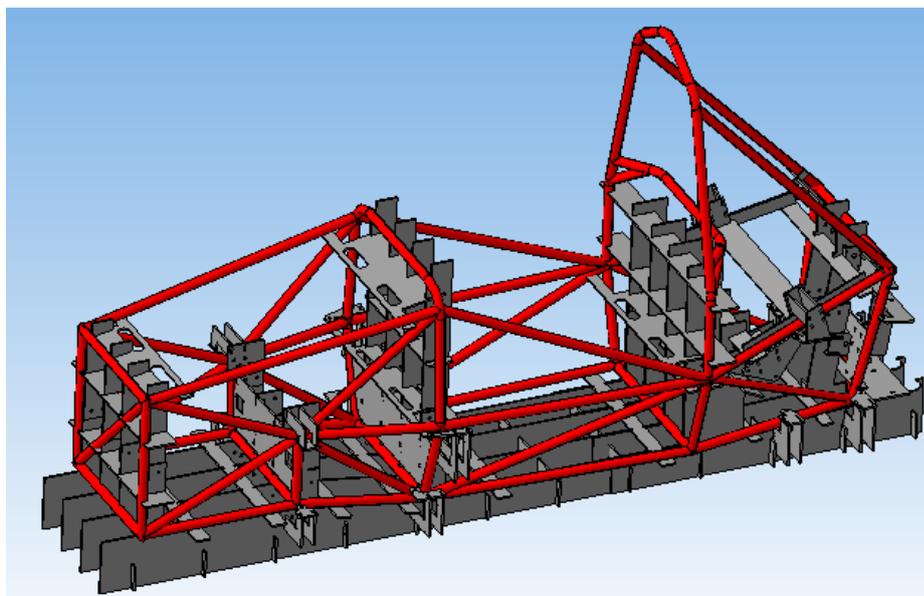


Рисунок 2.25 – Рама в стапеле

Результаты моделирования данной конструкции представлены на рисунке 2.26. По результатам моделирования максимальная деформация конструкции стапеля составляет 165 мкм, а минимальная – 1,5 мкм.

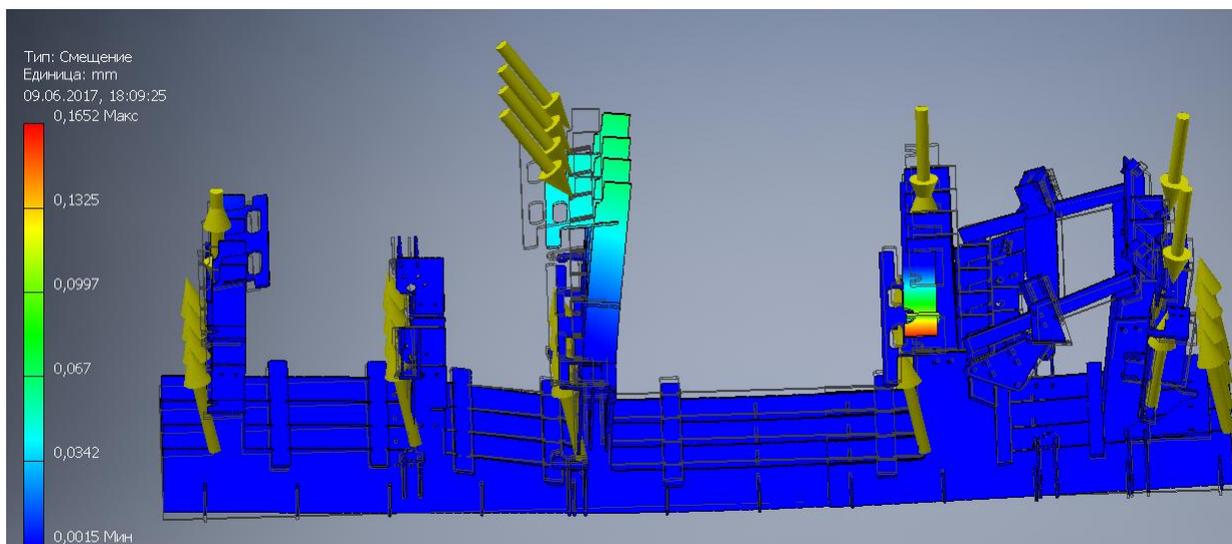


Рисунок 2.26 – Анализ деформации стапеля с толщиной пластин 5 мм

При нагружении стапеля с пластинами 5 мм, максимальный коэффициент запаса прочности составляет 15, а минимального не существует (рисунок 2.27).

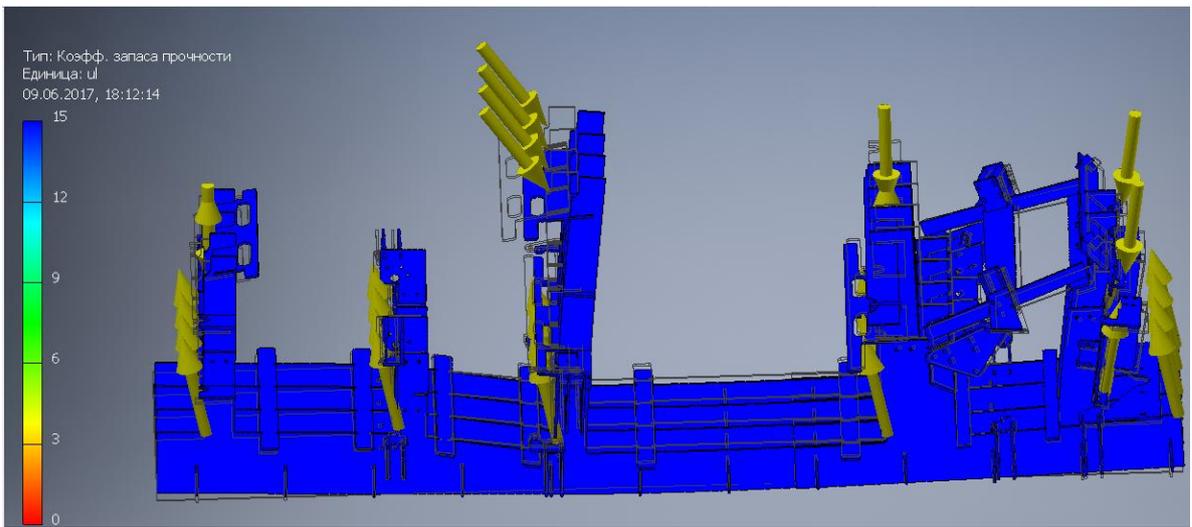


Рисунок 2.27 – Коэффициент запаса прочности стапеля с толщиной пластин 5

мм

### 3 Метод расчета на кручение

#### 3.1 Существующие методы расчета на кручение

Жесткость рамы на кручение является одним из основных критериев эффективности рамы болида, потому что она улучшает управляемость машины и повышает ее безопасность. В то же время оптимальная конструкция рамы позволит существенно снизить вес, так как низкий вес болида является одним из ключевых параметров в серии Формула Студент.

Во время разработки рамной конструкции перед инженерами стоит основная задача – обеспечить низкую массу конструкции, при этом обеспечив достаточную крутильную жесткость, чтобы конструкцию не свернуло во время движения гоночного болида на трек.

В настоящий момент одним из самых популярных методов расчета рамной конструкции на кручение является расчет с получением значения угла закручивания рамы через арктангенс ( $\arctan$ ).

$$\alpha_p = \arctan \Delta y_{л} + \Delta y_{п} / t$$

где  $t$  – колея автомобиля;  $\Delta y_{л}$  и  $\Delta y_{п}$  – вертикальное перемещение левой и правой сторон относительно нормального положения оси.

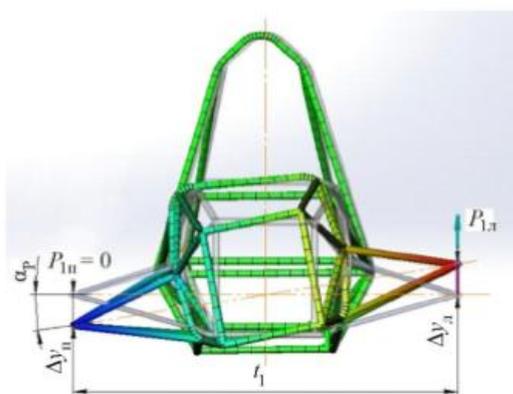


Рисунок 3.1 – Схема параметров для расчета угла

Одним из главных недостатков данного метода является отсутствие возможности рассчитать жесткость рамной конструкции в определенной точке рамы в любой момент времени. При данном расчете жесткость будет выявлен только в той точке, которая получает максимальную

деформационную нагрузку. К тому же, при данном расчете для обозначения силы используются точки рычагов, что также накладывает определенные ограничения для расчета и дает погрешности. В итоге по результатам расчетов получается жесткость рамы с учетом всех точек рычагов.

### 3.2 Предлагаемый метод расчета на кручение

Тщательно проанализировав методику расчета, описанную выше и проведя некоторые математические преобразования, была сформирована новая методика расчета рамной конструкции на кручение, подробно описанная ниже.

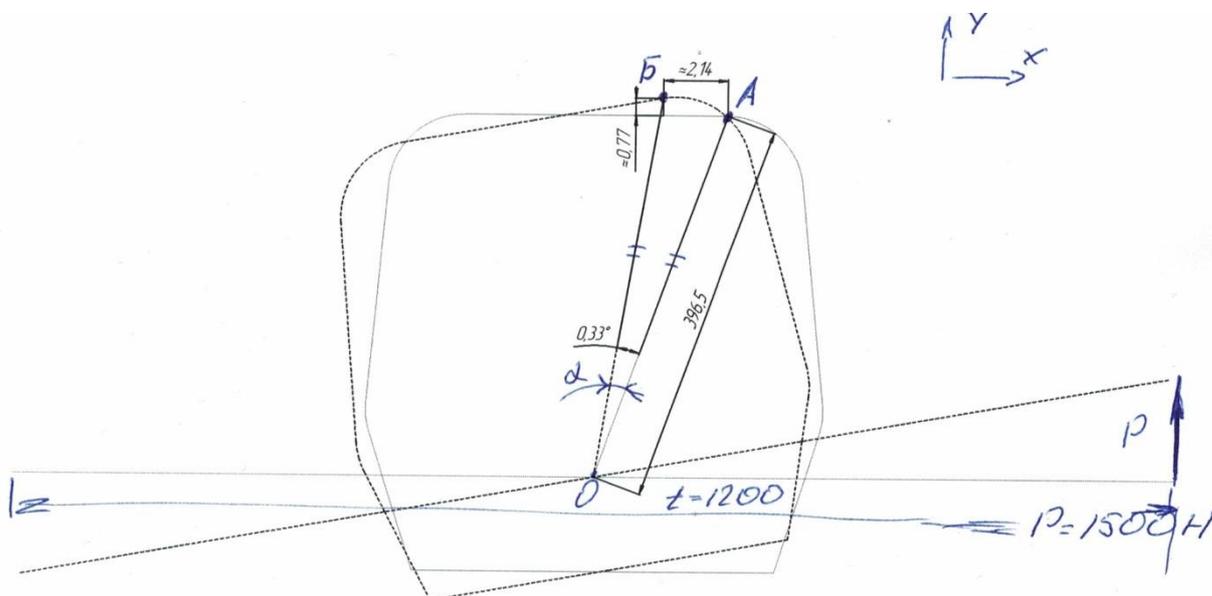


Рисунок 3.2 – Схема для предлагаемого расчета на кручение

Рассмотрим схему нагружения, обозначенную на рисунке 3.2. Исходя из нее, мы видим, что при скручивании рамы т. А (max перемещение по одной из осей плоскости), находящаяся на изгибе передней дуги рамной конструкции, перемещается в новую точку плоскости – т. Б. Причем перемещение по оси X составляет 2,14 мм, а по оси Y – 0,77 мм (по модулю).

Для того, что определить расстояние между начальными и смещенным положениями точек, воспользуемся теоремой Пифагора, по которой:

$$AB = \sqrt{0,77^2 + 2,14^2} = 2,27 \text{ мм}$$

Далее рассмотрим треугольник АОБ: в данном треугольнике точка О – центр автомобиля, а угол  $\alpha$  – поворот рамы при кручении. В данном треугольнике отрезки ОА и ОБ равны (считается, что при скручивании жесткость конструкции передней дуги гораздо выше, чем жесткость пространственной конструкции рамы, т.е. скручивание рамы будет проходить по трубам, соединяющих переднюю дугу с передней перегородкой и главной дугой, в основном линейно между передней и главной дугами).

Исходя из всего вышесказанного, по теореме косинусов следует:

$$AB^2 = OA^2 + OB^2 - 2 \cdot OA \cdot OB \cdot \cos\alpha$$

Опираясь на данную теорему с помощью подстановки известных данных, находим угол  $\alpha$ :

$$\cos\alpha = \frac{OA^2 + OB^2 - AB^2}{2 \cdot OA \cdot OB} = 0,99939$$

Воспользовавшись таблицей косинусов, получаем угол  $\alpha=0,33$  градуса.

После определения всех исходных данных для дальнейшего расчета переходим к расчету скручивающего момента, который определяем по следующей формуле:

$$M = P \cdot t \cdot 0,5 = 1500 \cdot 1,2 \cdot 0,5 = 900 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

где  $P$  – прилагаемая сила при расчете на кручении;  $t$  – передняя колея автомобиля.

После расчета крутящего момента с помощью формулы 6 находим жесткость рамы при кручении:

$$C_p = \frac{M}{\alpha} = \frac{900}{0,33} = 2727 \text{ Н}\cdot\text{м/град}$$

где  $M$  – крутящий момент, рассчитанный выше;  $\alpha$  – угол поворота при кручении, рассчитанный ранее.

Преимуществом предложенного метода расчета на кручение является возможность расчета жесткости рамы в любой интересующей нас точке: точка максимального перемещения, минимального перемещения, среднего и т.д. В предложенной методике жесткость рамы рассчитывается без учета

жесткости рычагов, так как изначально к раме прикладывается удаленная сила.

Еще один плюс данной методики заключается в том, что можно рассчитать раму на кручение не только в момент ее вхождения в поворот (когда сила от точки рычага направлена перпендикулярно вверх, а противоположная сила перпендикулярно вниз), но и в момент резкого торможения или же при наезде на дорожную неровность.

## 4 Оптимизация рамной конструкции болида класса формула студент

### 4.1 Расчетно-аналитическая часть

Для корректно осуществляемых расчетов и корректно прикладываемой нагрузки на начальном этапе необходимо рассчитать примерную развесовку автомобиля. Это необходимо для того, чтобы определить, какое воздействие масса оказывает на производительность автомобиля во время его движения.

Для начала рассмотрим поперечное распределение веса автомобиля. На рисунке 4.1 представлено поперечное распределение массы автомобиля. Можно заметить, что плечо от центра тяжести автомобиля до центра массы пилота короче, чем плечо от центра тяжести автомобиля до центра масс двигателя, но данная несимметричность компенсируется разницей в весе данных составляющих: масса пилота примерно 80 кг, а масса двигателя около 40-50 кг. Именно поэтому итоговая развесовка автомобиля на переднюю и заднюю ось принимается в соотношении 50/50 (с центром масс, находящимся на высоте 284 мм) с учетом небольших погрешностей.

