

11МИНИСТЕРСТВО 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)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Эксплуатация транспортных средств

(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Оптимизация компоновки основных элементов конструкции рамы  
болида «Формула Студент» и их геометрических параметров по критерию  
жесткости

Студент

О.О. Шерстобитова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

канд. техн. наук, доцент А.В. Бобровский

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

Тольятти 2021

## Содержание

Введение.....	3
1 Анализ существующих требований обеспечения жесткости рамы .....	5
1.1 Требования Регламента FS Rules 2021.....	5
1.2 Анализ типовых решений несущих рамных конструкций.....	13
1.3 Анализ эффективности альтернативных решений несущих конструкций .....	21
2 Теоретические аспекты компоновочных решений основных элементов несущих конструкций в серии «Formula Student» .....	30
2.1 Триангуляция (фронтальная жесткость).....	30
2.2 Крутильная жесткость .....	31
2.3 Минимизация веса .....	35
2.4 Материал .....	37
2.5 Точки подвески в узлах рамы .....	39
2.6 Конструктив.....	39
3 Математическое моделирование процессов нагружения несущих конструкций .....	56
3.1 Анализ рам болидов класса «Formula Student» на кручение при повороте .....	56
3.2 Анализ рам болидов класса «Formula Student» на кручение при торможении.....	60
4 Оптимизация конфигурации основных элементов несущей конструкции болидов «Формула Студент» .....	66
4.1 Построение эффективной конструкции рамы болида «eScorpion 2021».....	66
4.2 Прочностные исследования жёсткости рамы болида eScorpion 2021 ....	68
4.3 Практические рекомендации при проектировании рамы .....	76
Заключение .....	79
Список используемых источников.....	81

## Введение

Формула Студент – международные студенческие соревнования, где студенты собственными силами должны спроектировать и построить гоночный болид, который будет соответствовать всем требованиям регламента соревнований. Данные соревнования позволяют развить инженерное мышление у студентов и вырастить квалифицированных специалистов, готовых к решению любых творческих задач.

Одним из самых важных моментов при построении болида является проектирование рамы, так как она является основой всего болида.

Перед началом проектирования рамы необходимо внимательно изучить требования регламента, так как если рама имеет не соответствия, то команда не получит необходимую наклейку для доступа к динамическим дисциплинам. В большинстве случаев исправить не соответствие регламенту невозможно после изготовления рамы. Также в начале проектирования рамы необходимо учитывать все основные элементы болида и приблизительно понимать, где они будут располагаться, сколько свободного пространства для них нужно. Это необходимо для того, чтобы правильно расположить центр тяжести, так как при проверке на опрокидывание болид наклоняют под углом 60 градусов, в этот момент все 4 колеса должны соприкоснуться с поверхностью.

При проектировании рамы необходимо понимать смысловую нагрузку каждой трубы в конструкции, так как именно это позволяет построить достаточно легкую конструкцию с необходимой жесткостью.

В погоне за минимальным весом конструкции, забывают про жесткость рамы, и исключают необходимые трубы. А начинающие команды, наоборот стремятся к большей жесткости конструкции, добавляя в раму не нужные трубы, тем самым утяжеляя раму, что приводит к снижению технических характеристик болида.

Поэтому в данной работе будут подробно рассмотрены все элементы конструкции рамы и их геометрические параметры, а также проведен прочностной анализ каждой части рамы с различным вариантом расположения труб. Данный анализ позволит понять, как влияет геометрия секций рамы на жесткость конструкции.

Цель работы: дать практические рекомендации по разработке рамных конструкций болидов класса «Формула Студент».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить требования регламента «Formula Student» к построению рамной конструкции.
2. Рассмотреть аналоги типовых решений несущих рамных конструкций.
3. Разработать теоретические аспекты расчета прочности рамы на кручение.
4. Промоделировать существующие рамные конструкции команды «Togliatti Racing Team».
5. Провести сравнительный анализ существующих рамных конструкций команды «Togliatti Racing Team» и выбрать оптимальный.

# 1 Анализ существующих требований обеспечения жесткости рамы

## 1.1 Требования Регламента FS Rules 2021

Прежде чем приступит к проектированию рамы, необходимо определиться с двумя важными пунктами:

1. Какие шины будут использоваться?
2. Какой двигатель будет использоваться?

После определения этих двух параметров можно приступить к изучению регламента и разработке рамы.

Сразу стоит обратить внимание на три шаблона: шаблон-кокпита, шаблон-поперечного сечения кокпита и шаблон-перцентилия при начале разработки своей рамы, так как если рама не будет удовлетворять этим шаблонам, то на соревнованиях команда не пройдет техническую инспекцию из-за несоблюдения требований регламента.

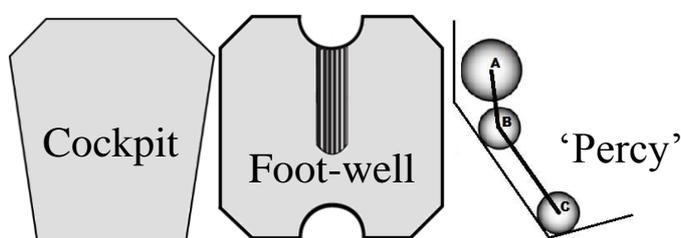


Рисунок 1 – Шаблоны «Formula Student»

### 1.1.1 Шаблон – кокпита

Шаблон – кокпита контролирует минимальный размер проема кокпита для того, чтобы пилот мог быстро вылезти из болида. Шаблон должен вертикально пройти от отверстия кокпита вниз до верхней части ударной структуры в горизонтальном положении. Если боковая ударная структура не сделана из труб, шаблон должен помещаться до 320 мм выше нижней точки шасси между передней и основной дугой. При проверке этим шаблоном

можно демонтировать руль, рулевую колонку, сидение и внутренние обивки, иные детали можно снять лишь только в том случае, если они связаны с рулевым управлением. [1]

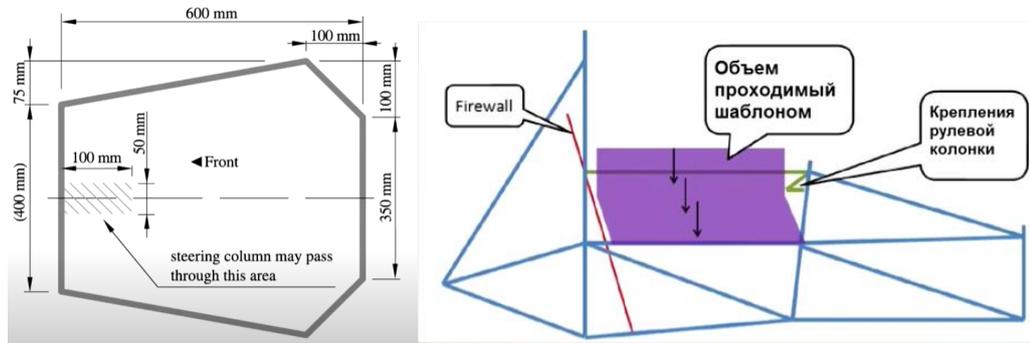


Рисунок 2 – Шаблон кокпита

### 1.1.2 Шаблон поперечного сечения

Шаблон должен беспрепятственно проходить от задней части передней дуги до точки, отдаленной назад на 100 мм от задней поверхности педали, находящейся в нерабочем положении. При проверке данным шаблоном можно снимать только рулевое колесо. При проверке шаблон может перемещаться вверх – вниз, но все время находиться в вертикальном положении. Ни одна часть шаблона не должна выходить за пределы рамы. [1]

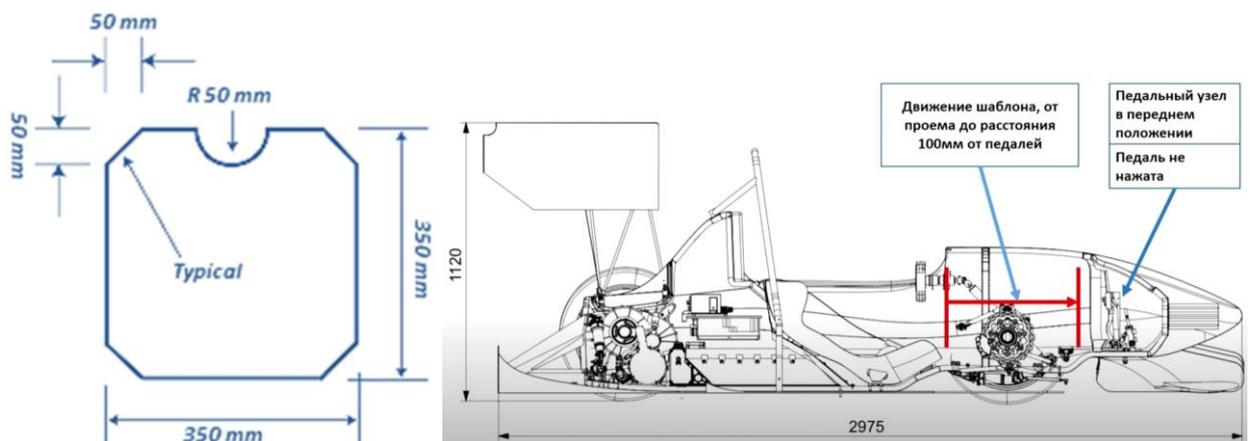


Рисунок 3 – Шаблон поперечного сечения кокпита

### 1.1.3 Шаблон – «Percy»

Шаблон «Percy» – 95 – перцентиль мужчины. Это статистический термин означает, что если взять генеральную сумму всех мужчин, то 95% из них окажутся такими же или меньшими по габаритам, чем указанный перцентиль.

В регламенте в пункте T4.3.4 говорится, как должен быть посажен шаблон: сидение должно находиться в заднем положении, педали в максимальном переднем положении, круг, символизирующий ягодицы должен находиться на соответствующей горизонтальной поверхности сидения, расстояние между педалями не менее 915 мм. Круг, символизирующий плечевой, должен опираться на спинку сидения. Круг, символизирующий голову пилота в шлеме, должен находиться на расстоянии 25 мм от подголовника. [1]

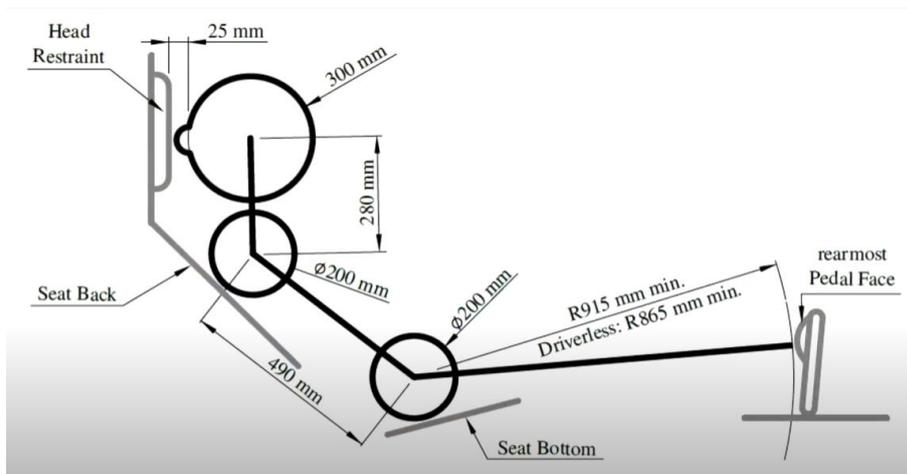


Рисунок 4 – Шаблон «Percy»

При посадке шаблона, а также всех водителей должен соблюдаться обязательный 50 мм зазор над шлемом, измеренный от линии, проведенной между верхней точкой главной дуги и верхней точки передней дуги. Так же 50 мм от линии проведенной между верхней точки главной дуги и нижней точки распорки главной дуги, если распорки находятся сзади главной дуги. И

не далее задней поверхности главной дуги, если распорки главной дуги находятся спереди главной дуги.

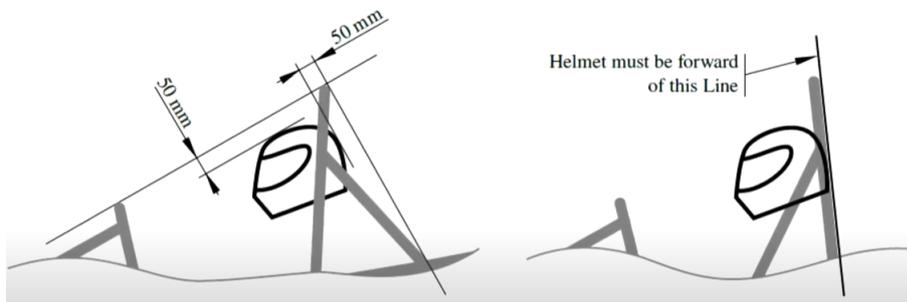


Рисунок 5 – Минимальный зазор между шлемом

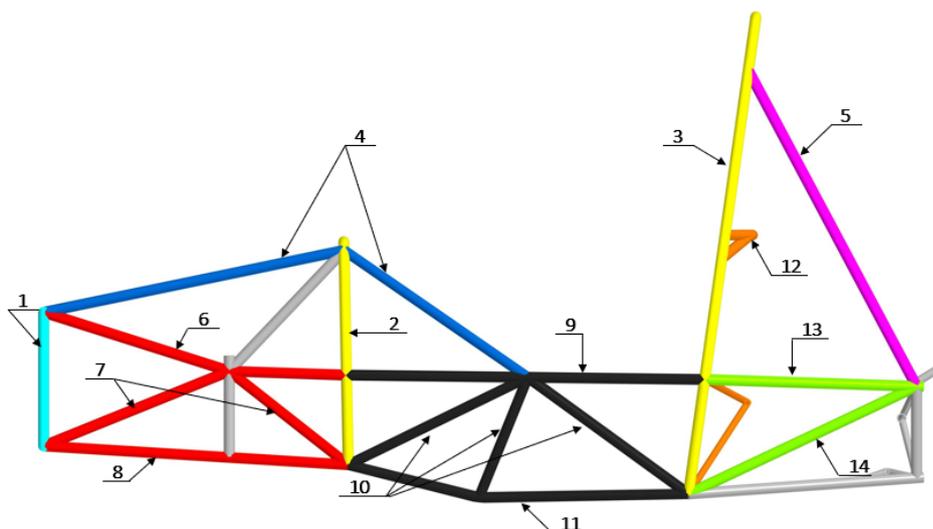
На рисунке 6 показан пример, как проводят проверку минимального зазора на соревнованиях «Formula Student Germany».[1] Проверку проводят несколько судей. Одни должен выставить и держать в правильном положении ногу 95-перцентиля. Второй правильно держать голову шаблона на расстоянии 25 мм от подголовника. Третий уровнем соединят главную дугу и переднюю, в данном случае монокок, поэтому замер будет производиться от карбона. И четвертый произведет замер от шаблона до уровня.