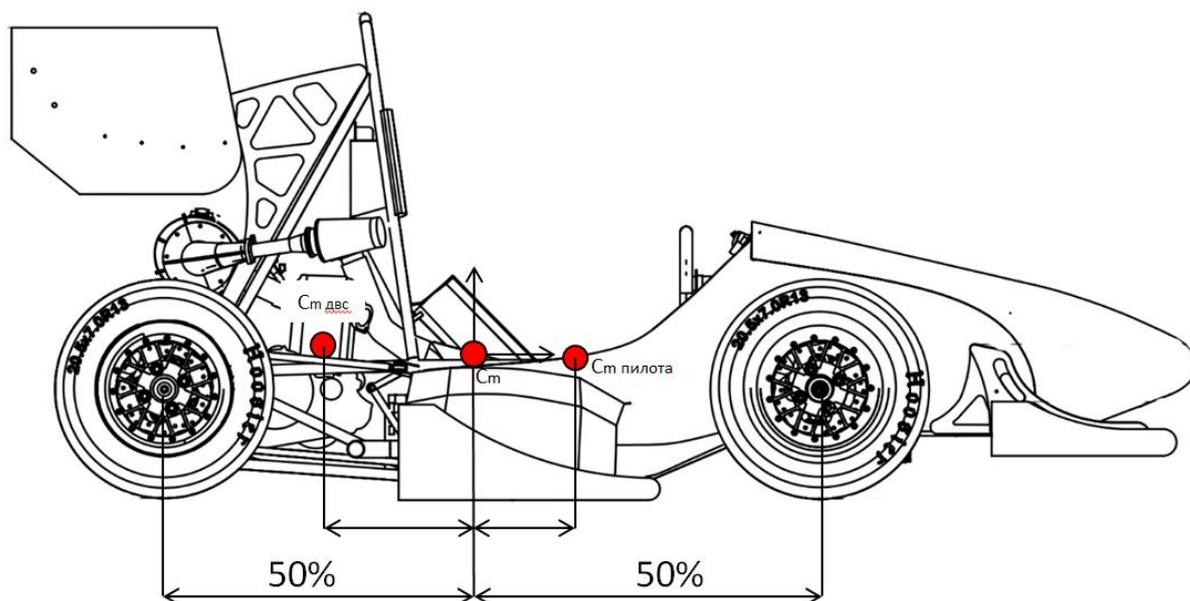


Рисунок 4.1 – Поперечное распределение веса автомобиля

Следующим вариантом для рассмотрения является продольное распределение веса автомобиля. На рисунке 4.2 представлено продольное распределение массы автомобиля. Можно заметить, что плечо от центра тяжести автомобиля до центра массы радиатора по длине примерно равно плечу от центра тяжести автомобиля до центра масс глушителя. Разница между двумя данными элементами составляет всего лишь 0,4 кг (масса глушителя 7,3кг, масса радиатора – 6,9кг), что никак не отразится на общей продольной развесовке автомобиля. Именно поэтому итоговая развесовка автомобиля на правую и левую сторону принимается в соотношении 50/50 (с центром масс, находящимся по центру автомобиля) с учетом небольших погрешностей.

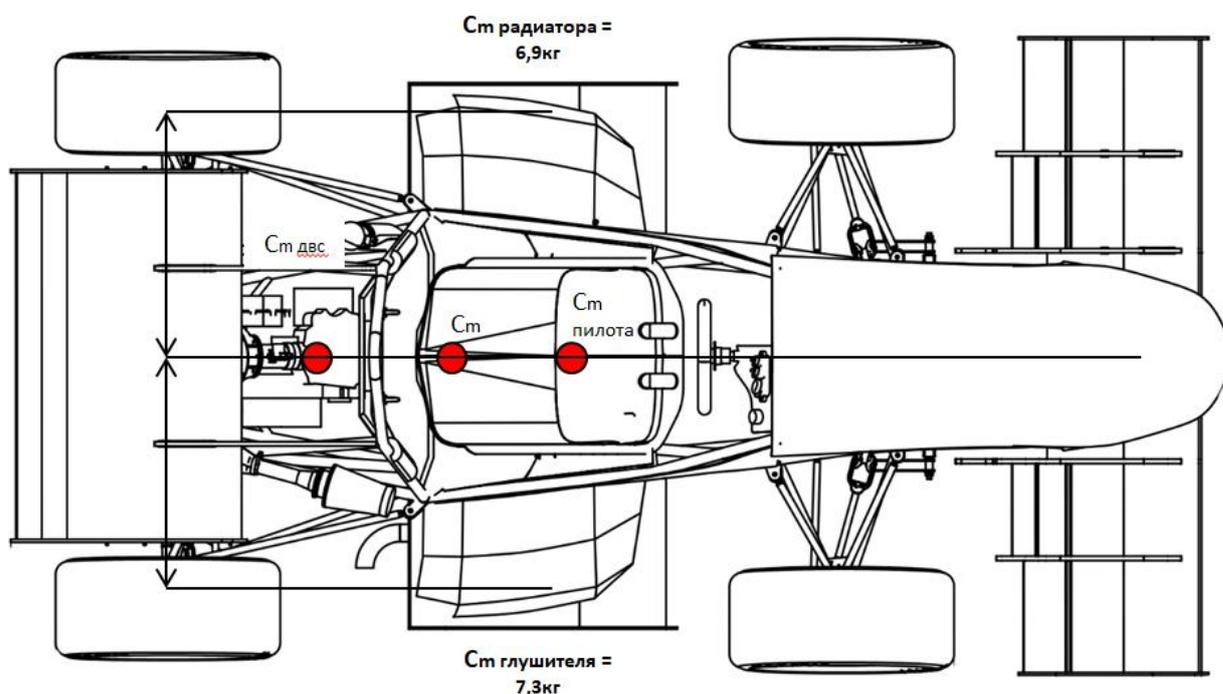


Рисунок 4.2 – Продольное распределение веса

#### 4.1.1 Расчет на кручение во время вхождения автомобиля в поворот

Большинство гражданских автомобилей испытываются по схеме фронтального удара с частичным перекрытием на автомобиль. В гоночных болидах данная схема нагружения не так важна по сравнению с той схемой нагружения, которая позволит определить жесткость рамы на кручение. Жесткость рамы на кручение является одним из основных критериев

эффективности рамы болида, потому что она улучшает управляемость машины и повышает ее безопасность. В то же время оптимальная конструкция рамы позволит существенно снизить вес, так как низкий вес болида является одним из ключевых параметров в серии Формула Студент. Поэтому, исходя из всего вышесказанного, рассмотрим следующую схему нагружения, которая получается в случае, если машина на большой скорости от 50 до 80 км/ч входит в вираж. В данном случае принимаем рычаги, как абсолютно жесткие элементы, передающие изгибающий момент и момент кручения на раму, учитывая также нагрузку на это колесо, составляющую 1,6g, помноженную на массу автомобиля (245 кг), мы получаем силу от 3 до 4 кН в зависимости от радиуса поворота и скорости движения автомобиля. Вся эта сила будет действовать как сила кручения с плечом, равным половине колеи автомобиля (600 мм). Заднюю часть болида мы рассматриваем как находящуюся в жесткой заделке. Подобная схема дает нам понимание жесткости конструкции в средней части автомобиля, где находится пилот, наименее жесткой части конструкции с точки зрения распределения сетки рамы. Именно эта жесткость и влияет на управляемость болида во время поворота, исключая продольное закручивание рамы вдоль своей продольной оси.

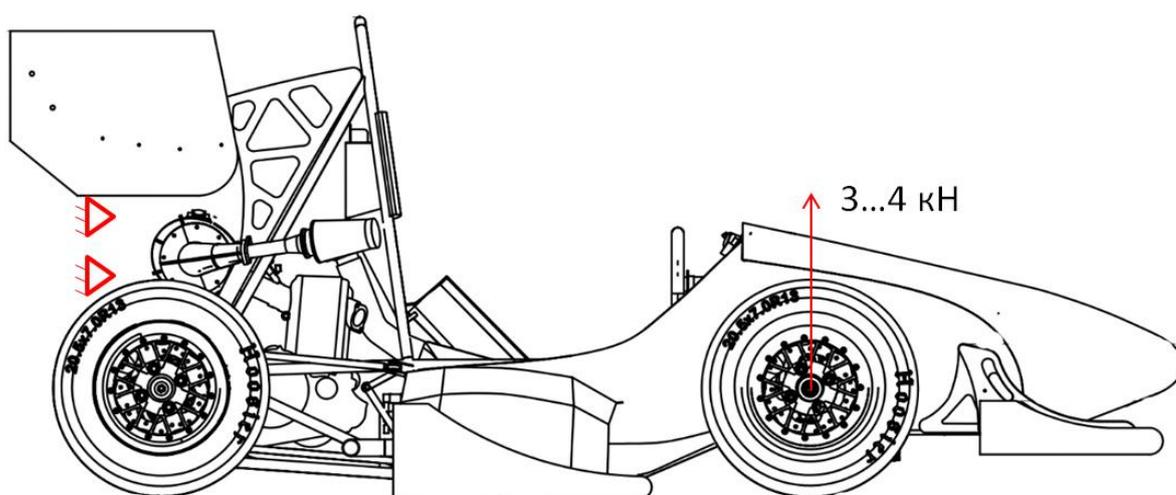


Рисунок 4.3 – схема нагружения при входе автомобиля в поворот

#### 4.1.2 Расчет на кручение во время торможения автомобиля

Примерное равномерное распределение массы между всеми четырьмя колесами болида принимаем условно продольное распределение масс между передним правым и передним левым колесом примерно 50 на 50. Поэтому рассмотрим схему нагружения таким образом, чтобы сила при торможении автомобиля, действующая от колес на раму была равной и симметричной. Учитывая, что при торможении нагрузка будет составлять  $1,6g$  и примерная масса автомобиля –  $245 \text{ кг}$ , мы получаем, что продольная сила трения от колес на машину составляет в сумме от  $3$  до  $4 \text{ кН}$ . В нашем случае, учитывая направленность инженерных расчетов на максимальную прочность, принимаем силу, равную  $4 \text{ кН}$ . Учитывая равное ( $50/50$ ) распределение масс, мы получаем, что по  $2 \text{ кН}$  действует на каждое колесо в продольном направлении при торможении. Эта сила раскладывается на силу растяжения, действующую вдоль переднего плеча переднего рычага, а также на силу сжатия, действующую вдоль заднего плеча верхнего переднего рычага. Принимая угол между продольной осью и задним лучом верхнего переднего рычага, мы можем через косинус рассчитать силу сжатия, действующую на заднее плечо верхнего переднего рычага, через которое эта сила напрямую передается на раму. Учитывая, что мы рассматриваем симметричное нагружение с двух сторон, получаем ситуацию сжатия передней дуги в точках контакта заднего плеча верхнего переднего рычага. Это одна из основных схем расчета и нагружения рамы на прочность и кручение, действующая повсеместно в ходе всего прохождения трассы гоночным болидом.

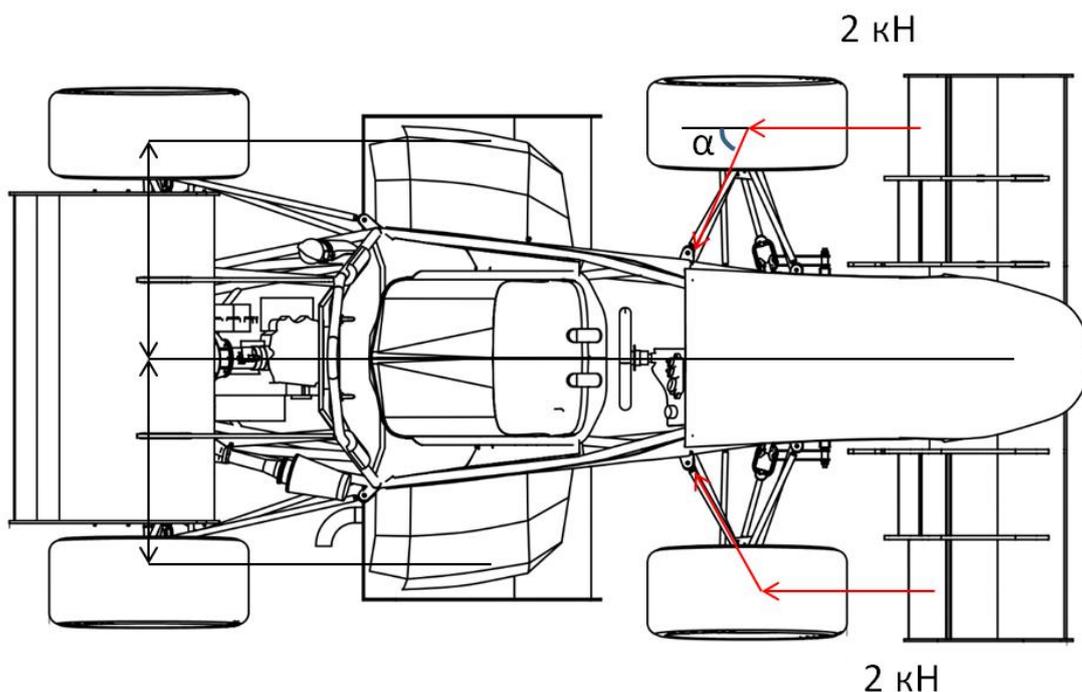


Рисунок 4.4 – схема нагружение при торможении автомобиля

## 4.2 Проведения нагружения первичной рамной конструкции

### 4.2.1 Подготовка математической модели

Одним из основных элементов гоночного автомобиля является конструкция шасси (рамы), влияющая на сбалансированность и управляемость автомобиля. К раме предъявляются основные требования на жесткость и прочность конструкции при разрыве, скручивании и растяжении.

Расчет рамы на кручения в программе ANSYS начинается с подготовки математической модели каркаса шасси автомобиля. Данную операцию можно произвести в любой программе для моделирования, например КОМПАС 3D, Catia, SolidWorks и другие. После создания данной модели ее необходимо импортировать в ANSYS в формате «stp».

Далее в самой программе выбирается желаемый вариант расчета. В нашем случае – это статический расчет на кручение. После чего создается проект расчетной задачи и для дальнейшей работы необходимо перейти в окно «geometry», чтобы начать непосредственную работу с расчетной моделью.

Рама болидов класса «Formula Student» состоит из нескольких основных элементов: передняя перегородка, опоры передней перегородки, передняя дуга и ее распорки, боковая структура, главная дуга и ее распорки.

Так как все трубы рамы являются отдельными элементами, то первый этап – объединение труб рамы одной толщины. Совместить можно только те трубы, которые соприкасаются между собой. По итогу работы получается несколько объединенных зон рамы.

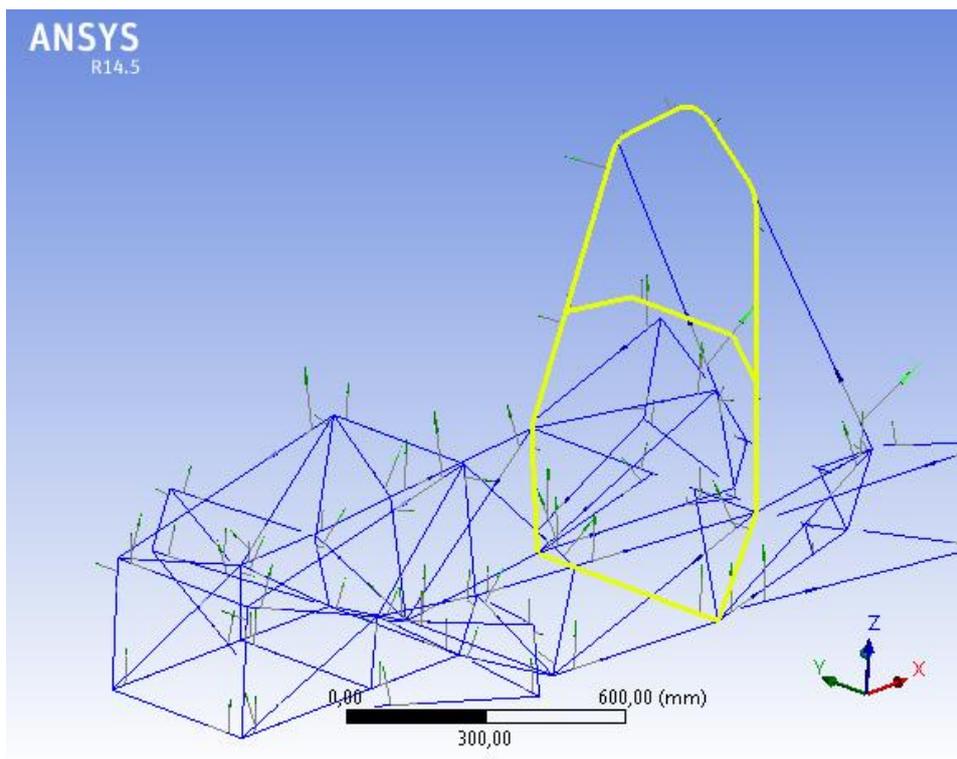


Рисунок 4.5 – Пример объединенной секции

Второй этап - указание размерности труб элементов рамы. Каждой зоне рамы задаем соответствующий диаметр и толщину стенки трубы.

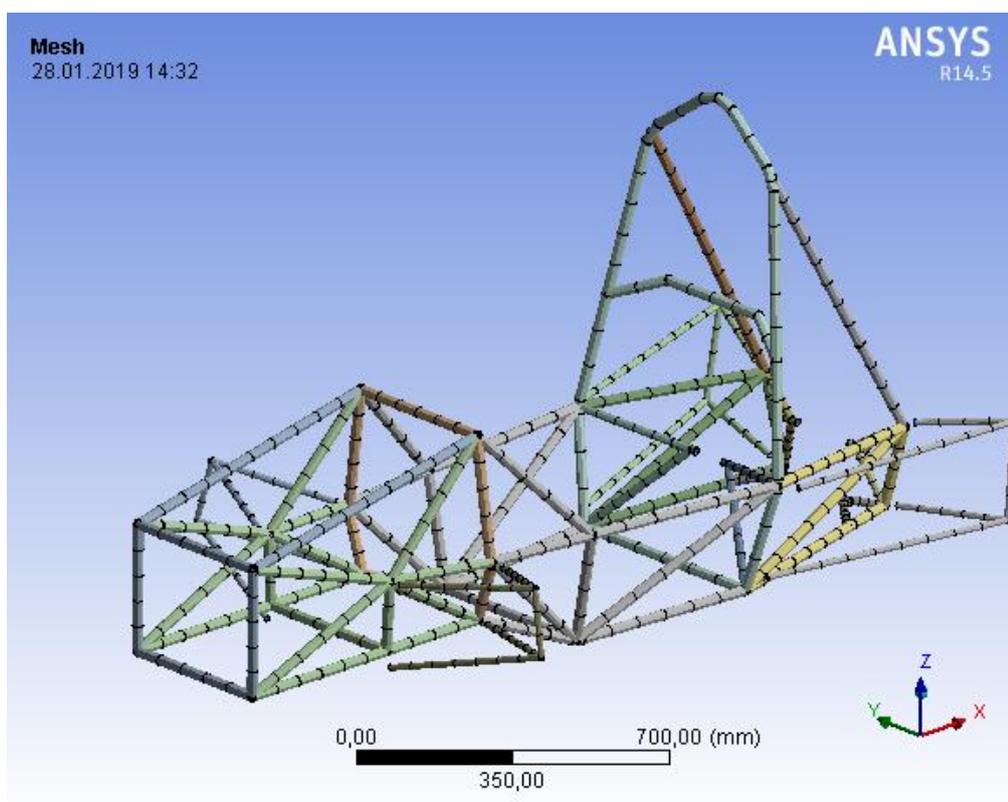


Рисунок 4.6 – Пример указания толщины

Третий этап - связывание элементов рамы в единую конструкцию. Для выполнения данной операции необходимо переключиться в раздел «model». На примере рисунка 4.7 точка А соединяет переднюю перегородку и переднюю распорку с передней боковой структурой, так как данные трубы имеют разную размерность и находятся в разных зонах, заданных ранее в первом этапе. Данную операцию необходимо выполнить для всех соединений зон друг с другом, включая рычаги подвески. (Пример точки А, В, С на рисунке 4.7).

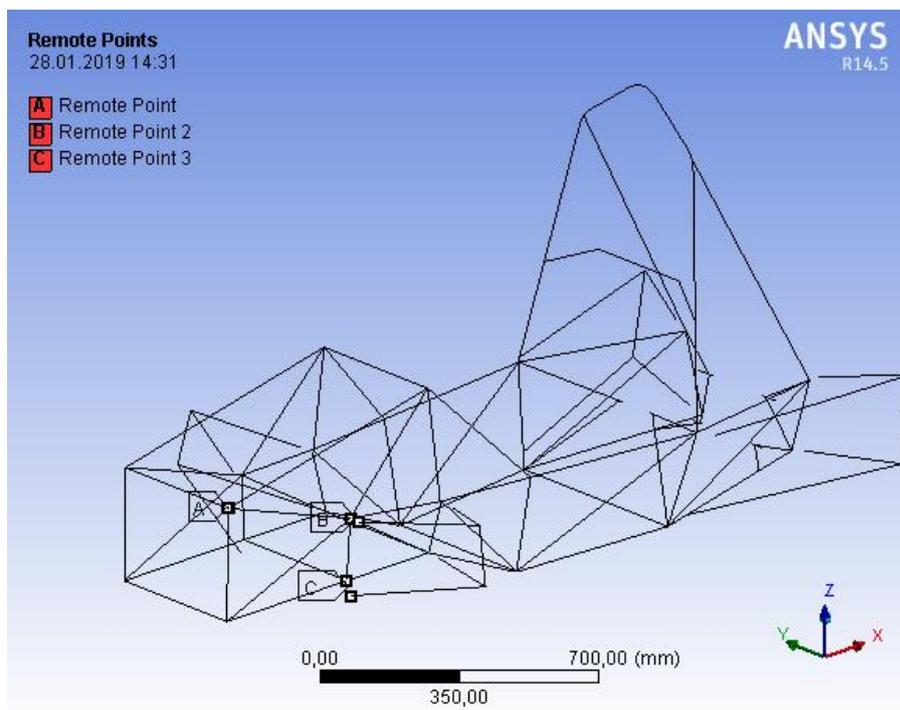


Рисунок 4.7 – Пример объединения секций.

После того как все элементы объединены в единый расчетный объект, задается расчетная сетка в разделе «mesh». Для получения более точного результата расчета необходимо разбить расчетную сетку на более мелкие ячейки.

На этом подготовка математической модели для расчета на кручение в программном пакете ANSYS завершена.

#### 4.1.2 Первичное нагружение модели

Серия соревнований Formula SAE предоставляет университетским командам, состоящим из студентов и магистрантов своеобразную задачу: спроектировать, сконструировать и посоревноваться на созданных ими автомобилях формульного типа.

Одним из основных элементов гоночного автомобиля является конструкция шасси (рамы), влияющая на жесткость и прочность конструкции при разрыве, скручивании и растяжении.

Рама гоночного автомобиля класса «Формула Студент» должна состоять как минимум из следующих элементов:

- Главная дуга (№2),

- Передняя дуга (№1),
- Передняя перегородка и ее опоры,
- Распорки передней и главной дуги и их опор,
- Зона бокового удара (как минимум 3 трубы) (№ 9, 14, 15)

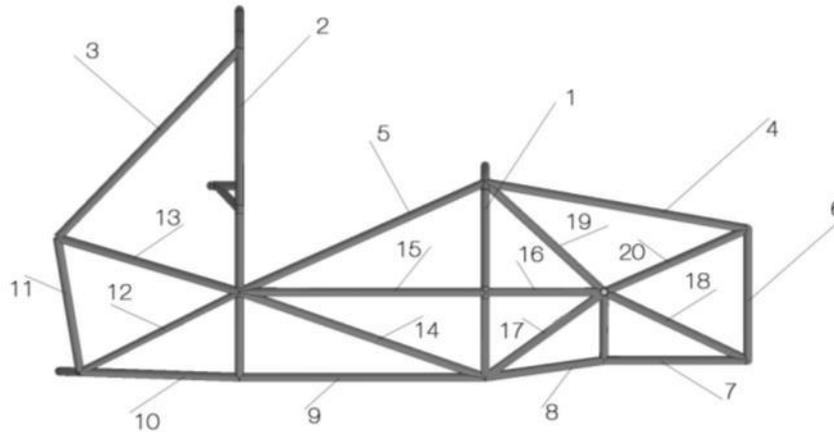


Рисунок 4.8 – Конструкция рамы

В конструкции рамы обязательно должен прослеживаться принцип триангуляции.

Первый ряд расчетов был проведен с использованием программного обеспечения ANSYS. Рама была нагружена в двух состояниях: при резком торможении и при входе в поворот. Рассматривалась нагрузка на кручение - основная задача нагружения продемонстрировать, что технологические свойства рамы останутся в прежнем состоянии и раму не свернет во время выполнения движения.

Первым проводился расчет на кручение во время вхождения в поворот: к рычагу передней подвески вертикально вверх прикладывалась сила номиналом 3000Н, симметрично, в противоположной стороне точно такая же сила прикладывалась вертикально вниз. Результаты показали, что при данном усилии максимальное смещение по оси Y происходит у передней дуги всего лишь на 4,1 мм (рис. 4.10), а по оси Z на 3,5 мм (рис. 4.11).

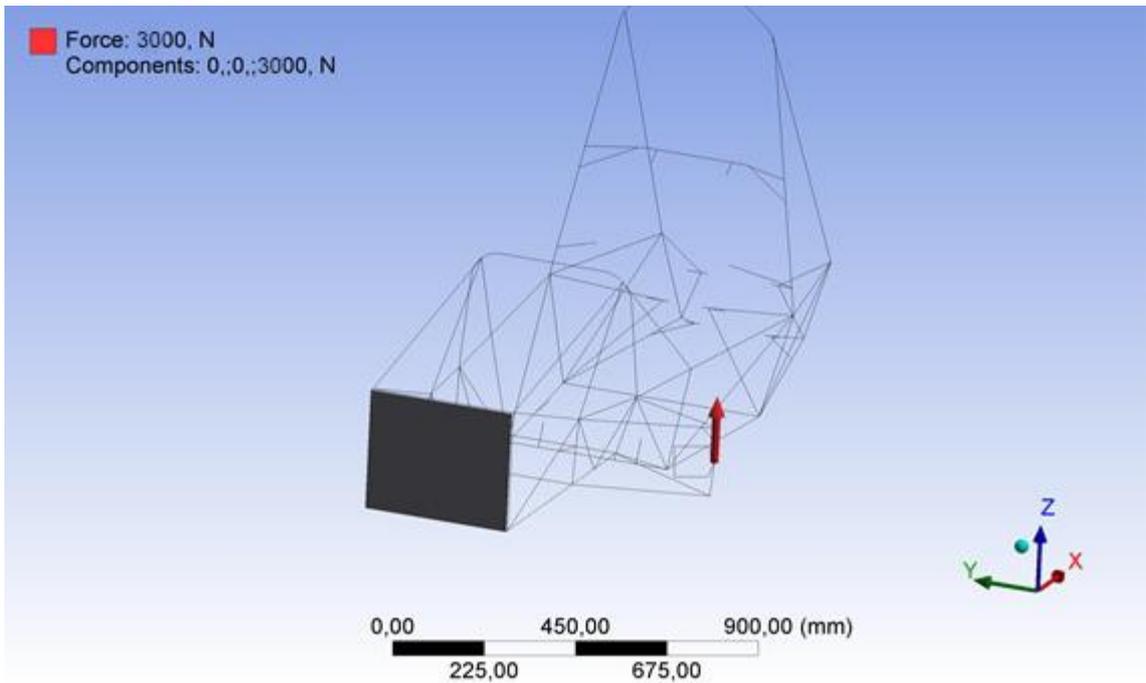


Рисунок 4.9 – Приложение силы для расчета на кручение при повороте

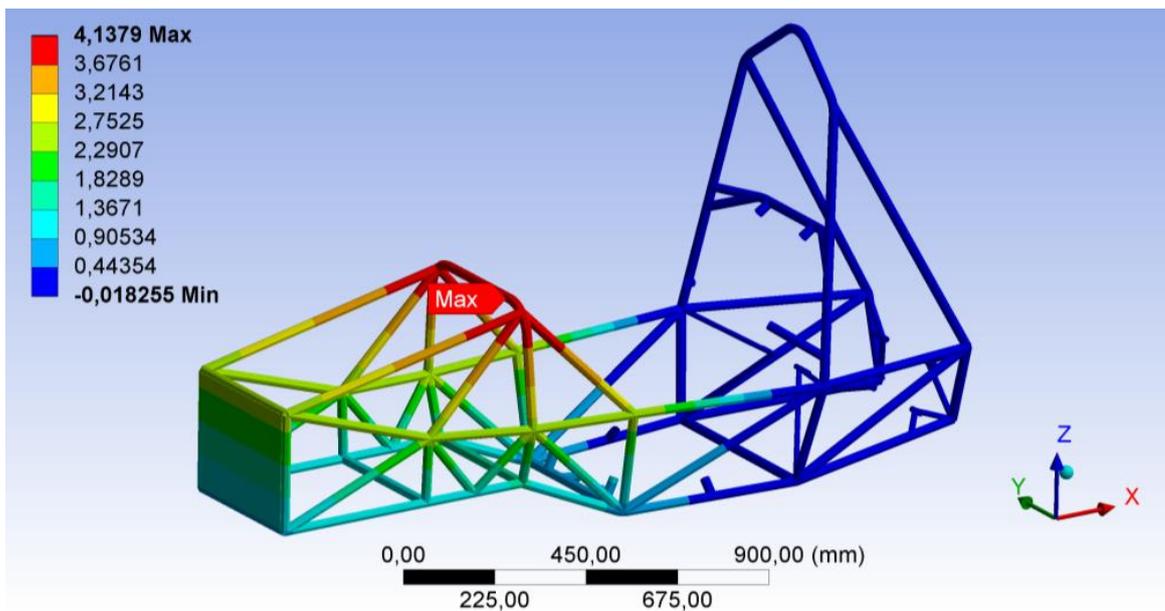


Рисунок 4.10 – Анализ рамы на кручение при повороте (по оси Y)

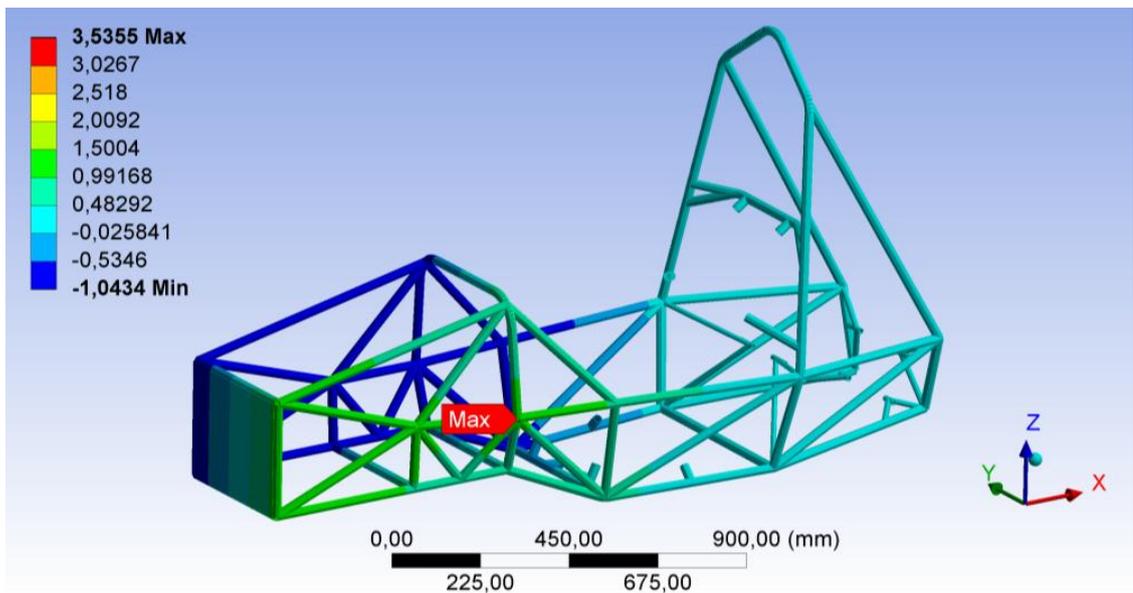


Рисунок 4.11 – Анализ рамы на кручение при повороте (по оси Z)

Далее проводился расчет на кручение во время резкого торможения. В данном случае сила идет по касательной рычага по направлению к раме в номинале 2000Н. Результаты показали, что при данном усилии максимальное смещение по оси Y происходит у передней дуги всего лишь на 6,6 мм (рис. 4.12), а по оси Z на 2,9 мм (рис. 4.13).