## Рисунок 6 – Проверка минимального зазора между шлемом на соревнованиях «Formula Student Germany»

### 1.1.4 Основные элементы конструкции

По регламенту основная конструкция рамы болида должна состоять из главной и передней дуги, из распорок основных дуг и их опоры, из боковой защитной конструкции, передней перегородки и ее опоры.



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

## Рисунок 7 – Спецификация труб в раме

Кроме минимального набора труб, есть минимальные требования к материалу. В качестве материала для изготовления рамы может быть использована как сталь, так и альтернативный материал. В таблице 1.1 представлены минимальные требования к материалам определенных частей основной структуры, если она изготавливается из стали.

Таблица 1 – Минимальные требования к трубам

Наименование	Минимальная толщина	Минимальная площадь	Минимальная площадь момента инерции
Главная и передняя дуги, монтажная перемычка плечевого ремня	2мм	175мм <sup>2</sup>	11 320мм <sup>4</sup>
Зона бокового удара, передняя перегородка, распорки основных дуг, крепление ремней безопасности.	1,2мм	119мм <sup>2</sup>	8509мм <sup>4</sup>
Опоры передней перегородки, опоры распорок главной дуги.	1,2мм	91мм <sup>2</sup>	6695мм <sup>4</sup>

В отличие от предыдущих версий регламента, можно заметить, что остались минимальные требования только к толщине трубы, так как ранее были требования и к внешнему диаметру. [2]

Как было сказано трубы основных элементов могут быть изготовлены из альтернативных материалов, кроме следующих:

- главная дуга и ее распорки должны быть стальными;
- передняя дуга может быть металлической. Может иметь алюминиевую сварную структуру;
- любые сварные конструкции первичной структуры должны быть стальными.

Еще один из важных моментов трубы рамы должны соединяться с помощью триангуляции. Триангуляция от узла к узлу – расположение элементов рамы, спроецированное на плоскость, где нагрузка на ту же плоскость, прикладываемая в любом направлении на любой узел, даёт только

усиление натяжения или усиление сжатия в элементах рамы. Пример триангуляции изображен на рисунке 8.

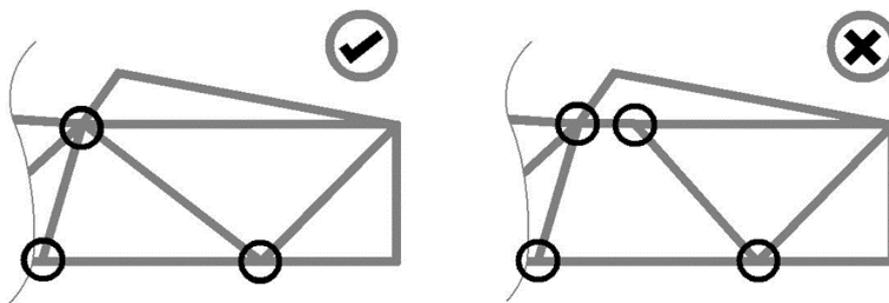


Рисунок 8 – Узлы триангуляции шасси (слева - ОК, справа - NOK)

### 1.1.5 Главная дуга

Рассмотрим каждый элемент рамы по подробнее. Передняя и главная дуга должны быть надежно соединены с основной структурой.

Минимальный радиус любого изгиба, должен быть в три раза больше внешнего диаметра трубы. На изгибах не должно быть видно признаков опрессовки или повреждения стенки.

Главная дуга должна быть изготовлена из единой неразрезной трубы и может отклоняться назад не более, чем на 10 градусов, а вперед на любой угол. В боковой проекции в местах изгиба главной дуги должны быть распорки. [2]

### 1.1.6 Передняя дуга

Передняя дуга должна представлять из себя единую непрерывную деталь. Но может состоять из нескольких частей, в этом случае она должна поддерживаться триангуляцией. В боковой проекции передняя дуга может отклоняться вперед или назад не более, чем на 20 градусов от вертикали. [2]

### 1.1.7 Распорки главной дуги

Распорки главной дуги могут располагаться как спереди, так и сзади. В боковой проекции распорки не должны располагаться по одну сторону от вертикальной линии проведенной через верхнюю точку главной дуги.

Распорки главной дуги должны присоединяться к главной дуге не

ниже, чем 160 мм от верхней поверхности главной дуги и образовывать угол не менее 30 градусов.

Нижние части распорок должны иметь опору, продолжающуюся от нижней части распорки до главной дуги, в виде как минимум двух элементов: верхнего и нижнего, образующих треугольник. [2]

### **1.1.8 Распорки передней дуги**

Распорки передней дуги крепятся как спереди, так и сзади. Передние распорки должны быть прямыми без изгибов и продолжаться до конструкции, спереди ступней ног водителя.

Распорки должны присоединяться к передней дуге не ниже, чем 50 мм от верхней поверхности передней дуги.

### **1.1.9 Передняя перегородка**

Для передней перегородки может быть использован любой материал, эквивалентный 1,5 мм стальной пластине. Если передняя перегородка является частью композитной структуры или она изготовлена в форме «L», то жёсткость при изгибе должна быть эквивалента стальной трубе и соответствовать требованиям для передней перегородки.

### **1.1.10 Опоры передней перегородки**

Передняя перегородка должна опираться на переднюю дугу посредством как минимум трёх элементов рамы с каждой стороны: верхнего, нижнего и диагонального для формирования треугольной структуры рамы.

### **1.1.11 Боковая защитная структура**

Боковая защитная структура должна состоять также, как и опоры передней перегородки как минимум из трех стальных труб с каждой стороны:

- верхний элемент соединяет переднюю и главную дугу на высоте 240 – 320 мм от самой низкой точки рамы между передней и главной дуге;
- нижний элемент соединяет нижние точки передней и главной дуги;

- диагональный элемент должен соединять по диагонали верхний и нижний элемент, образуя треугольник.

Для технической инспекции на каждой дуге должно быть отверстие диаметром 4,5 мм в некритическом прямом положении, если имеются иные отверстия, то их необходимо указать в листе SES (Structural Equivalency Spreadsheet, что в переводе означает таблица конструктивного соответствия).

## **1.2 Анализ типовых решений несущих рамных конструкций**

Несмотря на то, что требования регламента выглядят очень жесткими, командам удается каждый год изготавливать разные рамы для своих болидов и при этом все также соответствовать регламенту. Изготовление рамы из стальных труб является одним из бюджетных, для этого не требуется дорогостоящая техническая оснастка. Для изготовления рамы из стальных труб необходимо лишь четко зафиксировать трубы в необходимом положении, это может быть сварной стол с набором струбцин, так и технологическая оснастка.

Далее рассмотрим поподробнее рамы нескольких команд. Начнем с команды «KEFO Motorsport». Их рама (рисунок 9) является шаблонной для Формулы Студент, так как она включает в себя минимальный набор труб, все узлы должны обеспечивать триангуляцию, это позволит иметь минимальный вес рамы. Однако можно заметить, что в передней структуре в правом нижнем углу пропущен диагональный элемент. Команде придется добавить трубу в данном месте. Стоит обратить внимание на опору передней дуги, так как при таком расположении необходимо учесть несколько фактов: высоту передней дуги и боковой защитной структуры, рост пилотов. Если опора передней перегородки будет находиться высоко или рост пилотов будет не велик, то это может затруднить выход пилота из кокпита. Если пилот не сможет выпрыгнуть из болида за 5 секунд, то он не будет допущен к управлению на динамических дисциплинах.

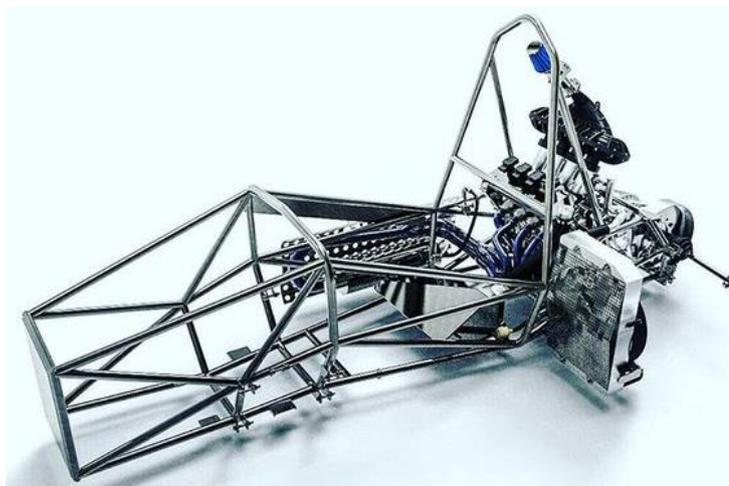


Рисунок 9 – KEFO Motorsport (Венгрия)

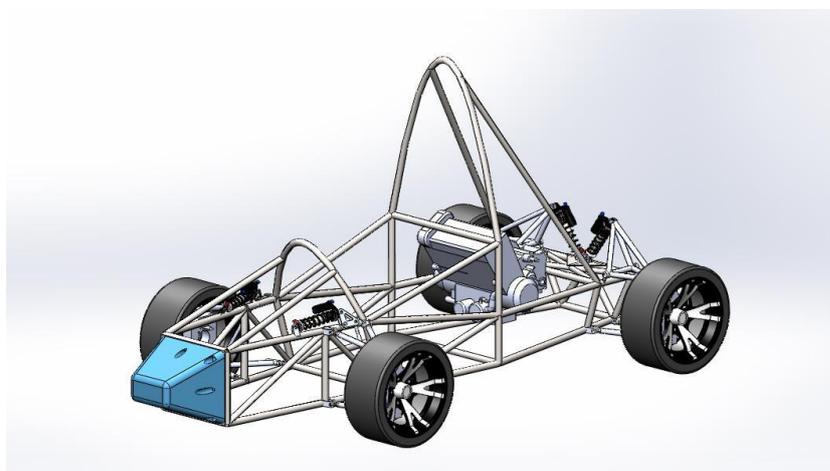
У команды «Ultimate Formula One Racers» передняя структура рамы не типична (рисунок 10). Регламент не запрещает делать верхний элемент опоры боковой защитной структуры единой прямой трубой. По регламенту распорки передней дуги должны крепиться как спереди, так и сзади. В данном случае отсутствуют передние распорки. Команде придется добавить данную трубу иначе команда не пройдет техническую инспекцию. Также придется добавить трубу в передней структуре в левом нижнем углу для обеспечения принципа триангуляции. И стоит проверить расстояние от вершины главной дуги до распорок главной дуги, так как распорки должны крепиться не ниже, чем 160 мм от верхней поверхности главной дуги.



## Рисунок 10 – Ultimate Formula One Racers (Индия)

К недочету данной компоновки можно отнести расположение передних амортизаторов, располагая их внутри рамы, шаблон поперечного сечения может не пройти. Однако стоит отметить, что в боковой защитной и в задней части структуре используется минимальное количество труб.

Рама команды «УрГУПС» (рисунок 11) также имеет небольшие недочеты, но 3d – модель рамы может отличаться от окончательного варианта. Первое что сразу не так с этой рамой, так это распорка, присоединенная к главной дуге, распорка спереди необходима только в том случае, если главная дуга будет наклонена вперед, в данном случае дуга наклонена назад. Так же данное расположение распорки затрудняет как вход, так и быстрый выход пилота, а главные правила требуют распорки к передней дуге спереди и сзади. Поэтому команде придется переделать распорку. Второй момент, передняя дуга – излишне заужена сверху, что приведет к проблемам с шаблоном-поперечного сечения, а также к проблеме расположения всех необходимых элементов для управления болидом. Выигрыша в данном случае нет. Третий момент, необходимо добавить диагональный элемент в задней части рамы, данный элемент будет входить в основную структуру.



## Рисунок 11 – УрГУПС (Россия)

Рама команды «Formula Neftegaz» (рисунок 12) выглядит тяжелой за счет множества труб.

Очень многие команды при проектировании хотят улучшить жесткость своих рам и добавляют лишние трубы в надежде, что это увеличит жёсткость, но по итогу в большинстве случаев это приводит только к увеличению веса. Как раз такой пример можно увидеть между передней дугой и перегородкой, образовалась дополнительная секция. Данная секция образовывается за счет того, что команды обычно решают соединить точки крепления с одной и с другой стороны. В этом случае не имеется выигрыша, так как жесткость увеличится пропорционально весу. Так же несмотря на то, что в раме уже много труб, в ней отсутствуют распорки главной дуги. Не лучшая идея изготавливать переднюю перегородку в виде шестигранника, так как увеличивается количество опор, и труб для обеспечения триангуляции, все вместе увеличивает вес рамы в несколько раз. Дополнительную секцию между передней дугой и передней перегородкой можно было бы заменить лишь только трубами по бокам.