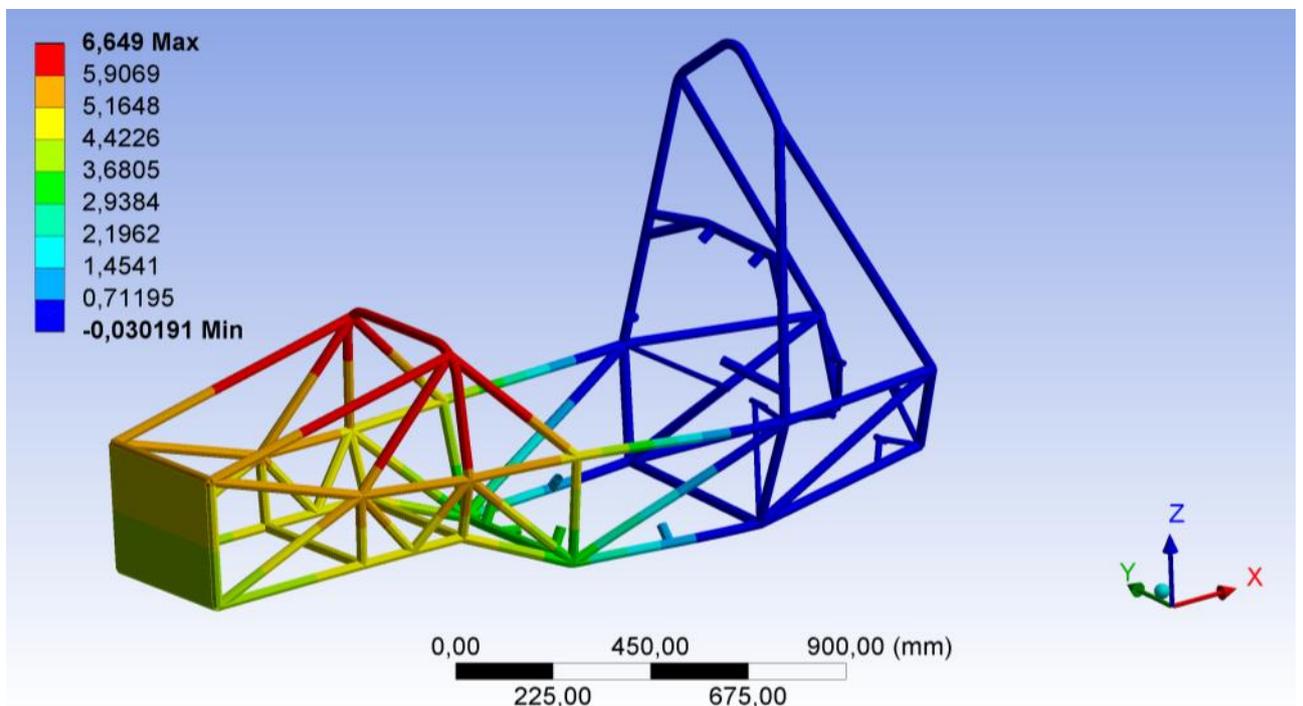


Рисунок 4.12 – Анализ рамы на кручение при торможении (по оси Y)

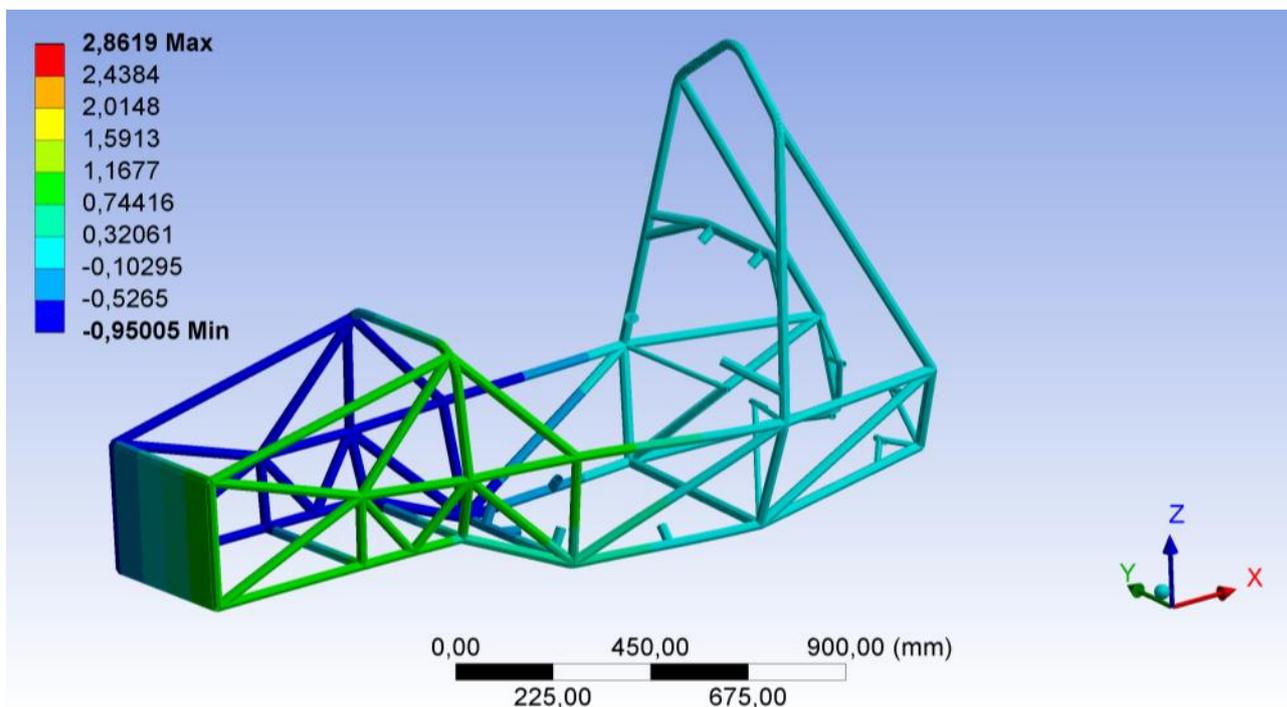


Рисунок 4.13 – Анализ рамы на кручение при торможении (по оси Z)

## 4.2 Анализ конструкционной прочности с использованием пакета конечно-элементного моделирования ANSYS

### 4.2.1 Нагружение модели рамы в статическом режиме

Для определения жесткости и прочности рамной конструкции в статическом состоянии, необходимо приложить нагрузку к каждому элементу рамы. Первый рассматриваемый элемент рамы – главная дуга. Исходя из данных в регламенте, к данной трубе была приложена сила в размере 11916 Н. Исходя из результатов нагружения на рисунке ниже, мы видим, что максимальное перемещение по оси X составило 22,264 мм, что удовлетворяет требованиям регламента.

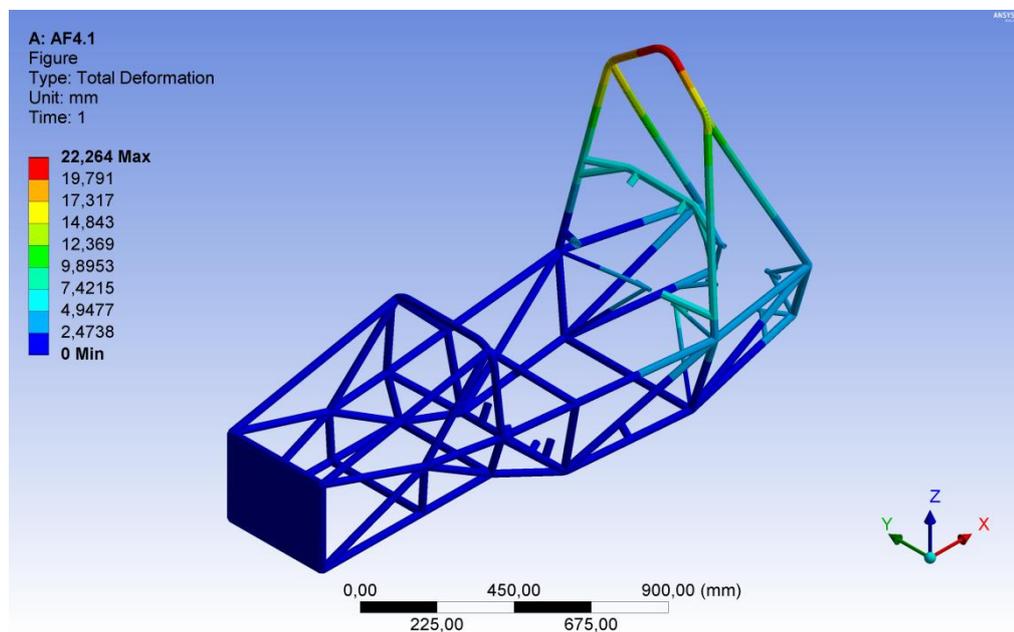
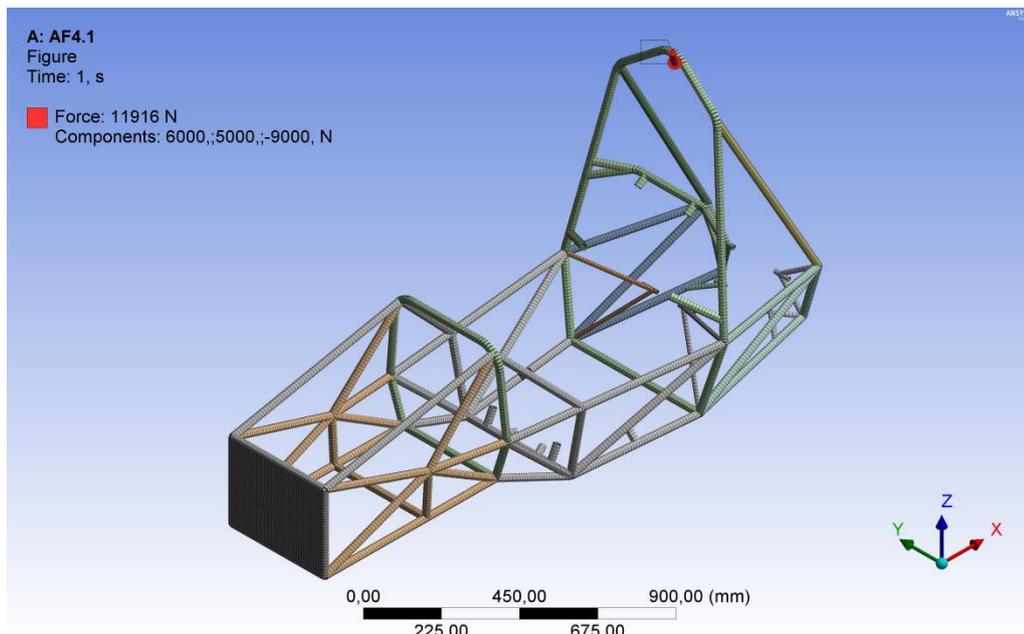


Рисунок 4.14 – Приложение нагрузки к главной дуге рамы

Второй рассматриваемый элемент рамы – передняя дуга. Исходя из данных в регламенте, к данной трубе также была приложена сила в размере 11916 Н. Исходя из результатов нагружения на рисунке ниже, мы видим, что максимальное перемещение по оси X составило 6,88 мм, что удовлетворяет требованиям регламента.

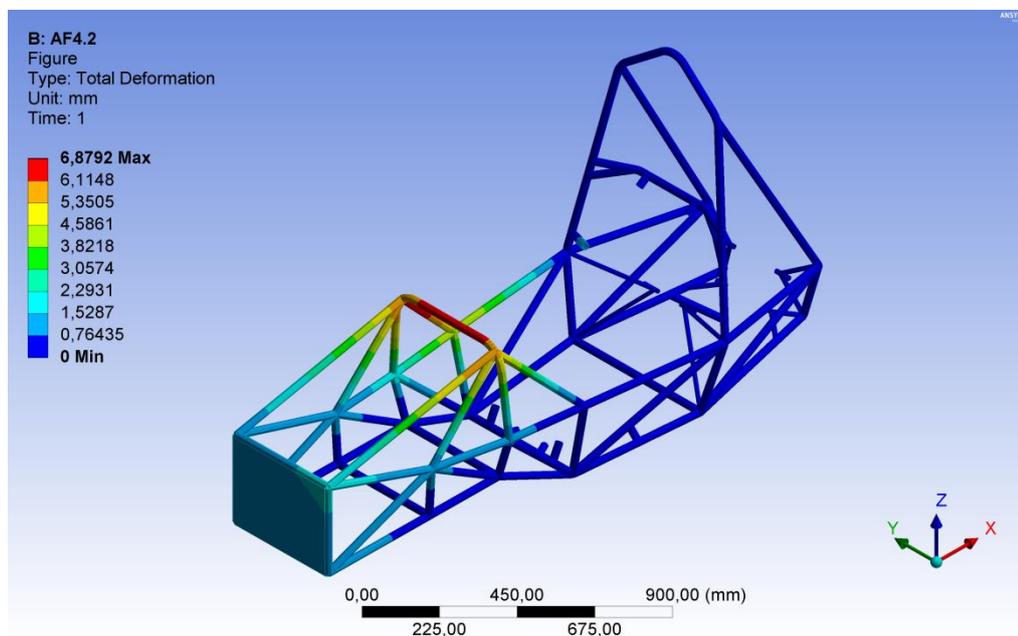
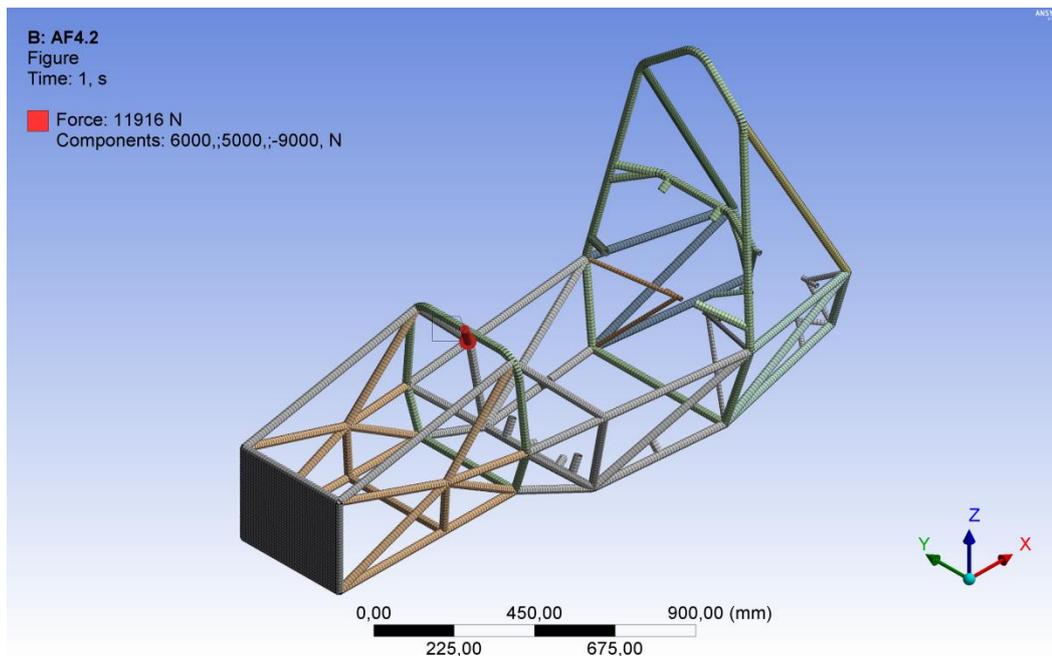


Рисунок 4.15 – Приложение нагрузки к передней дуге рамы

Третий рассматриваемый элемент рамы – боковая защитная структура, в нашем случае состоящая из 3 труб. Исходя из данных в регламенте, к данной структуре была приложена сила в размере 7000 Н. Исходя из результатов нагружения на рисунке ниже, мы видим, что максимальное перемещение по оси Y составило 4,77 мм, что удовлетворяет требованиям регламента.

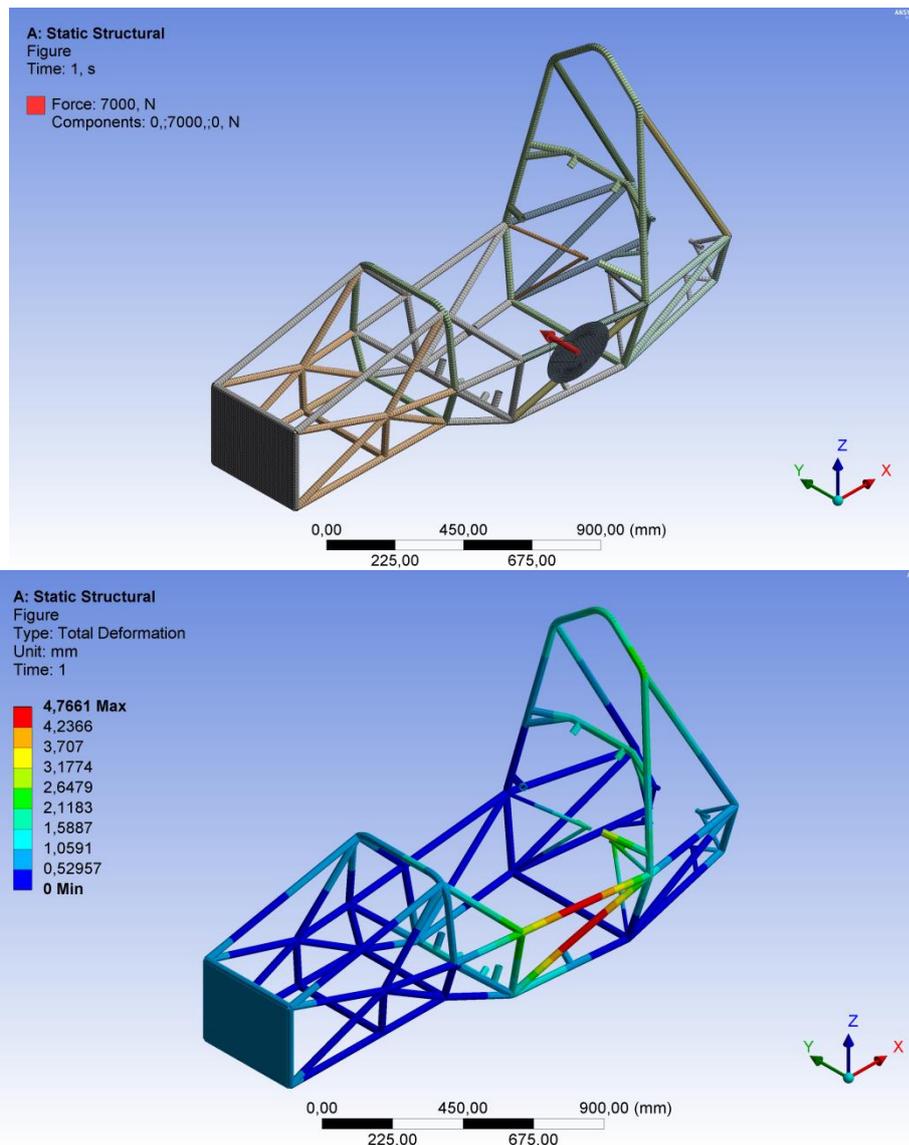


Рисунок 4.16 – Приложение нагрузки к боковой защитной структуре рамы

Четвертый рассматриваемый элемент рамы – передняя перегородка, в нашем случае состоящая из 4 труб. Исходя из данных в регламенте, к данной структуре была приложена сила в размере 7000 Н. Исходя из результатов нагружения на рисунке ниже, мы видим, что максимальное перемещение по оси X составило 8,21 мм, что удовлетворяет требованиям регламента.

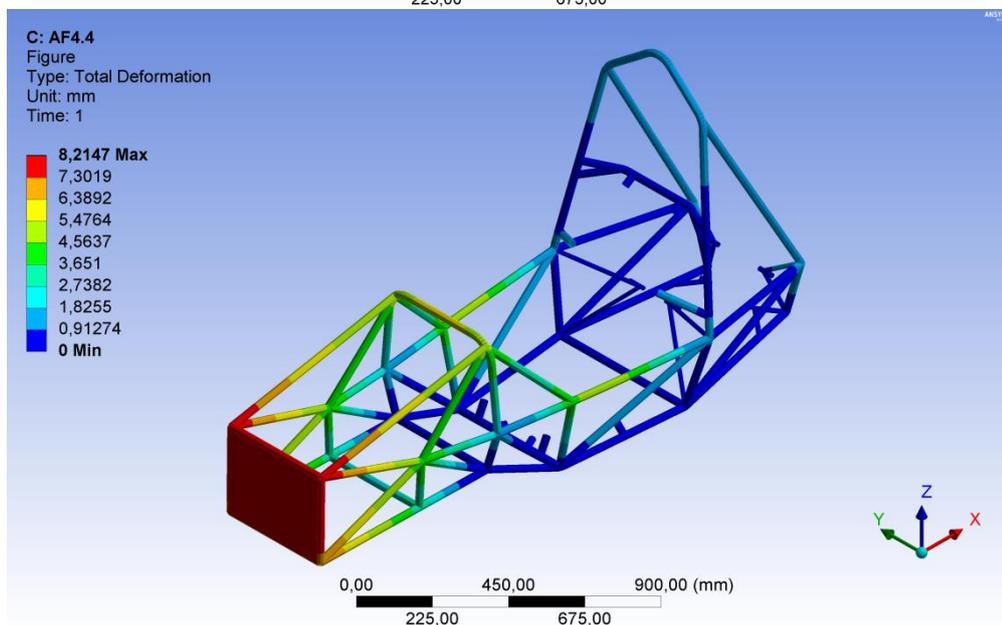
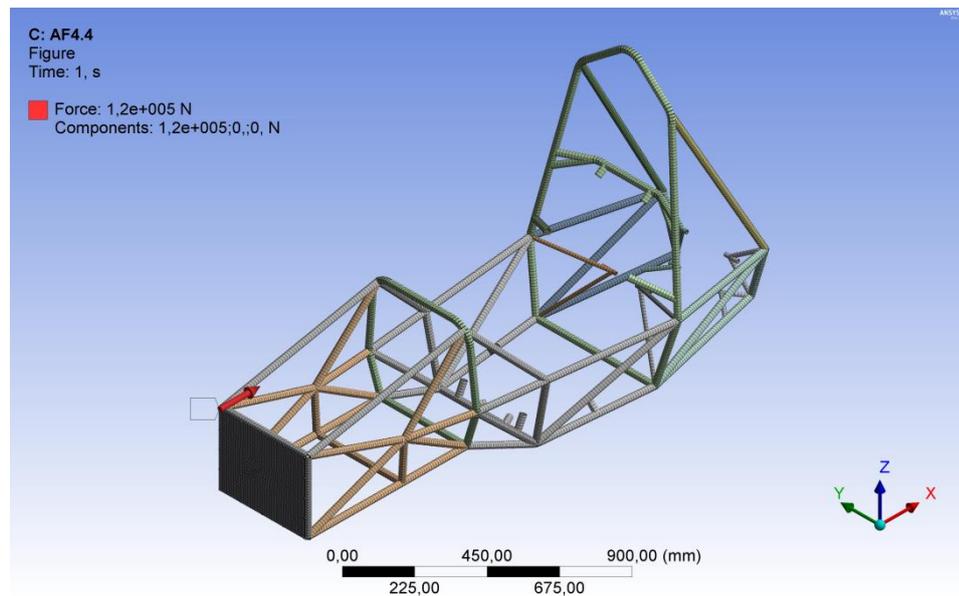


Рисунок 4.17 – Приложение нагрузки к передней перегородке рамы

Пятый рассматриваемый элемент рамы – плечевая труба. Исходя из данных в регламенте, к данной структуре была приложена сила в размере 7000 Н. Исходя из результатов нагружения на рисунке ниже, мы видим, что максимальное перемещение по оси X составило 11,093 мм, что удовлетворяет требованиям регламента.

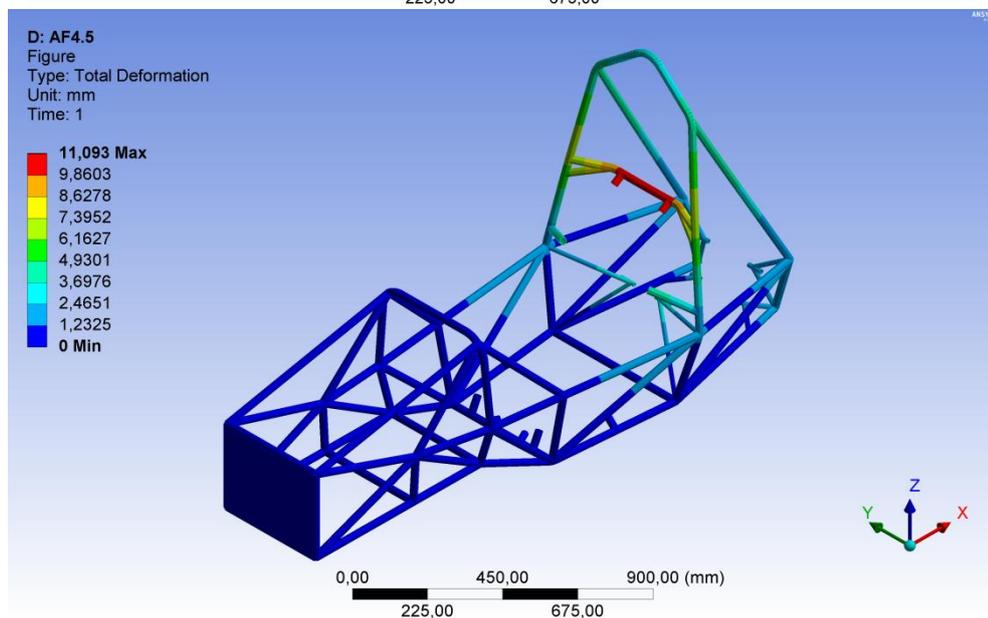
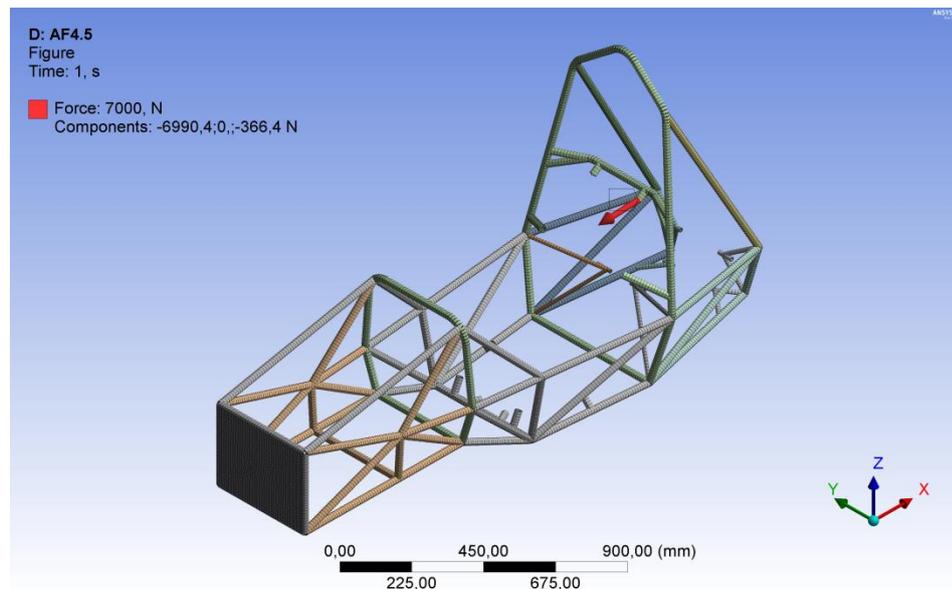


Рисунок 4.18 – Приложение нагрузки к трубе-защите плеч водителя

Шестой рассматриваемый элемент рамы – вновь боковая защитная структура, но в этот раз нагрузка прикладывается сразу в нескольких плоскостях. Исходя из данных в регламенте, к данной структуре по оси Y была приложена нагрузка в размере 13000 Н, а по оси Z – 6500 Н. Исходя из результатов нагружения на рисунке ниже, мы видим, что максимальное перемещение составило 3,37 мм, что удовлетворяет требованиям регламента.