В боковой защитной структуре введена дополнительная труба для обеспечения триангуляции из-за шестигранной передней перегородки. Также во многих узлах не обеспечивается триангуляция, команда будет вынуждена добавить еще трубы.

Отсутствуют распорки главной и передней дуги. В районе двигателя используется труба с изгибом в этом случае необходимо добавить диагональные распорки. Начинающие команды всегда стараются улучшить жесткость своей конструкции, но это как правило происходит за счет увеличения массы.



Рисунок 12– Formula Neftegaz (Россия)

Рама команды «Formula Student Oulu» (рисунок 13) выглядит очень эффектной, но тяжелой за счет большого количества труб. Но отметим один важный и интересный факт. Перемещение и наклон главной дуги на допустимые 10 градусов позволяют сократить длину дуги, сохраняя при этом зазор в 50 мм над шлемом водителя, а также сократить длину труб в боковой защитной структуре. И если иметь еще наклон передней дуги как у команды Oulu, то это позволяет еще больше сократить длину боковой защитной структуры, в итоге таким образом можно уменьшить вес, ведь уменьшается длина самых тяжелых труб.



Рисунок 13 – Formula Student Oulu (Финляндия)

Если изучать данную раму, то несмотря на большое количество дополнительных труб, команда не забыла включить все основные трубы, и во всех ее узлах обеспечивается триангуляция. Также рама кажется просторной за счет наклона труб. Также можно заметить, что передняя часть рамы очень длинная, а в зоне кокпита короткая.

Однако стоит обратить внимание на распорки передней дуги. Распорки передней дуги должны быть прямыми без изгибов. В данном случае видно, что распорки не прямые.

Неплохой пример рамы у команды «Griffith Racing Team» из Австрии (рисунок 14), команда занимает 26 место в мировом рейтинге команд «Formula Student».



Рисунок 14 – Griffith Racing Team (Австрия)

Рама полностью удовлетворяет требованиям регламента. Передняя перегородка изготовлена из трубы квадратного профиля. Если рассматривать опоры передней перегородки, то можно заметить, что для достижения своих целей команда вводила дополнительные трубы из – за этого немного загруженной выглядит рама, но несмотря на это в каждом секторе рамы соблюдается триангуляция. Также не типично выглядит задняя часть рамы.

Но не смотря на большое количество труб в задней части, под требования регламента попадают только шесть труб: две распорки главной дуги (лево– право); два верхних элемента опоры распорок главной дуги (лево– право); два нижних элемент опоры распорок главной дуги (лево– право). Все остальные трубы не попадают под требования регламента, а следовательно, могут быть более легкого сечения, за счет этого вес рамы не будет большим.

Еще один пример хорошей сложной рамы представляет команда «FaSTTUBE» из Германии (рисунок 15). Распорки передней дуги располагаются X – образно и не присоединяются к передней перегородки, это допустимо по новому регламенту, но только в том случае, если распорки крепятся перед ступнями водителя.



Рисунок 15 – FaSTTUBE (Германия)

Также можно обратить внимание на заднюю часть рамы, она выглядит немного громоздко. Однако в отличие от предыдущих примеров здесь можно заметить, что распорки главной дуги заканчиваются на уровне плеч, таким образом трубы, идущие от низа главной дуги до распорок главной дуги, являются опорами распорок главной дуги.

Стоит отметить, что в боковой защитной структуре диагональные элементы приходят именно в согнутую часть трубы нижнего элемента боковой защитной структуры. Также видно, что во всей раме соблюдается принцип триангуляции.

Рама смотрится интересно за счет сложной структуры, но получить минимальный вес в данном случае команде не удастся. Также при наличии очень длинной передней части, необходимо учитывать рост пилотов и их удобства, так как они попросту могут не достать до педалей или наоборот им не будет видно дороги, из-за почти горизонтальной посадки.

У команды «Temple Formula Racing» передняя структура выглядит компактной и простой (рисунок 16). В ней соблюдаются все принципы триангуляции.

На первый взгляд рама кажется простой и не имеет недостатков. Но в средней части над верхним элементом боковой защитной трубы добавлена зачем-то труба. Данная труба не несет никакой смысловой нагрузки, также если команда добавила трубу в боковой защитной структуре, то для обеспечения принципа триангуляции, ей нужно добавить трубу в переднюю структуру. Также можно заметить, что в передней структуре отсутствует поперечная труба, которая обычно соединяет вертикальные трубы левой и правой стороны. Это не запрещено регламентом, но данная труба добавляет жёсткость раме при кручении.



Рисунок 16 – Temple Formula Racing (США)

Задняя часть болида полностью удовлетворяет требованиям регламента. Она не выглядит сложно, однако в ней не используется минимальное количество труб, все трубы идущие от главной дуги до нижней точки распорок главной дуги будут считаться опорами распорок главной дуги, так как при исключении любой трубы будет потерян связывающий элемент и не будет обеспечиваться принцип триангуляции. Это связано с тем, что труба, соединяющая распорки главной дуги, имеет изгиб, а как было сказано ранее в любой изгиб трубы должна приходиться дополнительная труба.

Также стоит обратить на боковой защитный каркас. В боковом защитном каркасе есть только диагональная распорка сверху. Для обеспечения более жесткой конструкции лучшим вариантом было иметь поперечные распорки как снизу, так и сверху.

### **1.3 Анализ эффективности альтернативных решений несущих конструкций**

Изготовление рамы из альтернативного материала, а именно из карбона по стоимости всегда выходит дороже, а по весу не всегда легче. Рама, изготовленная из карбона, называют монококом. Монокок – шасси, изготовленное из композиционных материалов (рисунок 17). При правильной оптимизации конструкции с монококом можно выиграть до 10 кг. В среднем вес монокока варьируется от 28 кг до 21 кг в зависимости от количества слоев. Все команды борются за снижение веса, так как вес болида влияет на управляемость, баланс, жесткость конструкции и другие параметры. Правила жестко регламентируют уровень эквивалентности для разных элементов основной структуры, чтобы обеспечить необходимую безопасность сконструированных болидов студентов, тем самым регламент ограничивает команды в снижении веса монокока или рамы, так как при снижении веса, команды жертвуют жесткостью конструкции.



Рисунок 17 – Пример монокока

### **1.3.1 Требования регламента к монококу**

Требования регламента к монококу разделены на соответствующие геометрические разделы с соответствующими требованиями эквивалентности, изложенными ниже в таблице 2. При изготовлении рамы из альтернативного материала необходимо предоставить результаты физических тестов, доказывающие эквивалентность минимальных требований стальных труб. Как ранее было написано главная дуга должна быть только стальной, а передняя дуга может быть металлической.

Многие команды использующие монокок, предпочитают делать переднюю дугу алюминиевой, для облегчения конструкции. Поэтому в регламенте есть исключение: алюминиевая передняя дуга может быть сварной, потому что без сварки в данном случае тяжело обойтись, а так как все основные элементы являются монококом, то сварные алюминиевые соединения не будут сильно нагружаться.

По регламенту допустимо полное ламинирование передней дуги, то есть дуга по всему обхвату должна быть заключен многослойным композитом. А композитный материал, заключенный в оболочку, должен выступать за края как минимум на 25 мм с обеих сторон. В этом случае

необходимо будет указать эквивалентность хотя бы четырех кронштейнов передней дуги в таблице конструктивного соответствия.

Так, например команда «Formula Student Team Delft» делает переднюю дугу из двух алюминиевых половинок, которую потом клеивает в структуру монокока. Каждая половинка передней дуги фрезерована из алюминиевого листа. Плюсы этого решения в том, что деталь получается более точной, и при этом отсутствует внутреннее напряжение после гибки (рисунок 18).

Однако по регламенту сказано, что при наличии сварных конструкций из алюминиевого профиля эквивалентный предел текучести должен быть рассмотрен сразу после сварки. Или команда должна будет доказать, что обработка велась с правильной теплотой растворения и с эффектом искусственного старения. И команде необходимо будет предоставить все необходимые документы о том, как проходил процесс термообработки конструкции.



Рисунок 18 – Пример двух составной алюминиевой передней дуги

Таблица 2 – Требования к монококу

Основная структура	Геометрия	Правило	Тип теста	Требования регламента и эквивалентность	
				Свойство	Эквивалентность
Боковая защитная структура	Область в продольном направлении спереди от главной дуги, в кормовой части передней дуги, и выше нижней точки шасси на 320мм.	Т.3.15.2	Жесткость при изгибе (EI)	Модуль продольного изгиба	Трем основным стальным трубам
	Вертикальная структура			Модуль продольного изгиба	Двум основным стальным трубам
	Вертикальная структура			Объем поглощающей энергии	Двум основным стальным трубам
	Прочность среза по периметру		Сдвиг по периметру	Минимальная сила сдвига	7,5 кН
	Половина горизонтального пола		Жесткость при изгибе (EI)	Модуль продольного изгиба	Одной основной стальной трубе
Структура передней перегородки	Опора передней перегородки	Т3.14.2	Жесткость при изгибе (EI)	Модуль продольного изгиба	Шестиосновным стальным трубам
	Вертикальная сторона опоры передней перегородки	Т3.14.3	Жесткость при изгибе (EI)	Модуль продольного изгиба	Одной основной стальной трубе
	Прочность среза по периметру	Т3.14.4	Сдвиг по периметру	Минимальная сила сдвига	4кН
Структура передней перегородки	Передняя перегородка	Т3.13.2	Жесткость при изгибе (EI)	Модуль продольного изгиба	Одной основной стальной трубе
		Т3.13.1	Сдвиг по периметру	Минимальная сила сдвига	1,5 мм стальной пластине

Как ранее было сказано, что при изготовлении рамы из композитного материала в таблице конструктивного соответствия должны быть предоставлены данные испытания на трехточечный изгиб и на срез. В пункте 3.5 регламента описаны требования к необходимым тестам.

### **1.3.2 Тест на трехточечный изгиб**

Если композиционные детали используются в основной структуре, то команда должна:

- Изготовить плоский образец для испытаний размером 275 мм × 500 мм, из точно такого же материала, точно по такой же методике.
- Выполнить испытание на трехточечный изгиб.

Данные полученные в процессе испытания, фотографии образцов, установки, и оснастка, которой прикладывают нагрузку должны быть видимы и должны быть включены в таблицу конструктивного соответствия.

Результаты испытаний должны быть использованы для определения прочности и жесткости в формулах таблицы конструктивного соответствия для композиционных панелей.

Расстояние между опорами должно быть не менее 400 мм. Приложение нагрузки должно осуществляться через металлическую оснастку радиусом 50 мм. Оснастка приложения нагрузки должна выходить за пределы образца. Это необходимо для того, чтобы исключить коробление образца.

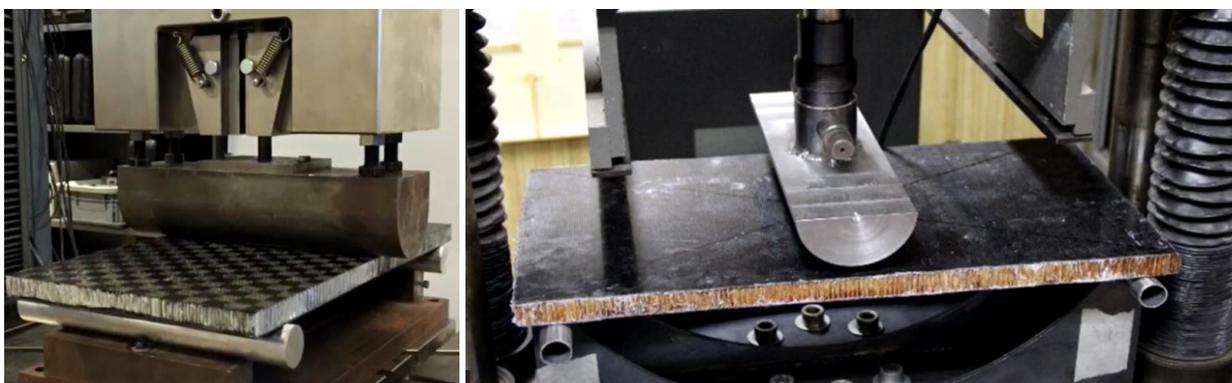


Рисунок 19 – Пример оснасток для теста на трехточечный изгиб

### 1.3.3 Тест на 3-х точечный изгиб

Испытания на срез должны быть проведены путем протягивания или проталкивания плоского индентора диаметром 25 мм через образец панели. Образец должен быть размером не менее 100 мм × 100 мм. Образцы также должны быть из того же материала и изготовлены точно таким же способом, что и планируется использоваться для изготовления монокока.

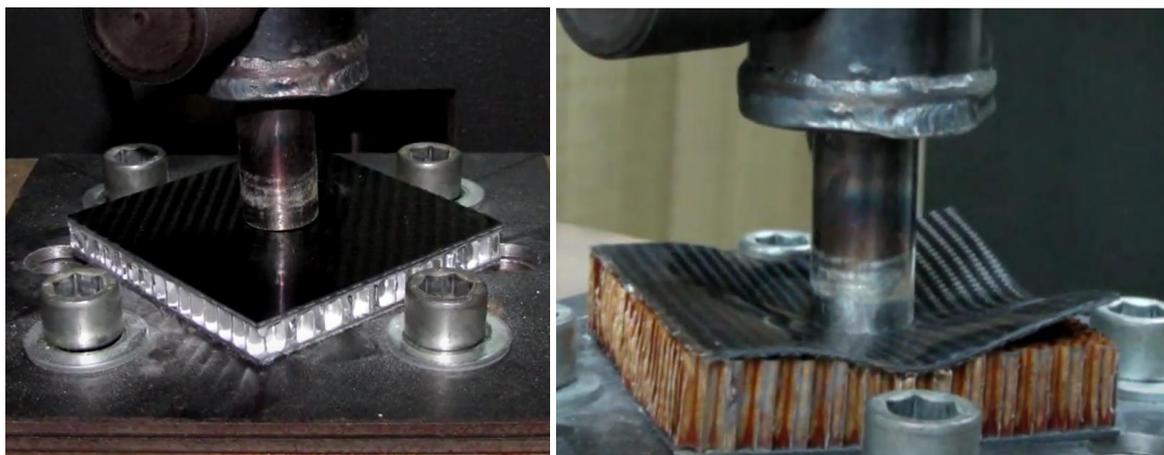


Рисунок 20 – Пример оснастки для теста на срез

Образец должен опираться на оснастку всей своей поверхностью за исключением отверстия диаметром 32 мм расположенного коаксиально с индентором и нужного для того, чтобы индентор проходил через него. Образец не должен быть прижат к оснастке. На рисунке 1.17 представлена оснастка и пример проведения теста командой МАДИ.