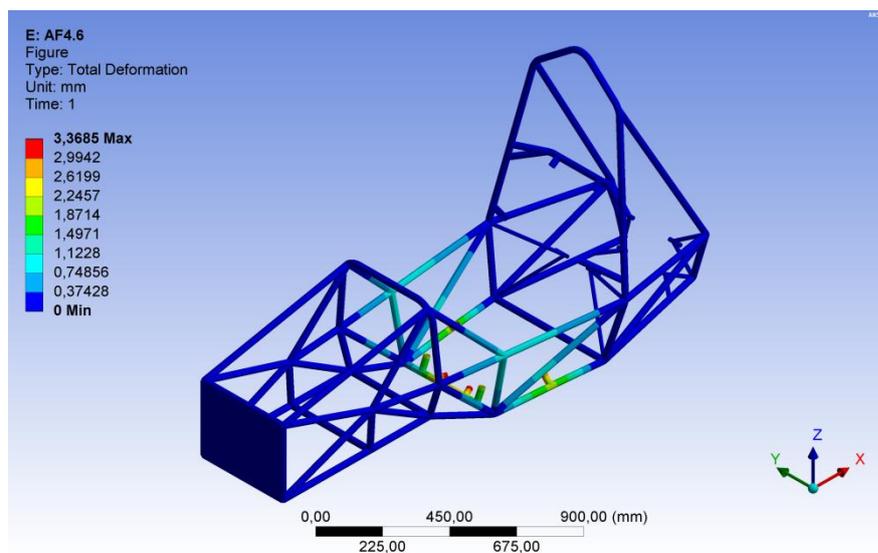
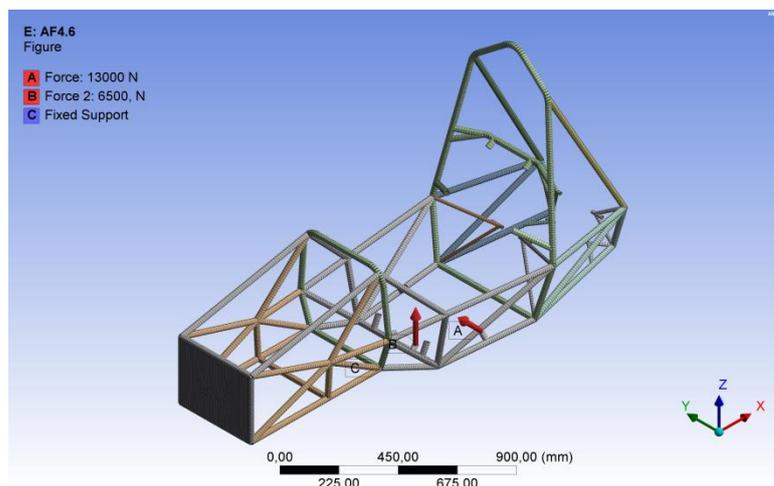


Рисунок 4.19 – Приложение нагрузки к боковой защитной структуре рамы в двух плоскостях

Седьмой рассматриваемый элемент рамы – вновь передняя перегородка, но в этот раз была приложена большая сила. Исходя из результатов нагружения на рисунке ниже, мы видим, что максимальное перемещение составило 24,75 мм, что удовлетворяет требованиям регламента.

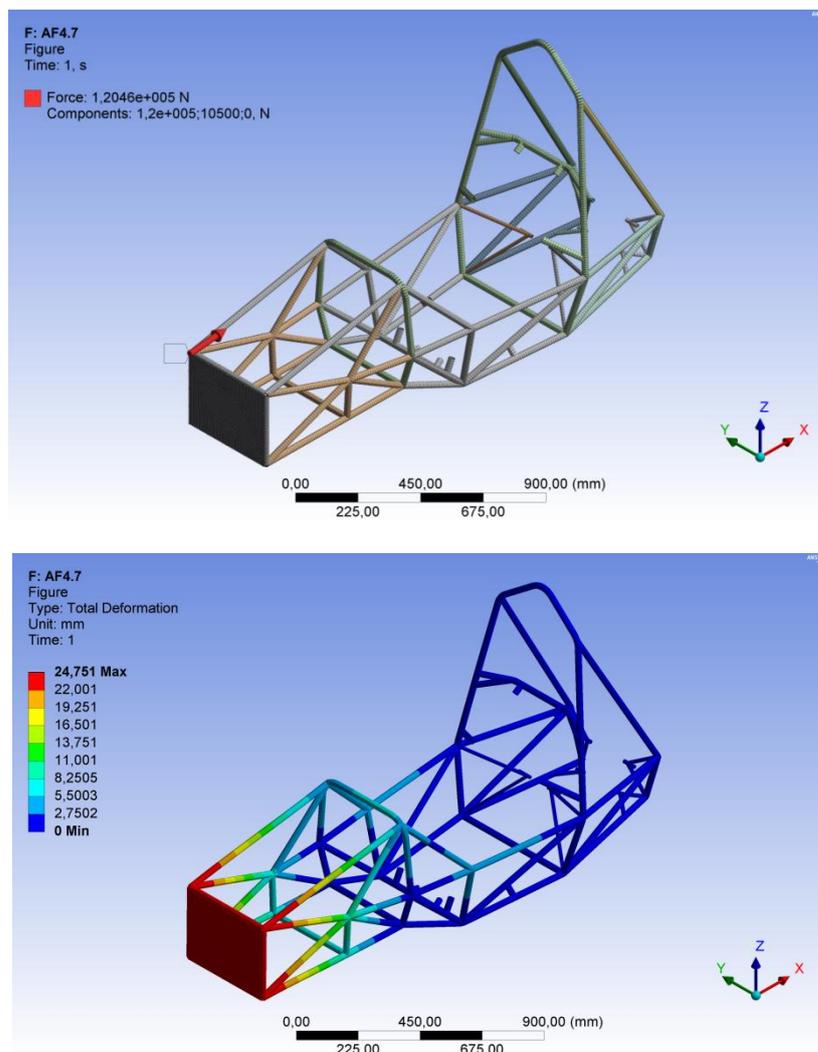


Рисунок 4.20 – Приложение нагрузки к передней перегородке рамы

#### 4.2.2 Оптимизация конструкции рамы

Для оптимизации рамной конструкции был также использован пакет «ANSYS». В рамках данной работы в рамной конструкции были изменены толщины стенок труб разных элементов рамы. Исходным вариантом для нагружения – своеобразной точкой отсчета - стала конструкция рамы, в которой главные дуги имеют толщину стенки 2,5мм, передний и задний боковые элементы с толщиной стенки 1,5мм, а все остальные основные конструкции с толщиной стенки 1,8мм. Как и ранее нагрузка при симуляции поворота составила 3000Н, а при повороте – 2000Н.

Данная рама отличается от рамы, использованной в первичном расчете на кручение, наличием одной диагональной трубы вместо двух в боковой передней конструкции.

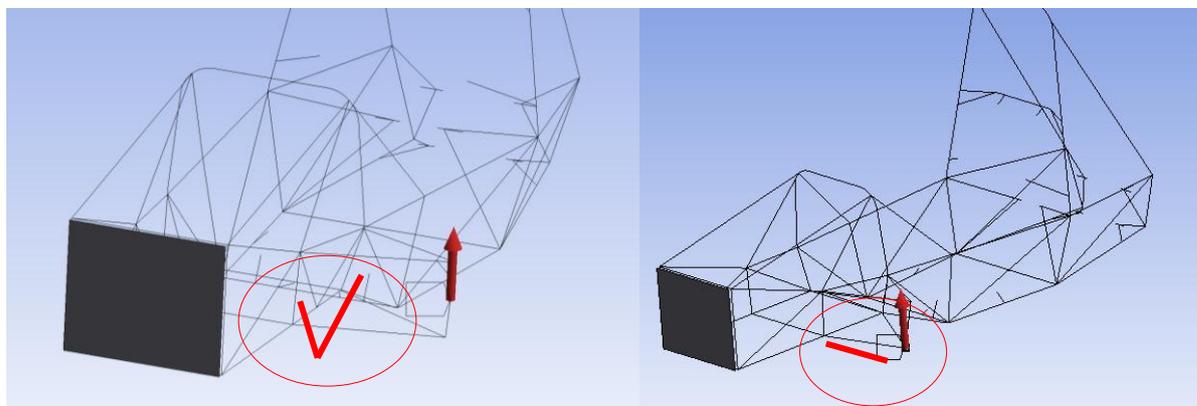


Рисунок 4.21 – Разница в конструкции рамы между первичным и вторичным нагружением

Первым вариантом для анализа была рассмотрена ситуация во время вхождения автомобиля в поворот. В данной ситуации прикладываемая сила будет направленная вертикально вверх, а с другой стороны также симметрично, но вниз. Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.22), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 2,9 мм.

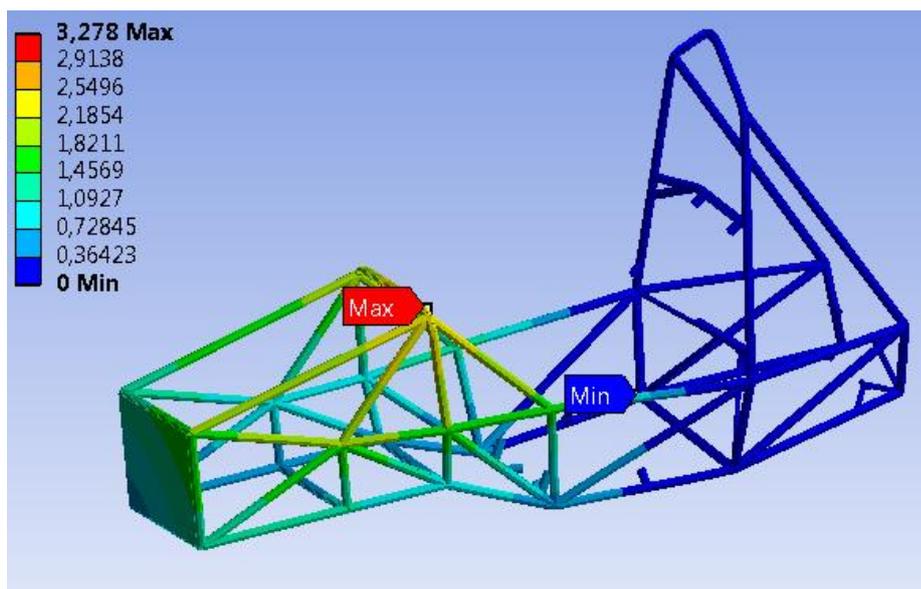


Рисунок 4.22 – Нагрузка рамы «точки отсчета» при вхождении в поворот

Первым вариантом для сравнения стала рама, в которой толщина стенок главных дуг осталась без изменения. Были изменены толщины стенок передней и задней боковой структур с 1,5мм до 1,2мм. А также толщина стенки боковой защитной структуры и всех распорок с 1,8мм до 1,5мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 3.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.23), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 3,312 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 0,412 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

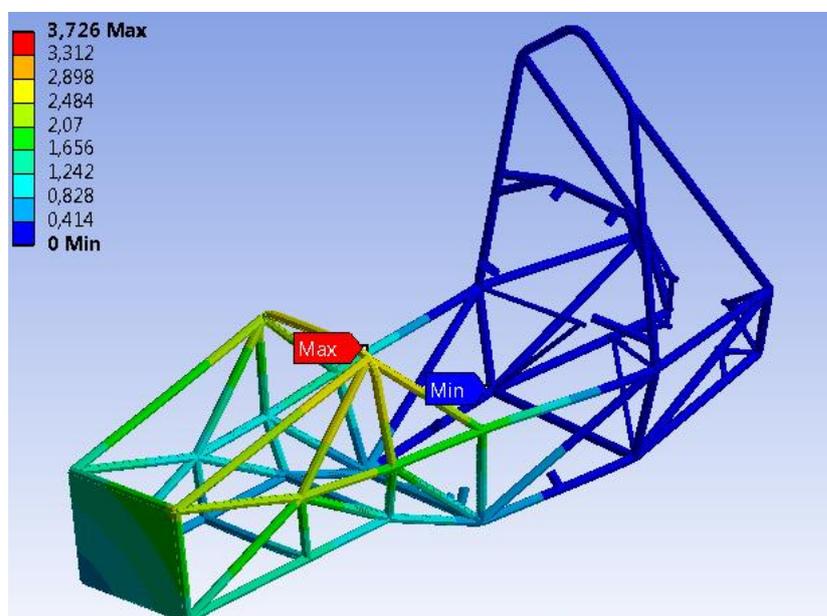


Рисунок 4.23 – Результаты нагружения первого варианта

Вторым вариантом для сравнения стала рама, в которой толщина стенок главных дуг осталась без изменения. Были изменены толщины стенок боковой защитной структуры и всех распорок с 1,8мм до 1,2мм. Толщина стенки передней и задней боковых структур осталась без изменения (1,5 мм). Результаты нагружения представлены на рисунке 4.

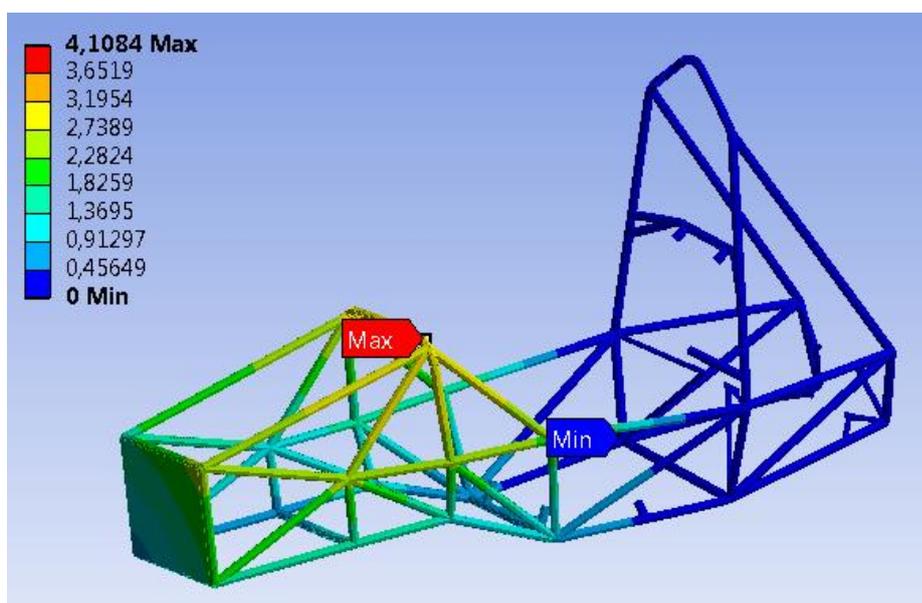


Рисунок 4.24 – Результаты нагружения второго варианта

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.24), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 3,652 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 0,752 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

Третьим вариантом для сравнения стала рама, в которой толщина стенок главных дуг осталась без изменения. Были изменены толщины стенок всех остальных труб на 1,2мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.25.

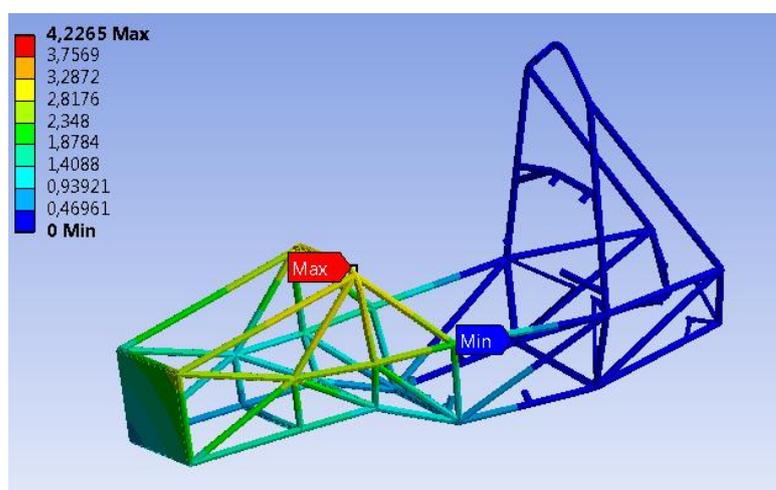


Рисунок 4.25 – Результаты нагружения третьего варианта

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.25), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 3,757 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 0,857 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

Четвертым вариантом для сравнения с исходным вариантом стала рама, в которой была изменена толщина стенки главных дуг с 2,5мм на 2мм. Толщина стенки переднего и заднего боковых элементов осталась 1,5мм, а у всех остальных труб конструкции - 1,8мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.26.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.26), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 2,99 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 0,09 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

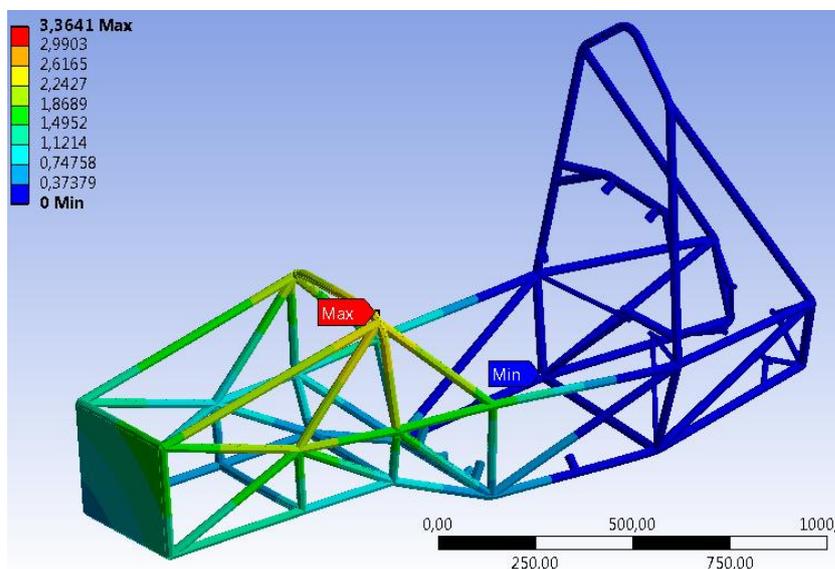


Рисунок 4.26 – Результаты нагружения четвертого варианта

Пятым вариантом для сравнения с исходным вариантом стала рама, в которой была изменена толщина стенки главных дуг с 2,5мм на 2мм. Толщина стенки переднего и заднего боковых элементов осталась 1,5мм, а у

всех остальных труб конструкции толщина стенки с 1,8мм снизилась до 1,2мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.27.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.27), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 3,736 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 0,836 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

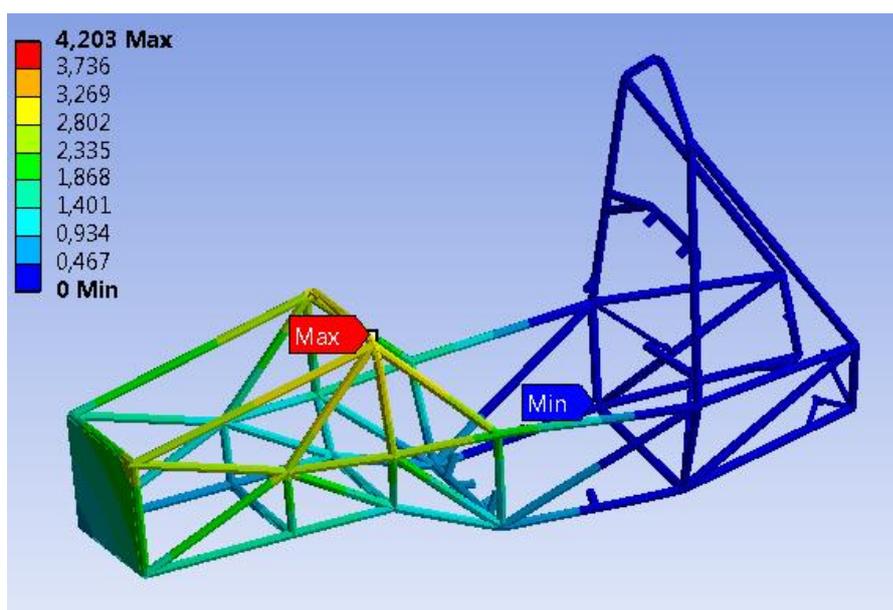


Рисунок 4.27 – Результаты нагружения пятого варианта

Шестым вариантом для сравнения с исходным вариантом стала рама, в которой была изменена толщина стенки главных дуг с 2,5мм на 2мм. Толщина стенки переднего и заднего боковых элементов изменилась с 1,5мм на 1,2мм, а у всех остальных труб конструкции толщина стенки с 1,8мм снизилась до 1,5мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.28.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.28), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 3,402 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 0,502 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

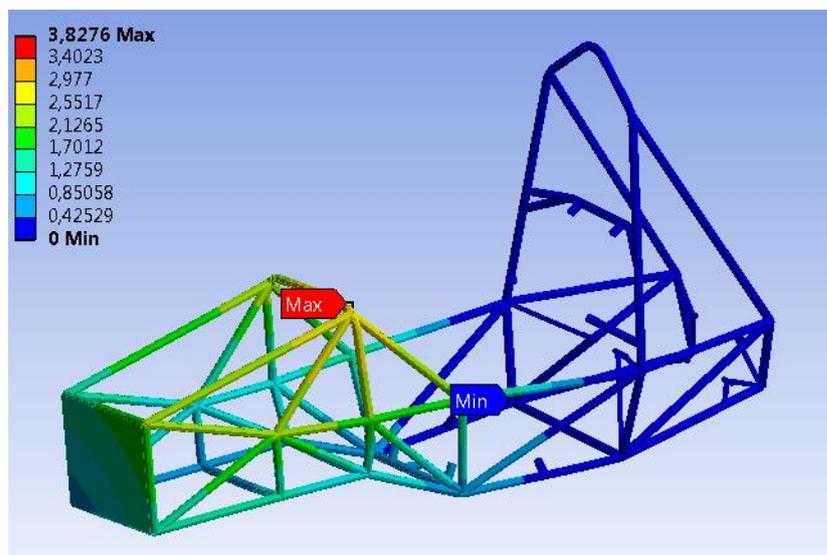


Рисунок 4.28 – Результаты нагружения шестого варианта

Седьмым и последним вариантом для сравнения с исходным вариантом стала рама, в которой была изменена толщина стенки главных дуг с 2,5мм на 2мм. А толщина стенки всех остальных труб снизилась до 1,2мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.29.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.29), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 3,852 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 0,952 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

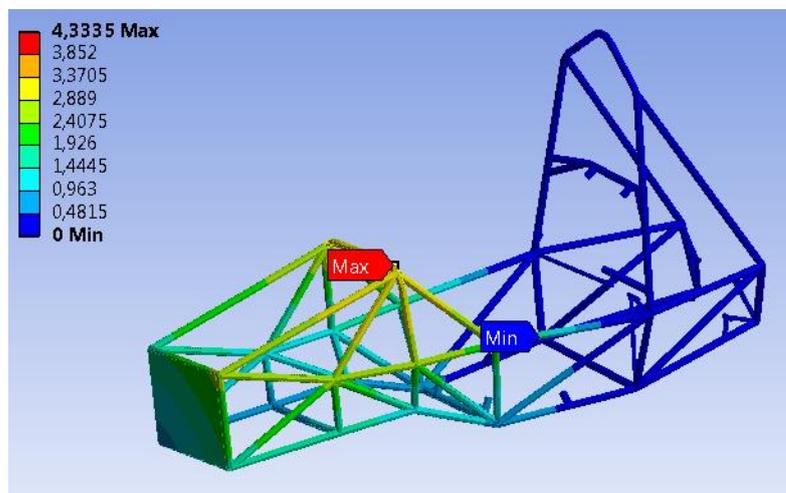


Рисунок 4.29 – Результаты нагружения седьмого варианта

Вторым вариантом для анализа была рассмотрена ситуация во время торможения автомобиля. В данной ситуации прикладываемая сила будет направлена по рычагу передней подвески. Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.30), мы видим, что общее максимальное перемещение при торможении составило 6,74 мм.

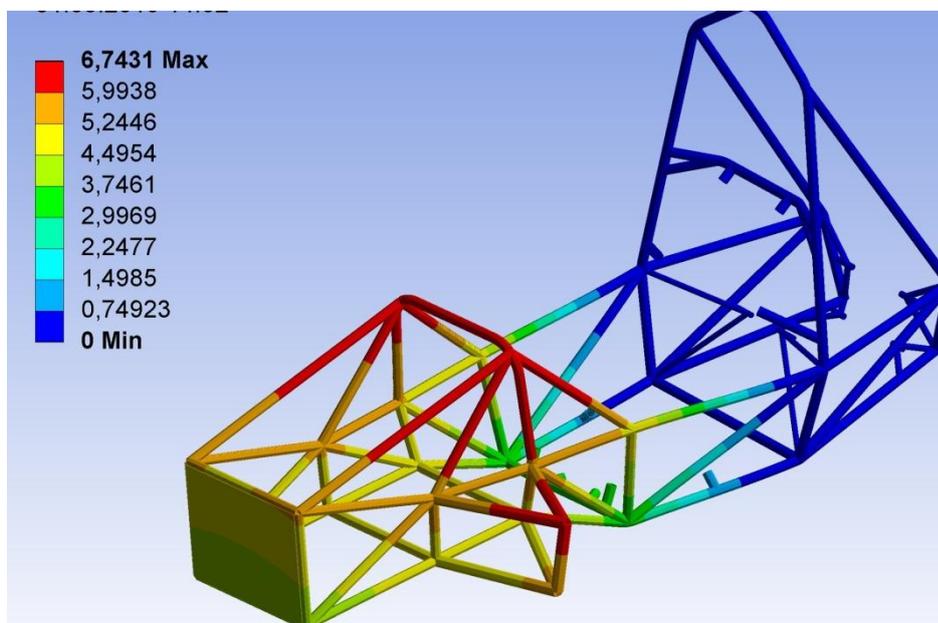


Рисунок 4.30 – Нагрузка рамы «точки отсчета» при торможении

Первым вариантом для сравнения стала рама, в которой толщина стенок главных дуг осталась без изменения. Были изменены толщины стенок передней и задней боковой структур с 1,5мм до 1,2мм. А также толщина стенки боковой защитной структуры и всех распорок с 1,8мм до 1,5мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.31.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.31), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 7,78 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 1,04 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

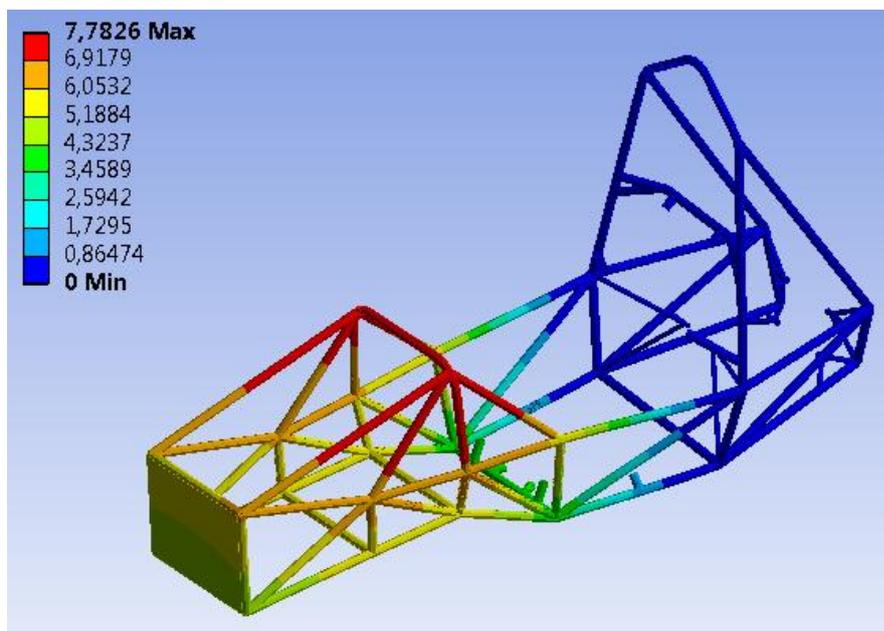


Рисунок 4.31 – Результаты нагружения первого варианта

Вторым вариантом для сравнения стала рама, в которой толщина стенок главных дуг осталась без изменения. Были изменены толщины стенок боковой защитной структуры и всех распорок с 1,8мм до 1,2мм. Толщина стенки передней и задней боковых структур осталась без изменения (1,5 мм). Результаты нагружения представлены на рисунке 4.32.

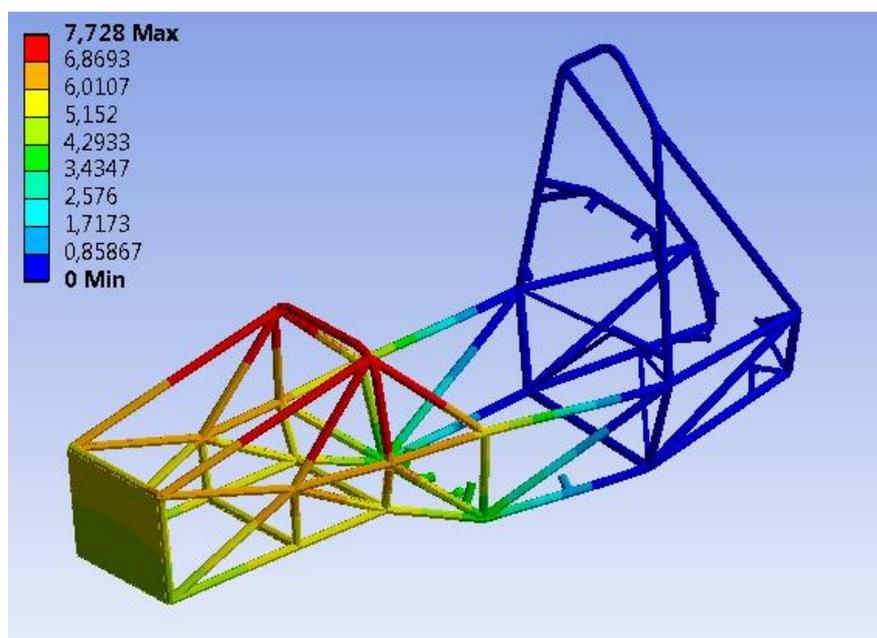


Рисунок 4.32 – Результаты нагружения второго варианта

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.32), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 7,73 мм. В

сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 0,99 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

Третьим вариантом для сравнения стала рама, в которой толщина стенок главных дуг осталась без изменения. Были изменены толщины стенок всех остальных труб на 1,2мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.33.