### 1.3.4 Требования к крепежу

Изготавливая переднюю часть из композитного материала командам, необходимо учитывать требования регламента по креплению главной и передней дуги к монококу. В этом случае для передней и главной дуги должны использоваться в каждой точке крепления как минимум два болта с метрической резьбой 8 мм класса 8:8 и опорную пластину с толщиной минимум 2мм. При этом каждая точка, присоединенная к основной структуре болтами, должна выдерживать нагрузку как минимум в 30кН.

Для крепления распорок передней и главной дуги, и опор распорок главной дуги необходимо будет использовать болт с метрической резьбой 10 мм класса 8:8, если болт расположен по центру трубы. Так же не допускается никаких разрушений в структуре монокока.



Рисунок 21 – Пример крепления распорок основных дуг к монококу

### **1.3.5 Стоимость изготовления монокока**

Как было выше сказано стоимость изготовления монокока очень высока. По предварительным расчетам команд изготавливающих монококи стоимость одних только материалов может варьироваться от 4 до 7 тысяч долларов. В эту сумму входит только затраты на покупку карбона, сот, эпоксидной смолы и клея. При этом стоимость изготовления оснастки будет учитываться отдельно. Оснастка для монокока, может быть, одной из самых дорогих деталей для изготовления, при этом цены варьируются до 60 тысяч долларов. Но команды разными способами сокращают затраты на оснастку. [14]

Оснастка для монокока включает в себя изготовление опоры, которая будет являться твердой версией конечного продукта. Часто команды изготавливают оснастку из МДФ и пенопласта, затем уже начинают

укладывать в форму карбоном. Оснастку для монокока все команды делают из двух частей (рисунок 22).



Рисунок 22 – Пример оснастки для монокока

После того как в оснастку были уложены все слои карбона, нужно дождаться полного его высыхания. Для ускорения процесса многие команды используют лабораторные печи, но перед тем, как отправить две половинки монокока в печь, крепят термопары на переднюю и боковую защитную структуру, чтобы контролировать степень нагревания и не допустить теплового удара. На рисунке 23 показан пример расположения термопар на монококе.



Рисунок 23 – Пример места расположения термопар на монококе

## **Вывод по главе**

Анализирую всю перечисленную информацию в данной главе можно сделать следующие выводы:

- всем командам необходимо внимательно следить за соблюдением правил регламента. Так как не соблюдение регламента может привести команду на соревнованиях к недопуску к динамическим дисциплинам. Как показывает опыт даже опытные команды могут пропустить небольшие изменения в регламенте;
- командам решившим изготавливать монокок необходимо оценить не только свои возможности, но и доступный бюджет, так как изготовление монокока является дорогостоящим процессом;
- новым или бюджетным команда следует начать проектирование рамы из стали. Так как изготовление рамы из стали не является таким дорогостоящее и не требует дорогой и сложной технологической оснастки. Так же если вспомнить требования регламента к стальной раме и монококу, то требований к стальной раме меньше, чем к монококу;
- команды должны быть в силах выполнить все физические тесты необходимые для доказательства жесткости своей рамы при изготовлении ее не из стальных труб. Некоторые тесты могут потребовать дополнительных финансовых затрат.

## 2 Теоретические аспекты компоновочных решений основных элементов несущих конструкций в серии «Formula Student»

При разработке рамы необходимо учитывать, что геометрия рамы должна быть такой, чтобы нагрузки действовали сжимающим или растягивающим образом. Трубы должны быть расположены так, чтобы обеспечить максимальную жесткость на кручение и изгиб без увеличения веса конструкции. Для этого следует придерживаться следующим аспектам: триангуляция, крутильная жесткость, минимизация веса, материал.

### 2.1 Триангуляция (фронтальная жесткость)

Триангуляцию можно использовать для увеличения жесткости каркаса на кручение, поскольку треугольник является простейшей формой. В первой главе было дано определение триангуляции. Чтобы понять, как влияет триангуляция на структуру рамы, рассмотрим схемы ниже.

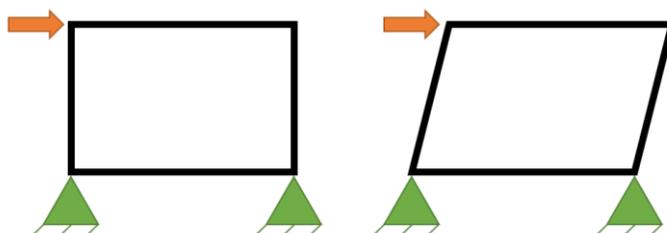


Рисунок 24 – Деформация прямоугольной конструкции без триангуляции

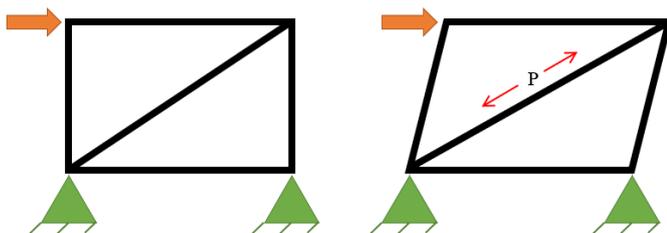


Рисунок 25 – Деформация прямоугольной конструкции с триангуляцией на растяжение

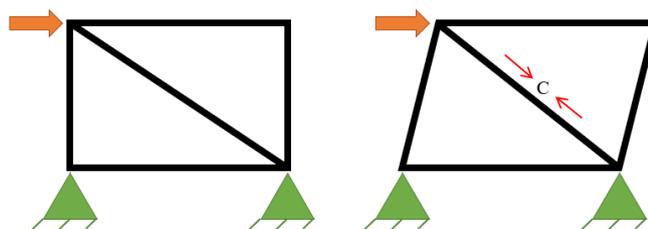


Рисунок 26 – Деформация прямоугольной конструкции с триангуляцией на сжатие

Из рисунка 24 видно, что без диагональной трубы конструкция легко изгибается в направлении действия силы, и следовательно, является не жесткой. Если добавить диагональную трубу как показано на рисунке 25, то это повысит жесткость конструкции. В данном случае диагональная распорка действует как натяжение. Жесткость данной распорки, действующей на растяжение, выше, чем жесткость прямоугольной конструкции без диагональной распорки. При изменении направления диагональной распорки на обратное, как показано на рисунке 26, то направление силы измениться, и теперь распорка будет работать на сжатие. Такое положение диагонального элемента может привести к изгибу триангуляции, следовательно, данный элемент должен быть усилен дополнительным материалом.

Таким образом, распорки, которые используются при растяжении, могут быть меньшего диаметра или толщины, чем те, что используются при сжатии. Метод триангуляции не только увеличивает жесткость рамы, но и помогает в распределении напряжений при различных нагрузках в узлах подвески.

## 2.2 Крутильная жесткость

Расчет жесткости рамы на кручение позволяет определить качество спроектированной конструкции, и позволяет понять, достаточно ли жесткая рама по сравнению с жесткостью подвески на качение.

При большой жесткости и большой массе рамы страдают технические характеристики автомобиля. Поэтому командам следует выбирать оптимальную жесткость к оптимальной массе.

Самую высокую жесткость имеет полная монококовая конструкция, ее жесткость составляет около 5 233 Нм/град при весе не более 20 кг. Средняя жесткость для соревнований «Formula Student» составляет около 2 442 Нм/град при среднем весе в 25 кг.

При расчете жесткости рамы на кручение будем использовать схему как показана на рисунке 27. В этом случае фиксирующими точками выступают задние точки крепления подвески, а сила прикладывается удаленно к раме в местах схождения передних рычагов, поэтому жесткость рычагов не будет учитываться. Нагрузка прикладывается одинаковая, но в противоположных направлениях, что приводит к возникновению скручивающего момента.

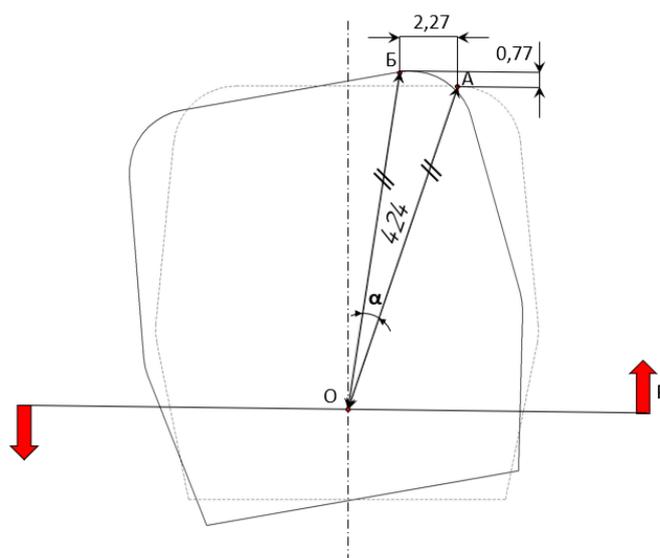


Рисунок 27 – Схема нагружения рамы

При скручивании рамы измеряется смещение. А сама жесткость на кручение ( $C_p$ ) рассчитывается как отношение приложенного крутящего момента ( $M_k$ ) к углу деформации рамы ( $\alpha_p$ ) (формула 1).

$$C_p = \frac{M_k}{\alpha_p}, \quad (1)$$

Величина крутящего момента рассчитывается по формуле (2).

$$M_k = 2 * P * L, \quad (2)$$

где  $m$  – масса автомобиля;

$L$  – половина длины трека.

Нагрузка, прикладываемая на переднее правое колесо, рассчитывается по следующей формуле:

$$P = mg, \quad (3)$$

где  $m$  – масса автомобиля;

$g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

Формулу для определения угла деформации можно вывести исходя из схемы нагружения рамы (рисунок 27). Из схемы видно, что точка А при кручении рамы перемещается в точку Б. Расстояние между точками определяется по теореме Пифагора:

$$AB = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (4)$$

где  $y$ ,  $x$  – расстояние между точками А и Б.

Далее из схемы нагружения следует, что точка О – центр автомобиля, угол  $\alpha$  – угол деформации. Для нахождения угла  $\alpha$ , рассмотрим треугольник

$\triangle OAB$ , в котором отрезки  $AB$  и  $OA$  считаются равными. По теореме косинусов получаем следующую формулу:

$$AB^2 = OA^2 + OB^2 - 2 * OA * OB * \cos \alpha, \quad (5)$$

Формулу (5) можно переписать в удобный для нас вид для нахождения угла деформации рамы:

$$\cos \alpha = \frac{OA^2 + OB^2 - AB^2}{2 * OA * OB}. \quad (6)$$

Теперь рассчитаем жесткость рамы команды «Togliatti Racing Team».

Исходные данные для расчета крутильной жесткости:

полная масса автомобиля – 221,5 кг;

длина трека – 1200 мм;

база автомобиля – 1500 мм;

расстояние от центра тяжести до передней оси – 750 мм;

перемещение по  $X$  – 2,27 мм;

перемещение по  $Y$  – 0,77 мм.

Нагрузка, прикладываемая к переднему колесу по формуле (3):

$$P = 221,5 * 9,8 = 2\ 170 \text{ Н},$$

Далее находим крутящий момент по формуле (2):

$$M_k = 2 * 2\ 170 * 0,6 = 2\ 604 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

По формуле (4) находим длину отрезка  $AB$ :

$$AB = \sqrt{2,27^2 + 0,77^2} = 2,4 \text{ мм},$$

После того, как нашли длину отрезка АБ, находим угол деформации рамы по формуле (6):

$$\cos \alpha = \frac{424^2 + 424^2 - 2,4^2}{2 * 424 * 424} = 0,99.$$

По таблице косинусов переводим полученное значение в градусы. Угол закручивания рамы составляет 1 градус.

После нахождения необходимых параметров, рассчитываем жесткость рамы на кручение по формуле (1):

$$C_p = \frac{2604}{1} = 2604 \text{ Н} \cdot \text{м/град.}$$

В результате расчета жесткость рамы на кручение составляет 2604 Н·м/град при массе рамы в 27 кг. Для данной массы это достаточная жесткость рамы.

### 2.3 Минимизация веса

Все команды Формулы Студент стремятся снизить вес своего болида. Снизить вес болида можно благодаря правильной оптимизации узлов, в том числе и рамы.

Один из способов уменьшить вес рамы – использовать трубы меньшего диаметра с минимальной толщиной стенки.

По новому регламенту нет ограничений к внешнему диаметру, в отличие от регламентов предыдущих годов. Но были добавлены минимальные требования к площади сечения и инерции. Поэтому по стандартным формулам (формулы 7,8) можно вычислить минимальные допустимые по регламенту трубы.

$$S = \frac{\pi * (D^2 - d^2)}{4}, \quad (7)$$

где D – внешний диаметр трубы;

d – внутренний диаметр.

$$J_x = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}, \quad (8)$$

где D – внешний диаметр трубы;

d – внутренний диаметр.