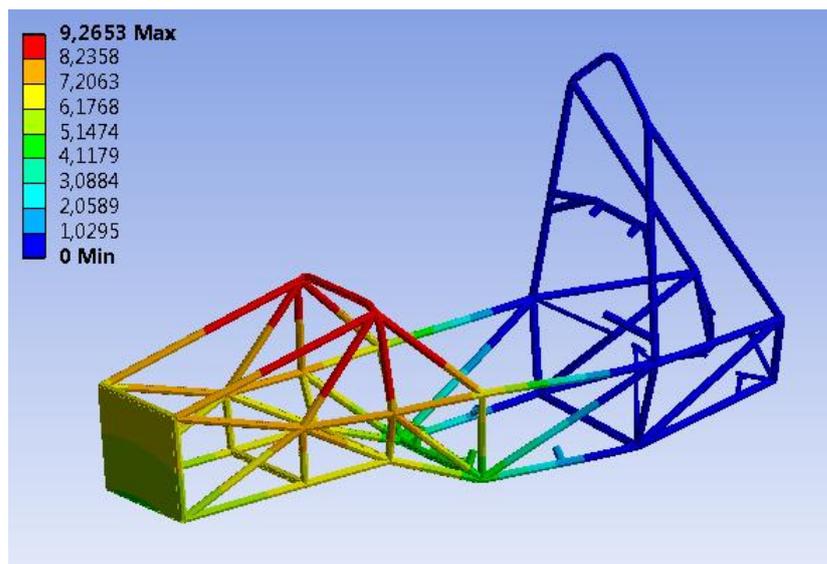


Рисунок 4.33 – Результаты нагружения третьего варианта

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.33), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 9,26 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 2,52 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

Четвертым вариантом для сравнения с исходным вариантом стала рама, в которой была изменена толщина стенки главных дуг с 2,5мм на 2мм. Толщина стенки переднего и заднего боковых элементов осталась 1,5мм, а у всех остальных труб конструкции - 1,8мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.34.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.34), мы видим, что общее максимальное перемещение при торможении составило 6,81 мм. В

сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 0,07 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

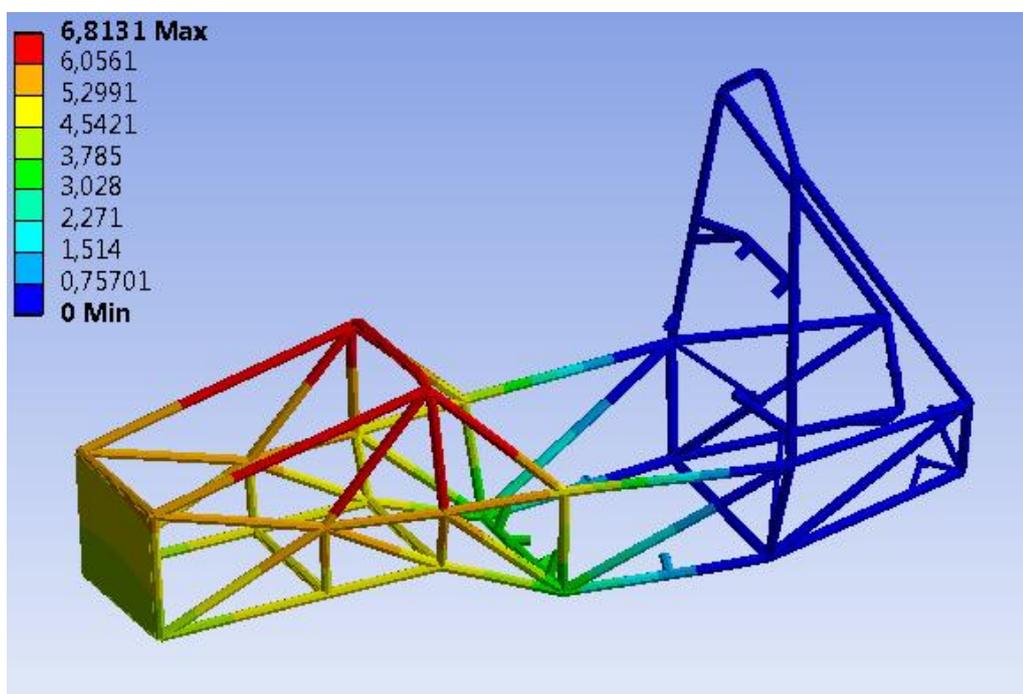


Рисунок 4.34 – Результаты нагружения четвертого варианта

Пятым вариантом для сравнения с исходным вариантом стала рама, в которой была изменена толщина стенки главных дуг с 2,5мм на 2мм. Толщина стенки переднего и заднего боковых элементов осталась 1,5мм, а у всех остальных труб конструкции толщина стенки с 1,8мм снизилась до 1,2мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.35.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.35), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 9,29 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 2,55 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

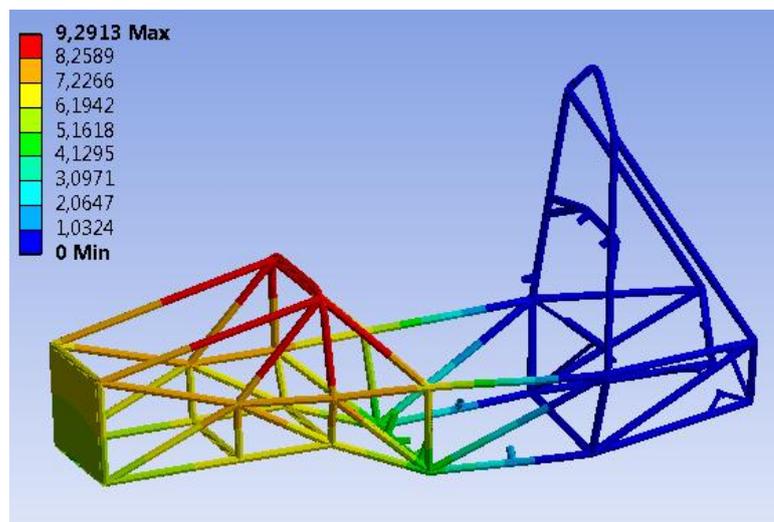


Рисунок 4.35 – Результаты нагружения пятого варианта

Шестым вариантом для сравнения с исходным вариантом стала рама, в которой была изменена толщина стенки главных дуг с 2,5мм на 2мм. Толщина стенки переднего и заднего боковых элементов изменилась с 1,5мм на 1,2мм, а у всех остальных труб конструкции толщина стенки с 1,8мм снизилась до 1,5мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.36.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.36), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 7,86 мм. В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 1,12 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

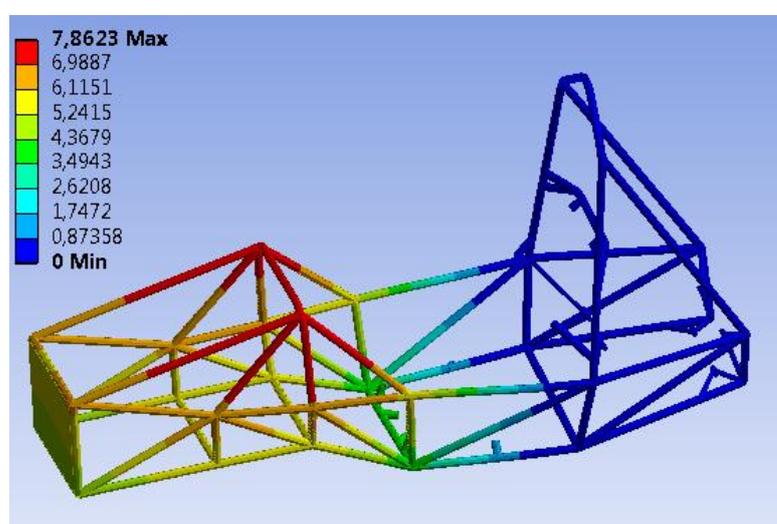


Рисунок 4.36 – Результаты нагружения шестого варианта

Седьмым и последним вариантом для сравнения с исходным вариантом стала рама, в которой была изменена толщина стенки главных дуг с 2,5мм на 2мм. А толщина стенки всех остальных труб снизилась до 1,2мм. Результаты нагружения представлены на рисунке 4.37.

Исходя из результатов нагружения (рисунок 4.37), мы видим, что общее максимальное перемещение при повороте составило 9,35 мм, В сравнении с исходным вариантом мы наблюдаем увеличение перемещения при повороте всего лишь на 2,61 мм, что никак не повлияет на жесткость рамной конструкции в реальных условиях.

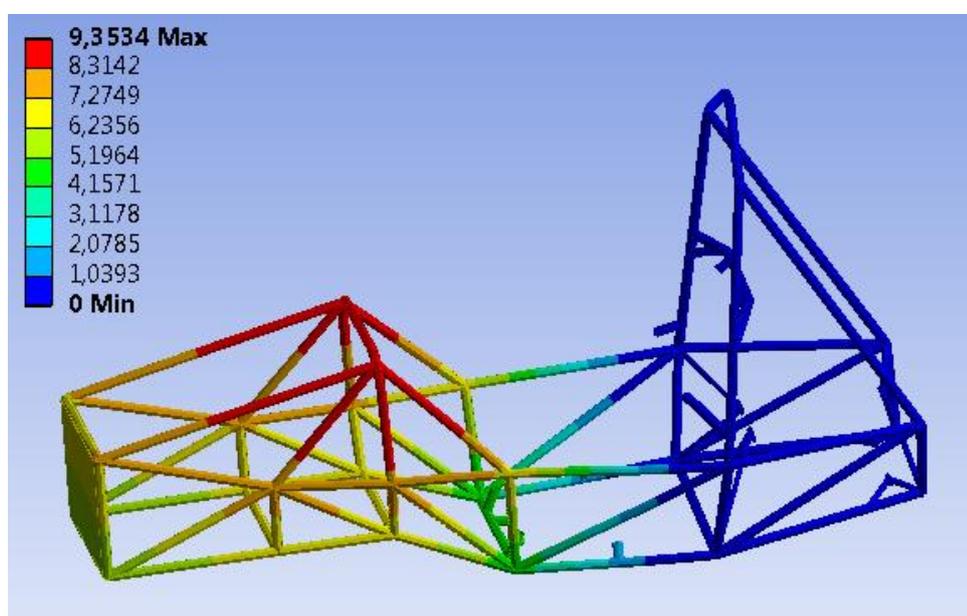


Рисунок 4.37 – Результаты нагружения седьмого варианта

Проанализировав все вышеописанные результаты, мы видим, что наиболее высокое перемещение при торможении и повороте относительно исходного варианта получается при снижении толщины стенок всех имеющихся труб конструкции, но не выходя за пределы разрешенных толщин в регламенте FSAE 2019 или Rules 2019. Дельта перемещения составляет в среднем 1 мм, что находится в пределах допуска конструкции.

Одним из наиболее значимых критериев для проведения данного анализа и изменения толщины стенок труб стало снижение массы общего автомобиля и рамной конструкции в целом. Так, масса исходного варианта

конструкции - главные дуги имеют толщину стенки 2,5мм, передний и задний боковые элементы с толщиной стенки 1,5мм, а все остальные основные конструкции с толщиной стенки 1,8мм – составила 28 кг. Масса же последнего измененного варианта (седьмого) - изменена толщина стенки главных дуг с 2,5мм на 2мм; толщина стенки всех остальных труб снизилась до 1,2мм – снизилась до 19,9 кг.

В итоге, произведя все эти изменения с толщинами, мы экономим 8 кг веса на одной только раме. При этом можно сказать, что жесткость конструкции существенно не меняется.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены необходимые требования для проектирования рамной конструкции гоночного болида класса «Формула Студент». Был произведен анализ существующих рамных конструкций данного типа, а также анализ рамных конструкций гоночных болидов команды Togliatti Racing. Была описана технология разработки пространственной рамы и технологическая оснастка для гоночного болида класса Формула Студент. Конструкция рамы удовлетворяет всем техническим требованиям.

Предложена новая методика расчета рамной конструкции на кручение, позволяющая рассчитать жесткость конструкции в ее любой точке. Проведена оптимизация рамной конструкции с использованием пакета конечно-элементного моделирования «ANSYS».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. SAE International [Электронный ресурс]// [URL:http://students.sae.org/cds/formulaseries/](http://students.sae.org/cds/formulaseries/) (дата обращения: 21.02.2018)
2. FSAE RULES 2018 [Электронный ресурс]// [URL:http://www.fsaeonline.com/](http://www.fsaeonline.com/) (дата обращения: 19.11.2017)
3. FSG RULES 2019 [Электронный ресурс]// [URL:https://www.formulastudent.de/](https://www.formulastudent.de/) (дата обращения: 17.11.2018)
4. A. More, Design, Analysis and Optimization of Space Frame Chassis/ A. More, C. Chavan, N. Patil//International Journal of Engineering and Technology (IJET)
5. B. Subramanyam, Analysis of Formula Student Race Car / B. Subramanyam, M. Kollati, K. Praveen-Kumar//International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)
6. M. Rezaiee, Frame Nonlinear Analysis by Force Method / M. Rezaiee, N. Gharaei-Moghaddam//International Journal of Steel Structures 17(609-629 (2017)
7. P. Baskara, Design and optimization of FSAE chassis using FEA / P. Baskara, J. Chandradass//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 402 (2018)
8. S. Ravinder, Structural performance analysis of formula SAE car/ S. Ravinder // Jurnal Mekanikal December 2010, No. 31, 46-61:
9. P. Clarke, Technical Introduction for New Teams/ P. Clarke, 2014
10. William B., Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis/ William B., Riley and Albert R. George // SAE Technical Paper Series. – 2002 – 18с.
11. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. Т.3. - 8-е изд. Перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестокковой./ В.И. Анурьев. - М.: Машиностроение, 2001 . - 864 с.
12. Брюхов А.П., Оценка и оптимизация крутильной жесткости рамы болида «Формула Студент» ПНИПУ/ Брюхов А.П., Головин Д.В., Козырин Н.С. //

- Ежегодный журнал «Транспорт. Транспортные сооружения. Экология». – 2015. – 5-19 с.
13. Волкова, Е.И., Методика расчёта бизнес-презентации в рамках проекта Formula Student/ Волкова, Е.И., Двоеглазова, Н.А. // Ежегодный сборник трудов "Студенческие инженерные проекты".-2017. – 198-204с.
  14. Волкова, Е.И., Разработка пространственной рамы для гоночного болида Black Bullet/ Волкова, Е.И., Шерстобитова О.О. // VII выпуск журнала "Точная наука". -2017.-18-20 с.
  15. Иванов, А.С. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учебное пособие / А.С. Иванов, П.А. Давыденко, Н.П. Шамов. - М.: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 276 с.
  16. Имитация условий аварийного нагружения каркаса спортивного автомобиля класса «Формула Студент» / К.О. Гончаров, А.Л. Кулагин, А.В. Тумасов, Л.Н. Орлов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6
  17. Косов, Н.П. Технологическая оснастка: вопросы и ответы: Учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / Н.П. Косов, А.Н. Исаев, А.Г. Схиртладзе. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2007. — 304 с
  18. Лебедев, В. А. Технология машиностроения: Проектирование технологий изготовления изделий : учеб.пособие для вузов / В. А. Лебедев, М. А. Тамаркин, Д. П. Гепта. - Гриф УМО. - Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 361с.
  19. Марочник сталей и сплавов / сост. А. С. Зубченко [и др.] ; под ред. А. С. Зубченко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 2003. - 782с.
  20. Маталин А. А. Технология машиностроения : учеб.для студ. вузов, обуч. по спец. 151001 напр. "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроит. производств" / А. А. Маталин. - Изд. 3-е, стер. ; Гриф УМО. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2010. - 512 с.

21. 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.
22. Оснастка технологическая // URL:[https://ru.wikipedia.org/wiki/Оснастка\\_технологическая](https://ru.wikipedia.org/wiki/Оснастка_технологическая) (дата обращения: 12.04.2018)
23. Родионов В.Ф., Фиттерман Б.М. Проектирование легковых автомобилей. – М.: Машиностроение, 1980. – 479 с.
24. Суслов, А. Г. Технология машиностроения : учеб. для вузов / А. Г. Суслов. - 2-е изд., перераб. и доп. ; Гриф МО. - Москва : Машиностроение, 2007. - 429 с.
25. Шерстобитова О.О., Оптимизация технологической оснастки для изготовления рамных конструкций/ Шерстобитова О.О., Волкова Е.И. //Материалы II международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные вопросы и перспективные развития современной науки». – 2017. – 165-169 с.
26. Шерстобитова, О.О., Разработка модульной каркасно-сборочной технологической оснастки для производства элементов спортивно-гоночных автомобилей/ Шерстобитова, О.О., Мошко, Д.А. // Ежегодный сборник трудов "Студенческие инженерные проекты".-2017. – 205-207 с.
27. Горбацевич, А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие для вузов/ А.Ф. Горбацевич, В.А. Шкред. М: – ООО ИД «Альянс», 2007 – 256 с.
28. Основы технологии машиностроения [Электронный ресурс]: учебник / В. В. Клепиков [и др.]. - Москва : ИНФРА-М, 2017. - 295 с. (дата обращения: 15.04.2019)
29. Технология машиностроения : учеб. пособие для вузов / под ред. М. Ф. Пашкевича. - Минск : Новое знание, 2008. - 477 с.

30. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах Т2 (Под ред. А.Г. Косиловой 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985, 496 с., ил.).