Ниже на рисунке 28 и рисунке 29 представлены таблицы, в которых приведены значения площади сечения труба и инерции в зависимости от диаметра и толщины стенки трубы. Из них видно, что необходимо проверять оба параметра, так как труба может удовлетворять одному параметру, но не удовлетворять второму. Также необходимо учитывать, что к каждой структуре свои требования по сечению и инерции. Поэтому труба может не подходить для главной дуги по параметрам, но подходить по параметрам к передней перегородки.

Cross section - Round tube														
Diameter	Wall Thickness													
	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	3,0	
12	28	35	41	47	52	58	63	68	72	75	77	81	85	
14	33	41	48	55	62	69	75	82	87	90	93	99	104	
16	38	47	56	64	72	80	88	95	103	106	109	116	123	
18	43	53	63	73	82	92	101	109	118	122	126	134	141	
20	48	60	71	82	92	103	113	123	133	137	142	151	160	
22	53	66	78	91	103	114	126	137	148	153	158	169	179	
24	58	72	86	99	113	126	138	151	163	169	175	186	198	
25	61	75	90	104	118	131	145	158	170	177	183	195	207	
26	63	79	93	108	123	137	151	164	178	185	191	204	217	
28	68	85	101	117	133	148	163	178	193	200	207	222	236	
30	73	91	109	126	143	159	176	192	208	216	224	239	254	
32	78	97	116	135	153	171	188	206	223	232	240	257	273	
34	83	104	124	143	163	182	201	220	238	247	256	274	292	
36	88	110	131	152	173	193	214	234	253	263	273	292	311	
Where to use	non structural						Main and front hoops, shoulder harness mounting bar							175
	non structural		SIS, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above) EV: Accumulator protection structure											119
	Front bulkhead support, main hoop bracing supports, EV: Tractive system components													91

Рисунок 28 – Площадь сечения

Diameter	Wall Thickness															
	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	3,0			
12	444	527	601	666	724	773	817	854	886	900	913	936	954			
14	725	868	997	1113	1218	1311	1395	1469	1534	1564	1591	1641	1685			
16	1106	1331	1538	1727	1899	2056	2199	2328	2445	2498	2549	2643	2726			
18	1602	1936	2246	2533	2798	3042	3267	3474	3663	3751	3835	3992	4135			
20	2227	2701	3144	3558	3944	4303	4637	4947	5234	5369	5499	5743	5968			
22	2998	3645	4255	4828	5367	5872	6346	6789	7203	7399	7589	7948	8282			
24	3928	4787	5601	6371	7098	7785	8432	9042	9615	9889	10154	10659	11133			
25	4457	5438	6369	7252	8088	8880	9628	10335	11002	11321	11630	12222	12778			
26	5033	6146	7205	8211	9167	10073	10933	11747	12516	12885	13244	13930	14578			
28	6327	7740	9089	10376	11603	12773	13886	14945	15951	16435	16907	17813	18673			
30	7828	9589	11276	12892	14438	15916	17329	18678	19965	20586	21192	22362	23475			
32	9548	11711	13790	15786	17701	19539	21300	22988	24603	25385	26149	27627	29040			
34	11503	14125	16651	19083	21423	23673	25836	27915	29911	30879	31827	33664	35425			
36	13709	16851	19884	22810	25633	28354	30976	33502	35933	37115	38273	40524	42687			
Where to use	non structural						Main and front hoops, shoulder harness mounting bar							11320		
	non structural		SIS, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above) EV: Accumulator protection structure													8509
	non structural		Front bulkhead support, main hoop bracing supports, EV: Tractive system components													6695

Рисунок 29 – Момент инерции

Рассмотрим основные элементы рамы 2020 года (рисунок 30). Все основные участки рамы изготовлены из труб одного диаметра, для упрощения изготовления. В этом случае изменяется только толщина стенки. Из выше приведенных таблиц видно, что во всех участках рамы используется минимальная толщина стенки трубы. В этом случае снижение веса возможно лишь за счет изменения геометрии или изменения используемого материала.

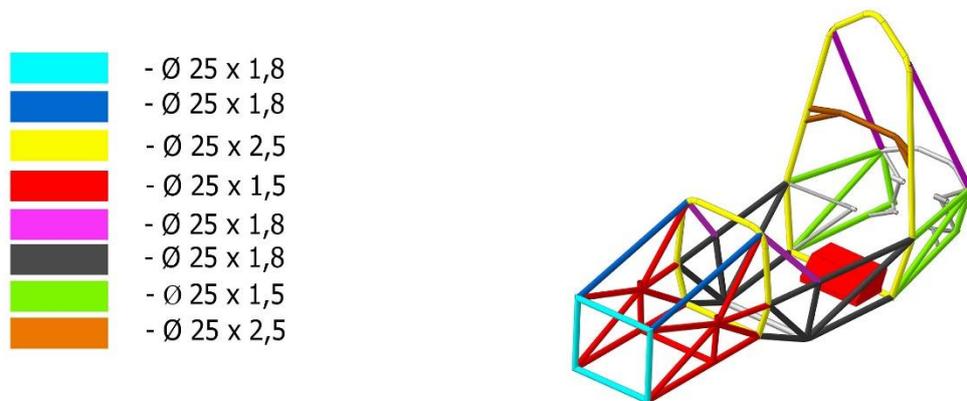


Рисунок 30 – Спецификация труб рамы 2020

## 2.4 Материал

По регламенту соревнований разрешено использовать нелегированную углеродистую сталь с максимальным содержанием 0:3% углерода, 1:7% марганца и 0:6% всех остальных элементов. При использовании

легированной стали необходимо предоставить дополнительно тесты и документацию. [21]

Одним из главных параметров при выборе материала становится общедоступность и стоимость.

Вся рама гоночного болида 2020 года изготовлена из холоднокатаной бесшовной трубы (Сталь 20), вес рамы – 27 кг. Данная сталь общедоступна и имеет не высокую стоимость.

Таблица 3 – Характеристики Стали 20

Материал	E ГПа	G ГПа	$\sigma_b$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>	Свариваемость
Сталь 20	212	78	412	245	7859	Без ограничений

где E – модуль нормальной упругости;

G – модуль упругости при сдвиге кручением;

$\sigma_b$  – временное сопротивление разрыву (предел прочности при растяжении);

$\sigma_{0,2}$  – предел текучести условный;

$\rho$  – плотность материала.

Можно использовать стали более высокого качества, например, как хромомолибденовая сталь (15ХМ), однако минимальный размер не позволяет применять трубы с меньшей толщиной стенки, в этом случае невозможно будет добиться экономии веса при использовании более прочной стали.

Также определенные элементы рамы можно изготавливать из алюминиевых сплавов. По регламенту разрешено изготавливать переднюю дугу из алюминиевого сплава. В этом случае придется использовать трубы большего диаметра и с большей толщиной стенки. Несмотря на это, вес

получается меньше на 20%, но при этом стоимость возрастает в несколько раз.

## 2.5 Точки подвески в узлах рамы

При разработке рамы необходимо предусмотреть тот факт, что кронштейны подвески должны находиться по возможности в узлах или вблизи узла рамы, это позволяет минимизировать изгиб элементов, так как нагрузка будет распределяться равномерно (рисунок 31).

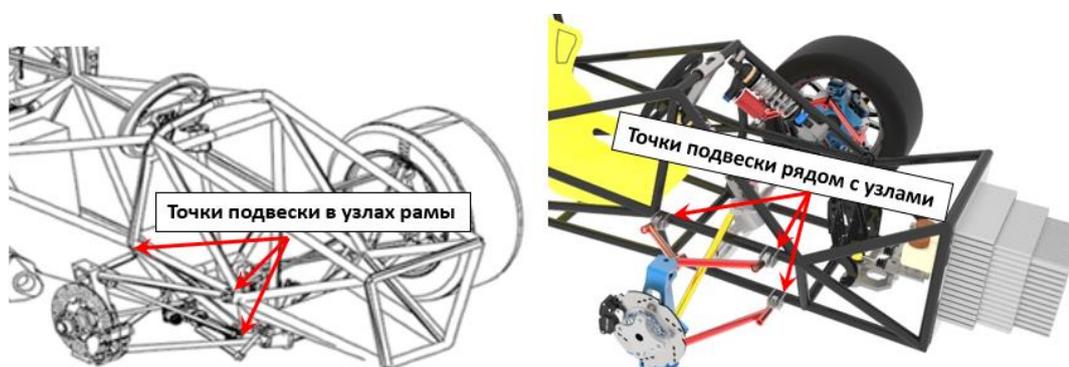


Рисунок 31 – Спецификация труб рамы 2020

## 2.6 Конструктив

Немалую важность имеет геометрия, так как в одном случае неправильная геометрия несет только увеличение веса, в другом случае не прохождение технической инспекции.

В этом разделе рассмотрим подробнее основные элементы рамы и как они могут располагаться.

### 2.6.1 Геометрия передней боковой структуры

Как было сказано в первой главе передняя перегородка должна иметь три опоры: верхний, нижний и диагональный элемент. На рисунке 32 показан один из вариантов возможного расположения труб в данной зоне.

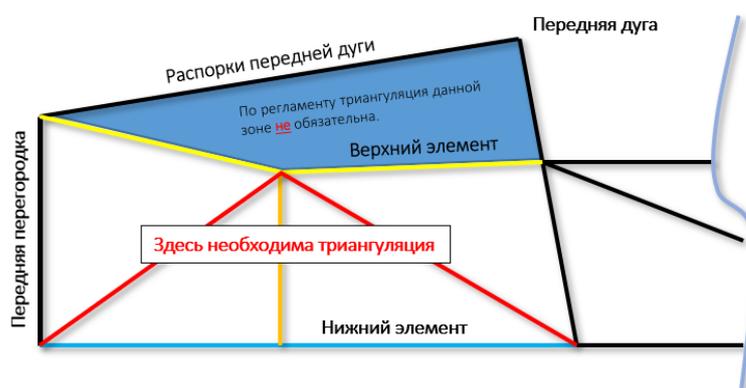


Рисунок 32 – Схема расположения опор передней перегородки

В данной схеме не требуется обязательная триангуляция в выделенном участке, если там нет гнутых труб или сложно составных элементов. Но труба может быть там добавлена, если команде это необходимо.

На рисунке 32 желтая линия – верхний элемент опоры передней перегородки, синяя линия – нижний элемент, красные линии – диагональные элементы. Также в этой схеме оранжевая вертикальная труба не является обязательной, так как поддерживающими элементами будут диагональные трубы, при условии, что нижний элемент является цельной не гнутой трубой. Но данная труба может быть полезной для увеличения локальной жесткости, если в этой зоне находятся точки крепления подвески.

На рисунке 33 представлен еще один возможный вариант расположения труб. Данный вариант также полностью удовлетворяет требованиям регламента, но не является более рациональным. Так как все три трубы являются диагональным элементом, и ни одну из них нельзя исключить. В этом случае вертикальная труба должна быть изготовлена из труб, регламентирующих для этой зоны, в отличие от первого варианта.

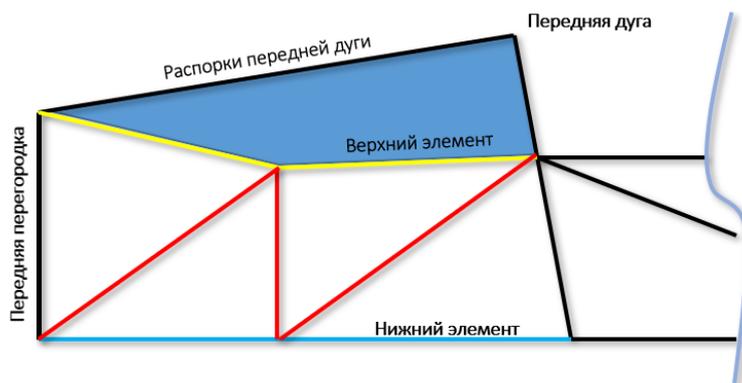


Рисунок 33 – Схема расположения опор передней перегородки

Проведем прочностной анализ и сравним как влияет расположение труб на жесткость рамы. Сравним три возможных варианта: первый вариант, как показано на рисунке 32; второй вариант – изображен на рисунке 33; третий вариант – расположение труб как на рисунке 32 с дополнительными распорками.

Передняя структура проверяется фронтальным ударом. Передняя перегородка должна выдерживать силу в 7 000 Н и не должна иметь перемещение больше 25 мм. Все три варианта удовлетворяют требованию регламента.

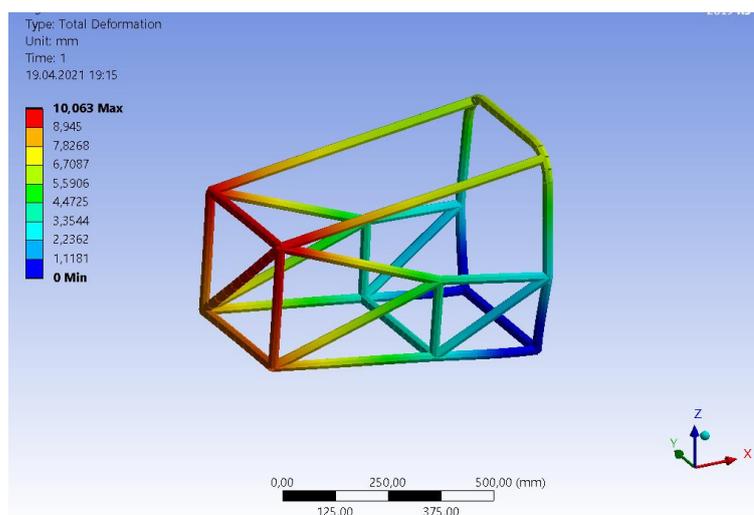


Рисунок 34 – Анализ передней структуры при фронтальном ударе

В первом случае максимальное перемещение по оси X составило 10 мм. Смещение в 10 мм считается допустимым. Однако такое большое смещение объясняется тем, что трубы в боковой части, располагаются в одном направлении с приложенной силой.

Во втором смещение составило – 9,4 мм (рисунок 35). Деформация в этом случае уменьшилась, за счет того, что трубы в боковой части имеют разное направление, образуя треугольник. Небольшая разница в значениях объясняется тем, что в этом примере отсутствует вертикальная труба, потому что по минимальным требованиям данную трубу команда может добавить, а может и не добавлять в зависимости от потребностей компоновки.

В третьем варианте смещение составило всего – 7,8 мм (рисунок 36). За счет правильной триангуляции, в каждой секции между основными трубами образованы треугольники, за счет этого перемещение сократилось на 2,2 мм.

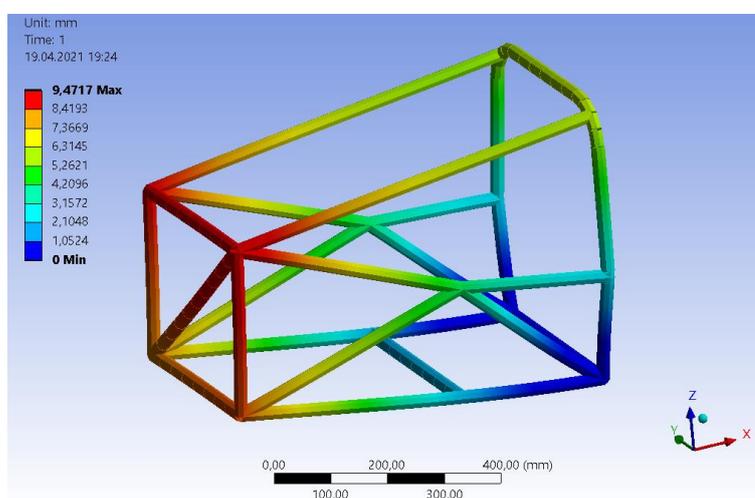


Рисунок 35 – Анализ передней структуры при фронтальном ударе

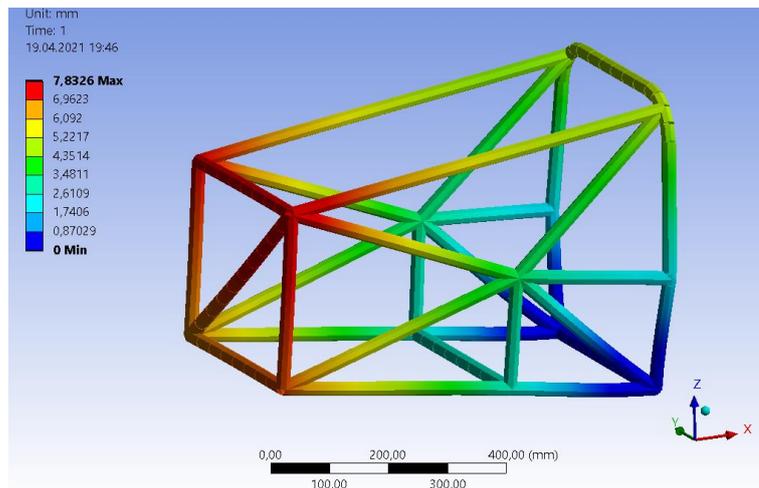


Рисунок 36 – Анализ передней структуры при фронтальном ударе

Также распорки передней дуги не обязательно присоединять к передней перегородки. В обновленном регламенте определение распорок передней дуги обновлено, и в нем говорится, что распорки должны крепиться перед ступнями водителя. Это должны быть как минимум 2 прямые трубы без каких-либо изгибов.

На рисунке 37 представлена вырезка из презентации, подготовленной организаторами немецких соревнований. [2]



Рисунок 37 – Схема расположения распорок передней дуги

На ней красным цветом выделена граница стоп водителя при самом удаленном положении педалей. Таким образом новое определение не означает, что распорки должны крепиться к переднему квадрату, так как узел может быть образован с помощью поддержек переднего квадрата, а не им самим. Однако данная схема расположения распорок усложняет переднюю часть, добавлением дополнительных труб, что приведет также к увеличению веса конструкции.

### 2.6.2 Геометрия распорки передней дуги

Если передняя дуга наклонена назад более чем на 10 градусов, то ее должны поддерживать дополнительные распорки, идущие назад. По регламенту не требуется доводить дополнительные распорки до главной дуги, как показано на рисунке 38а, распорки могут быть присоединены к боковой защитной структуре (рисунок 38б), но в этом случае необходимо соблюдать принцип триангуляции. На рисунке 38б видно, что при присоединении распорки на верхний элемент боковой защиты, диагональный элемент разделяется на две трубы, чтобы обеспечить триангуляцию в данной зоне.

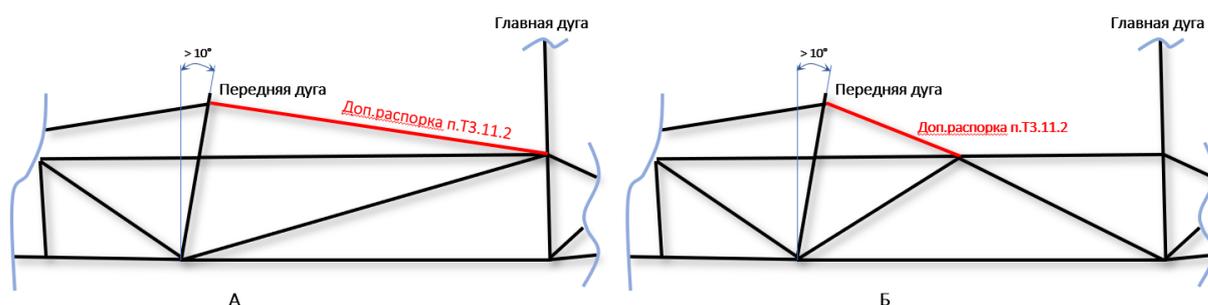


Рисунок 38 – Схема расположения дополнительных распорок передней дуги

Рассмотрим, как влияет наклон передней дуги на ее жесткость. По регламенту передняя дуга должна выдерживать нагрузку в 11 916 Н. Нагрузка прикладывается к передней дуге. Рассматривалось три

варианта: первый вариант – когда передняя дуга наклонена на 10 градусов вперед (по регламенту максимальный угол наклона передней дуги должен быть не больше 20 градусов). Из результатов нагружения на рисунке 39 видно, что перемещение составило 5 мм.

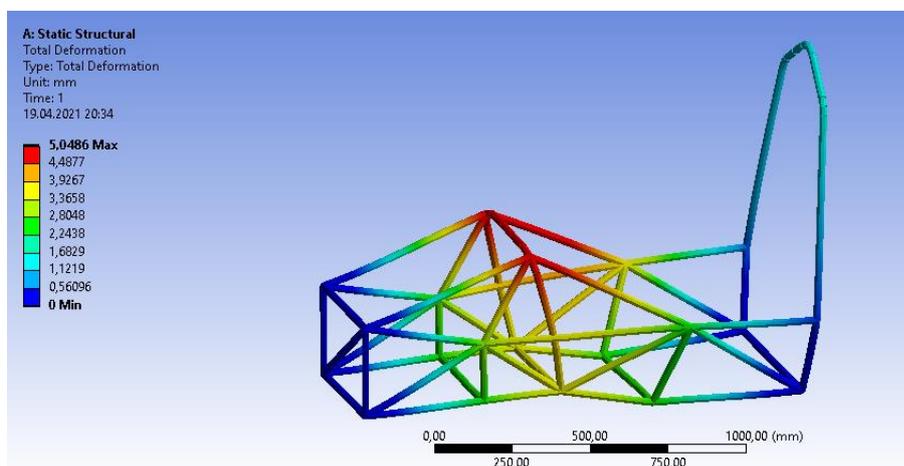


Рисунок 39 – Анализ передней дуги при наклоне вперед на 10 градусов

Второй вариант (рисунок 40) – когда передняя дуга не имеет наклона. Из результатов нагружения видно, что перемещение увеличилось на 0,5 мм.

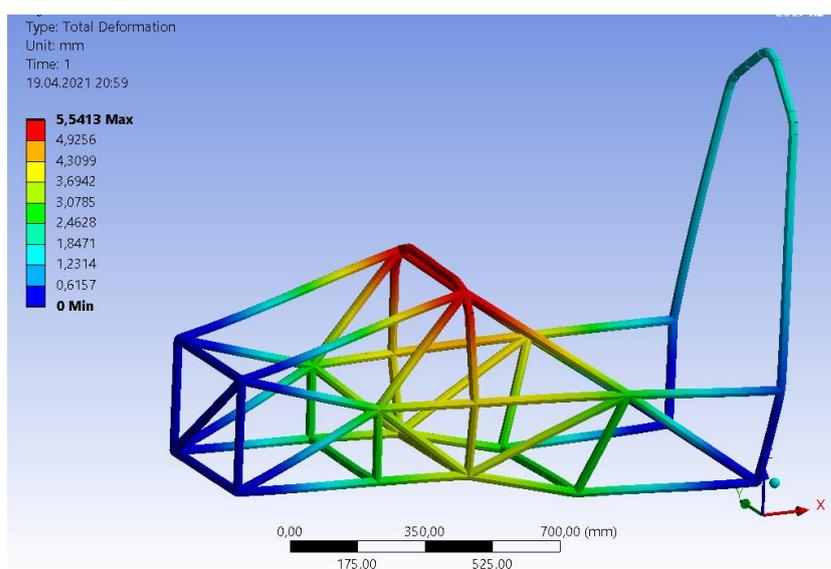


Рисунок 40 – Анализ передней дуги без наклона

Третий вариант нагружения (рисунок 41) – когда передняя дуга наклонена назад на 10 градусов. В этом случае перемещение составило 5,6 мм.

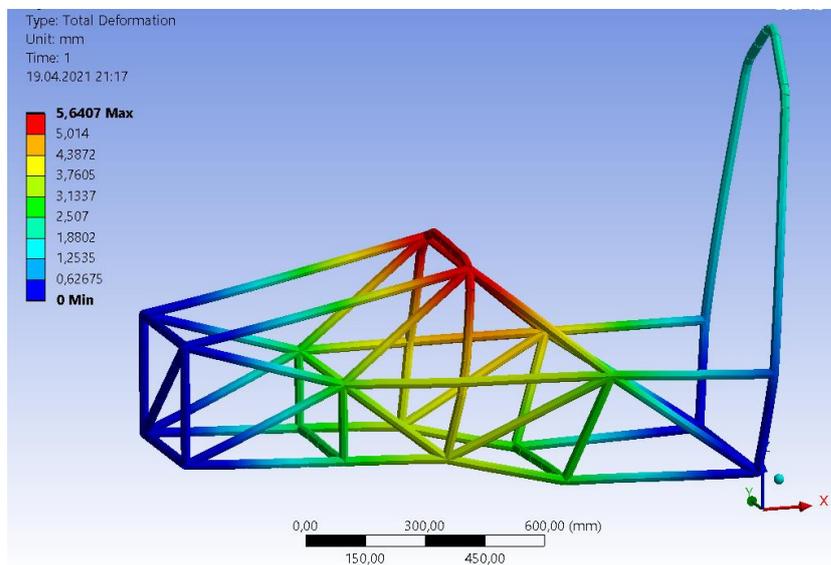


Рисунок 41 – Анализ передней дуги при наклоне назад на 10 градусов

Из результатов нагружения видно, что во втором варианте, когда передняя дуга не имеет наклона, и в третьем варианте, когда дуга имеет наклон назад перемещение увеличивается всего на 0,5 – 0,6 мм.

### 2.6.3 Геометрия боковой защитной структуры

Боковая защитная структура как писалось ранее в первой главе должна состоять из трех элементов: верхнего, нижнего и диагонального. Если нижний боковой элемент состоит из изогнутой трубы, то данный изгиб должен быть триангулирован. Ниже на рисунке 42 приведена схема, которая показывает на несоответствие регламенту.

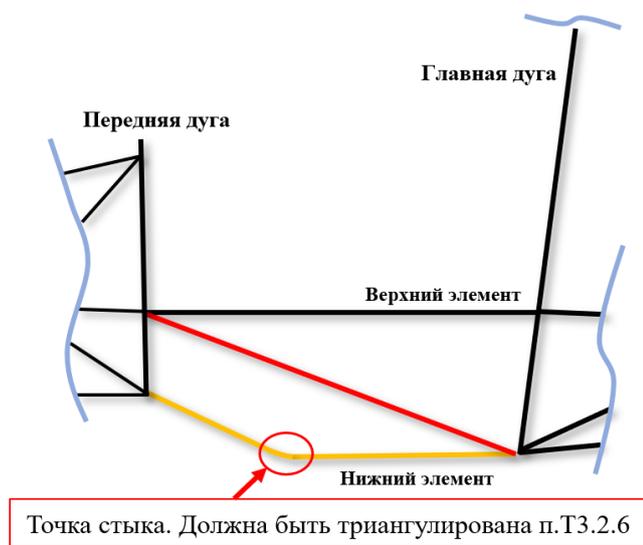


Рисунок 42 – Схема неправильного расположения труб

На рисунке 43 приведено корректное расположение труб при наличие изогнутой трубы в нижнем элементе. В данной схеме нет вертикальной трубы, так как она является дополнительной и может быть добавлена командой в том случае, если распорки передней дуги не будут крепиться к главной дуге, а будут присоединены к верхнему элементу боковой защитной структуры.

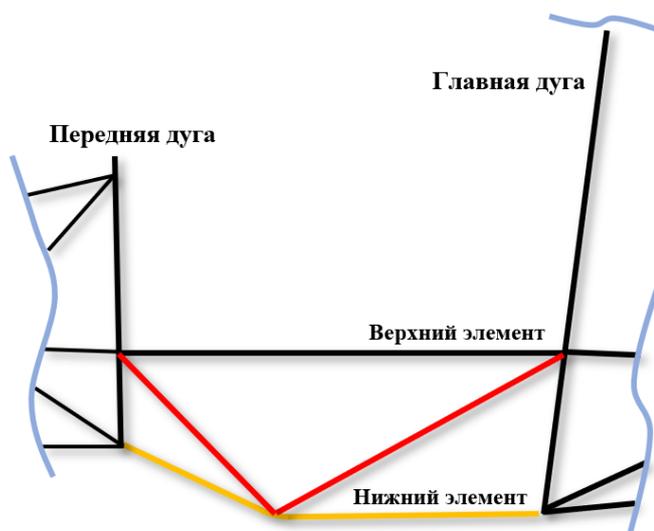


Рисунок 43 – Схема правильного расположения труб

Сравним как влияет расположение распорок передней дуги и расположение труб в боковой защитной структуре на жесткость рамы. Так как в большинстве случаев команды предпочитают не наклонять переднюю дугу или иметь небольшой наклон до 5 градусов, передняя дуга в примере не будет иметь наклон, а главная дуга будет иметь наклон в 7 градусов.

Боковая защитная структура должна выдерживать нагрузку в 7000 Н.

Первым был нагружен вариант со следующим расположением труб: передняя дуга без наклона, распорки передней дуги присоединены к середине верхнего элемента боковой защитной структуры. Диагональный элемент располагается от нижней точки передней дуги, к распорке, затем к нижней точке главной дуги, и дополнительная труба от распорки передней дуги к сгибу в нижнем элементе боковой защитной структуре. На рисунке 44 видно, что перемещение составило 5,6 мм.

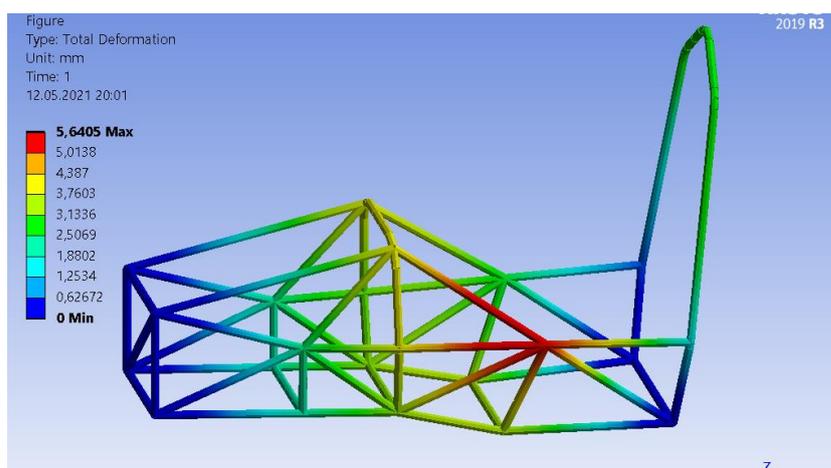


Рисунок 44 – Анализ боковой защитной структуры

Второй была нагружена рама, в которой было изменено направление диагональных труб в боковой защитной структуре (рисунке 45). В данном случае диагональный элемент начинался от верхнего элемента боковой защитной структуры в районе передней перегородки к сгибу на нижнем элементе боковой защитной структуры и от сгиба к верхнему элементу в

районе главной дуги. Смещение в данном случае составило 6,3 мм. Это на 0,7 мм больше, чем в первом варианте.

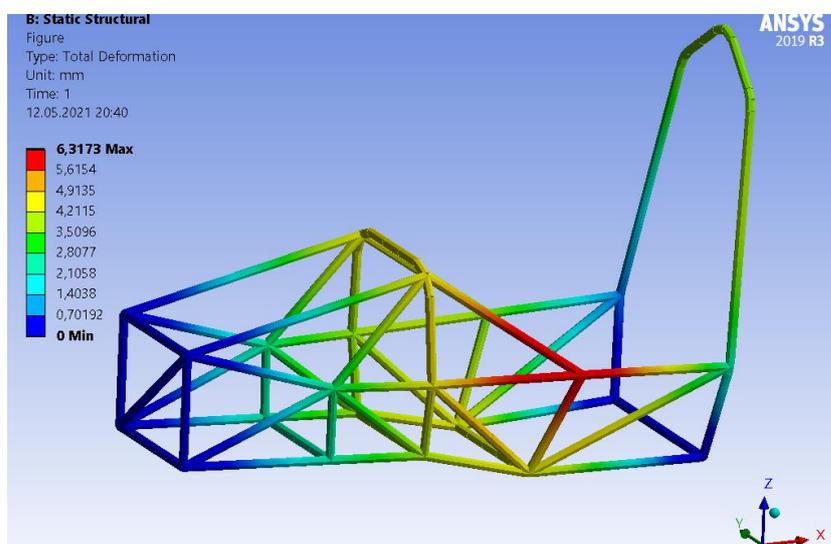


Рисунок 45 – Анализ боковой защитной структуры

На рисунке 46 представлены результаты, когда передняя дуга не имеет наклона, распорки передней дуги присоединены к главной дуге, и изменено направление диагональных распорок, в связи с тем, что в данном расположении нет необходимости в вертикальной трубе. Диагональные элементы располагаются от точки верхнего элемента боковой защитной структуры к сгибу в нижнем элементе, и от сгиба в нижнем элементе к верхнему элементу. В этом случае смещение составило 6,8 мм, что на 1,2 мм больше, чем в первом варианте, когда распорки приведены к середине боковой защитной структуре.

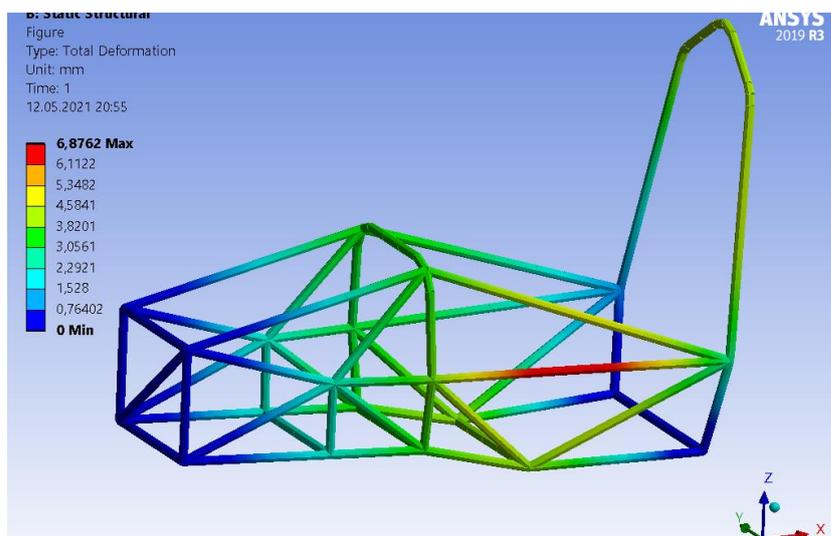


Рисунок 46 – Анализ боковой защитной структуры с распорками прикреплёнными к главной дуге

Из результатов нагружения можно сделать следующий вывод, для улучшения жесткости рамы следует распорки передней дуги присоединять к середине верхнего элемента боковой защитной структуры, а распорки вести от нижней точки передней дуги к нижней точке главной дуги.

#### 2.6.4 Геометрия главной дуги

Как известно главная дуга по регламенту может быть отклонена на 10 градусов вперед или назад. Так же при виде сбоку любая часть ниже верхнего крепления к боковой защитной структуре может быть наклонена вперед на любой угол или не более 10 градусов назад. Один из важных моментов, труба должна согнута, а не обрезана и сварена, также не должно быть перегибов. Иллюстрация на рисунке 47 как раз демонстрирует это.

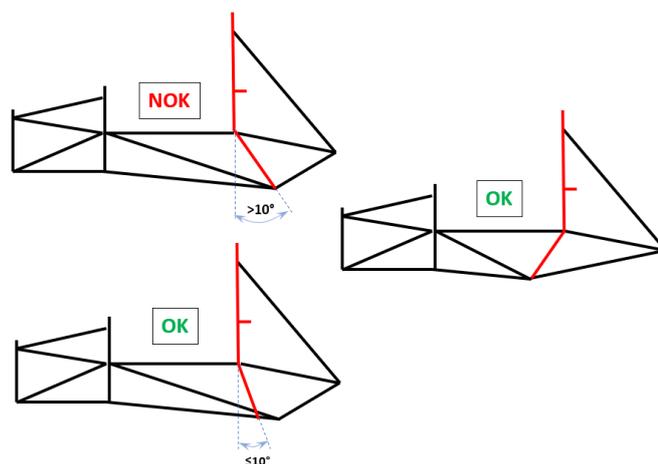


Рисунок 47 – Геометрия главной дуги

Сравним как влияет расположение и конфигурация главной дуги на ее жёсткость. Первым был проанализирован вариант при наклоне главной дуги на 7 градусов назад (рисунок 48). По регламенту главная дуга, как и передняя должна выдерживать нагрузку в 11916 Н. Нагрузка прикладывается к верхней точке главной дуги. Максимальное перемещение составило – 9,9 мм.

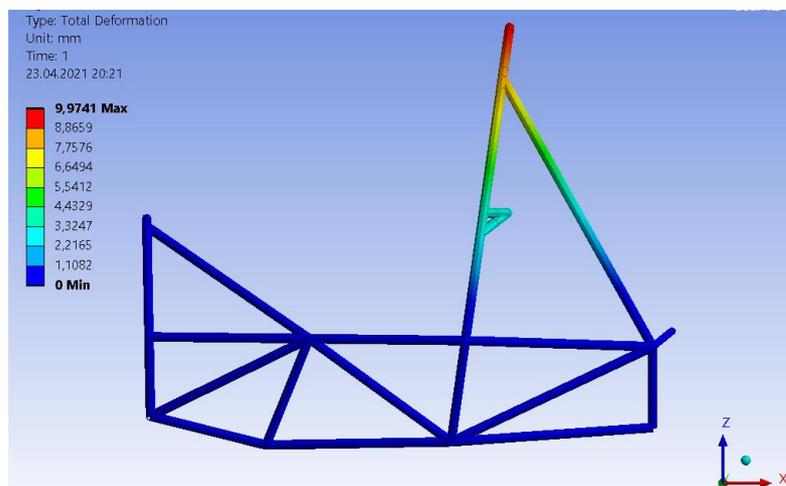


Рисунок 48 – Анализ главной дуги под наклоном в 7 градусов

Следующим вариантом, была рассмотрена главная дуга без наклонов (рисунок 49). В этом случае максимальное перемещение составило 13,6 мм.

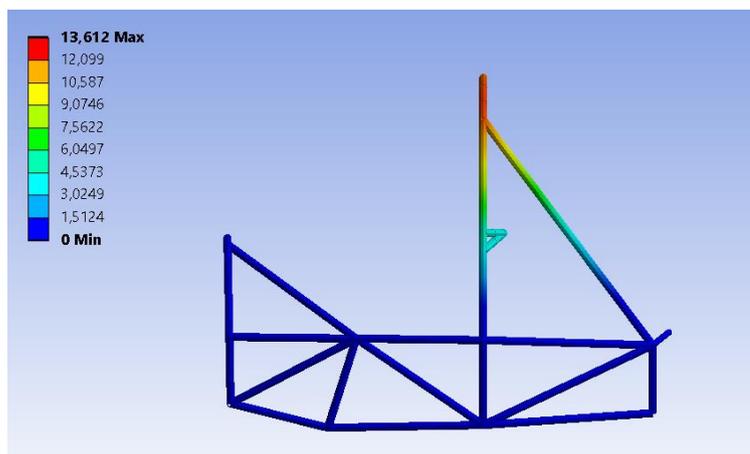


Рисунок 49 – Анализ главной дуги без наклона

Третьим вариантом рассматривалась главная дуга, у которой верхняя часть главной дуги наклонена назад на 7 градусов, а нижняя часть, после верхней точки боковой защитной структуры, на 22 градуса вперед (рисунок 50). Наклон нижней части главной дуги позволяет увеличить пространство под сидением пилота. В этом случае максимальное перемещение составило 10,7 мм.

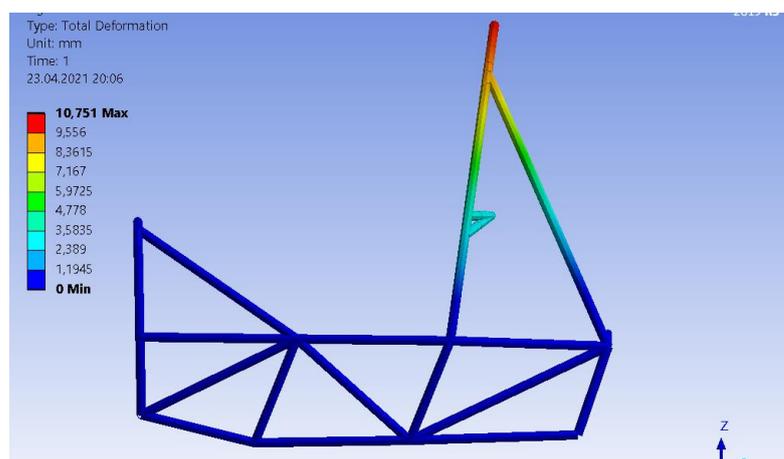


Рисунок 50 – Анализ главной дуги с наклоном под боковой защитной структурой в 22 градуса от вертикальной линии

Из полученных результатов видно, что, располагая главную дугу под наклоном назад можно уменьшить перемещение на 3,7 мм. Также в третьем

варианте перемещение составило на 0,5 мм больше, чем в первом варианте, за счет того, что главная дуга имеет изгиб в нижней части главной дуги.

### 2.6.5 Геометрия опор главной дуги

Вариантов расположения опор главной дуги множество, но не все варианты удовлетворяют требованию регламента, а также некоторые варианты геометрии опор главной дуги приводят к увеличению веса. На рисунке 51 представлено два возможных варианта расположения труб. Оба варианта удовлетворяют требованиям регламента. Однако на рис 51а все выделенные трубы являются опорами, ни один из элементов нельзя исключить, иначе будет потерян принцип триангуляции.

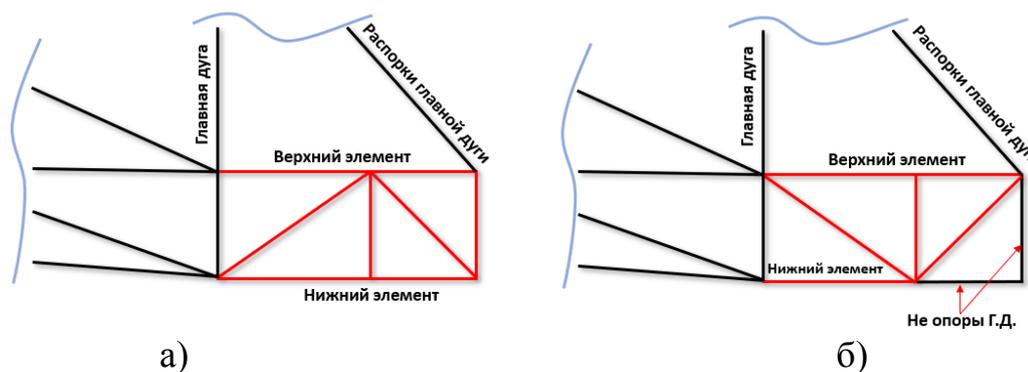


Рисунок 51 – Геометрия опор главной дуги

На рисунке 51б все та же ситуация, но направление диагональных элементов изменено. В этом случае количество труб, обеспечивающих опору передней дуги, уменьшается. Оставшиеся две трубы не являются опорами главной дуги, и могут быть убраны или изготовлены из труб более легкого сечения, так как требования регламента к ним уже не будут применены.

На рисунке 51 показан пример компактной задней части болида одной из зарубежных команд. На ней видно, что опоры передней перегородки составляют только две трубы. Желтая труба не регламентируется, а следовательно, может быть любого сечения. Тем самым вес рамы уменьшается. Так же из иллюстрации видно, что команда не забыла про

пункт ТЗ.2.6 и ввела небольшую оранжевую распорку, так как в данном месте рама имеет изгиб, а следовательно изгиб должен дополнительно усилен.

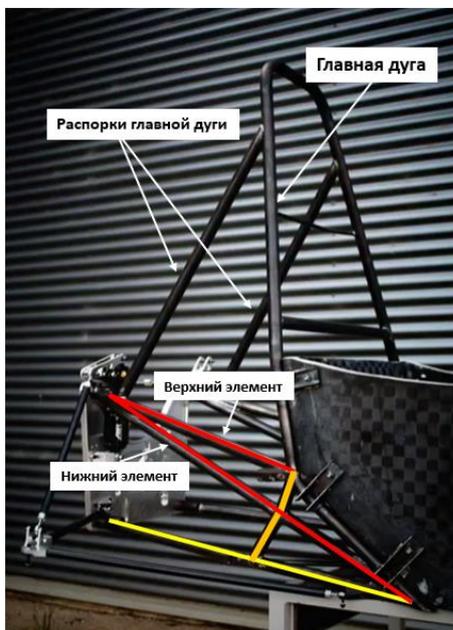


Рисунок 52 – Правильная геометрия

Ниже приведена подборка схем расположения распорок главной дуги и их поддержек (рисунок 53), которые предоставляются в документе SES (таблица конструктивного соответствия).

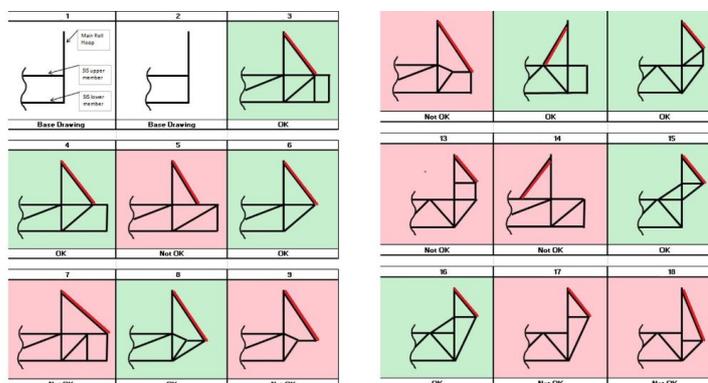


Рисунок 53 – Варианты распорок главной дуги

В данном документе команды заполняют всю информацию об основных элементах конструкции. А именно из каких материалов изготовлены элементы рамы, как расположены распорки и опоры, из какого диаметра и какой толщины используются трубы для каждой структуры, также в данном документе отображается удовлетворяет ли параметрам труба по моменту инерции и площади сечения. На рисунках красным цветом выделены распорки главной дуги. Красные ячейки означают не соответствие конструкции регламенту.

### **Вывод по главе**

Анализирую данные по главе можно сделать следующие выводы:

- для увеличения жесткости каркаса используют триангуляцию. При триангуляции необходимо чередовать трубы так, чтобы они поочередно работали на сжатие и растяжение;
- на этапе проектирования рамы необходимо рассчитать оптимальный вес не только рамы, но и всего болида для обеспечения необходимой жесткости, так как излишний вес приведет к потере технических характеристик, а минимальный вес к потере жесткости;
- при использовании труб в определенной структуре необходимо по регламенту проверять не только минимально разрешенную толщину стенки, но и минимальные требования к моменту инерции и площади сечения;
- при выборе материала в первую очередь необходимо отталкиваться от стоимости и общедоступности материала. Вторым этапом необходимо определиться цель, что хочет добиться команда при замене материала на другой;
- кронштейны подвески необходимо располагать в узлах подвески.

### **3 Математическое моделирование процессов нагружения несущих конструкций**

#### **3.1 Анализ рам болидов класса «Formula Student» на кручение при повороте**

Болид «Scorpion G3», как и все болиды команды «Togliatti Racing Team», изготовлен с пространственной рамой. Это позволяет сохранять небольшой вес болиду, сохраняя при этом необходимую прочность и жесткость конструкции.

При разработке рамы болида «Scorpion G3», учитывали старые рамы проектов «Scorpion G2» и «Scorpion G1», чтобы увидеть, как их можно улучшить.

Рама была подвергнута двум типам нагрузок, которые показали, как она ведет себя при различных условиях, при изгибе и торможении.

Изгибающие нагрузки – это нагрузки, приложенные перпендикулярно оси, которые создают изгибающий момент. Цель данного нагружения – продемонстрировать, что технологические свойства рамы после нагружения не изменились или находятся в пределах допуска.

Тормозные нагрузки – это те, которые испытывает автомобиль во время торможения. Нагрузки возникают на поверхности дороги, где шины соприкасаются с асфальтом. Усилия передаются через стойки подвески на шасси автомобиля через точки крепления. [17]

Все расчеты проводились с использованием программного обеспечения ANSYS.

Первым проводился расчет на кручение во время вхождения в поворот.

В данном случае задняя часть болида рассматривалась как в жесткой заделке, то есть фиксация происходила в точках крепления двигателя. Нагрузка прикладывается к раме через рычаги подвески, рассматриваем их

как абсолютно жесткие элементы, передающие изгибающий момент и момент кручения на раму.

Ниже рассмотрены результаты нагружения трех рам: «Scorpion G1», «Scorpion G2», «Scorpion G3».

К рычагам передней подвески симметрично, но в противоположных направлениях, вертикально вверх прикладывалась сила в номинале 1,5 кН.

Первой была нагружена рама болида «Scorpion G1». Из результатов видно, что максимальное перемещение также происходит в районе передней дуги и составляет 4,1 мм по оси Y (рисунок 54), и по оси Z – 1,5 мм (рисунок 55).

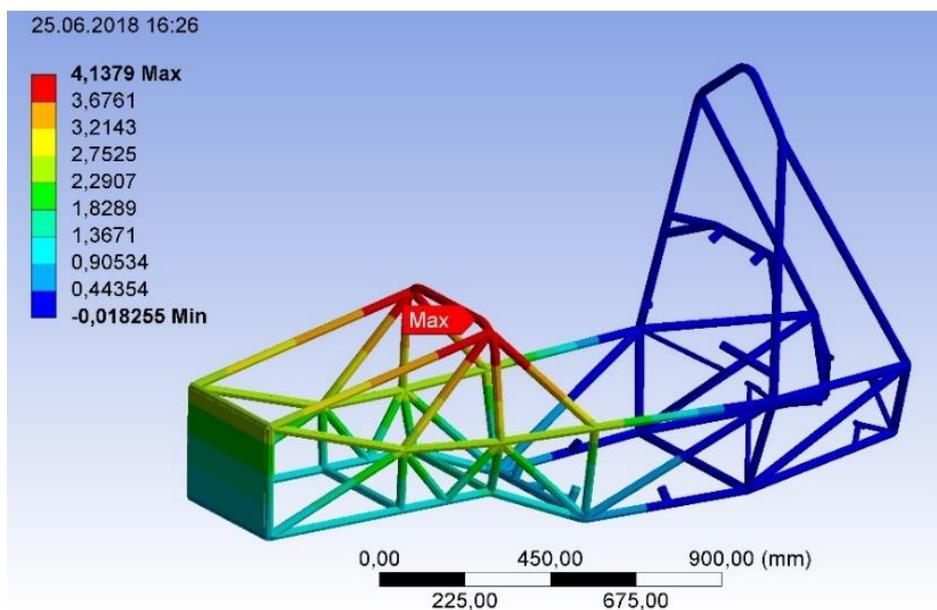


Рисунок 54 – Анализ рамы «Scorpion G1» на кручение при повороте (по оси Y)

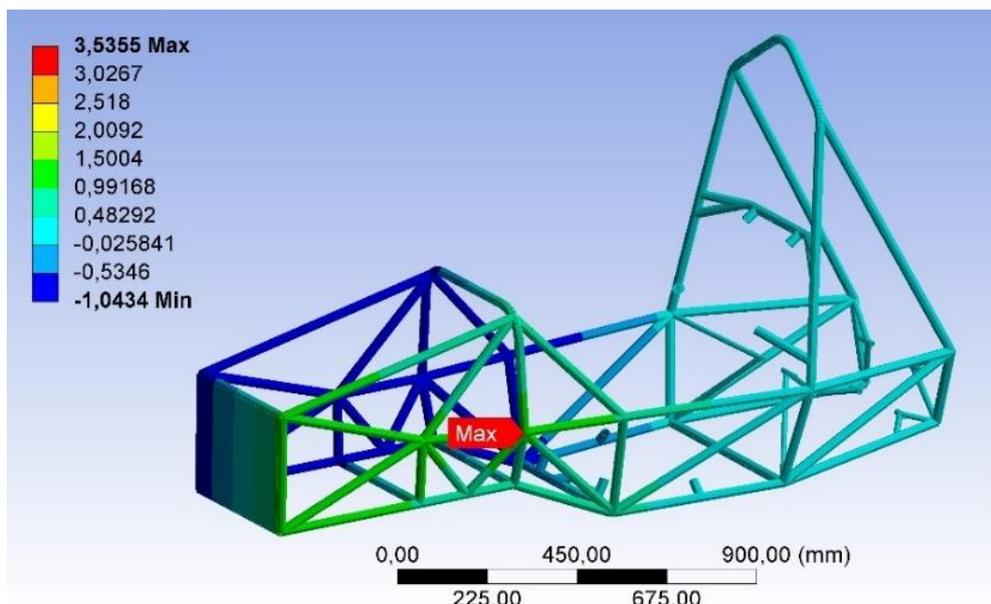


Рисунок 55 – Анализ рамы «Scorpion G1» на кручение при повороте (по оси Z)

Второй была нагружена рама болида «Scorpion G2». Из результатов видно, что максимальное перемещение происходит в районе передней дуги и составляет 3,7 мм по оси Y (рисунок 56), и по оси Z – 2,7 мм (рисунок 57).

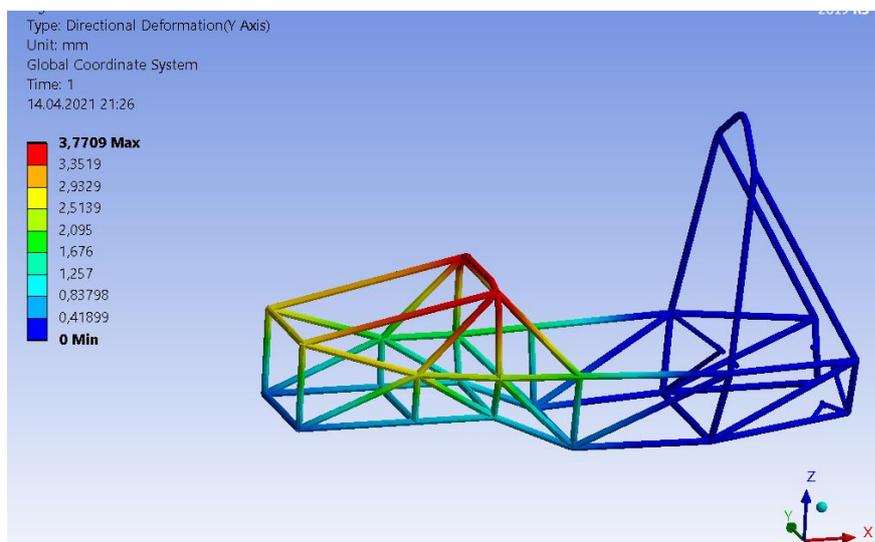


Рисунок 56 – Анализ рамы «Scorpion G2» на кручение при повороте (по оси Y)

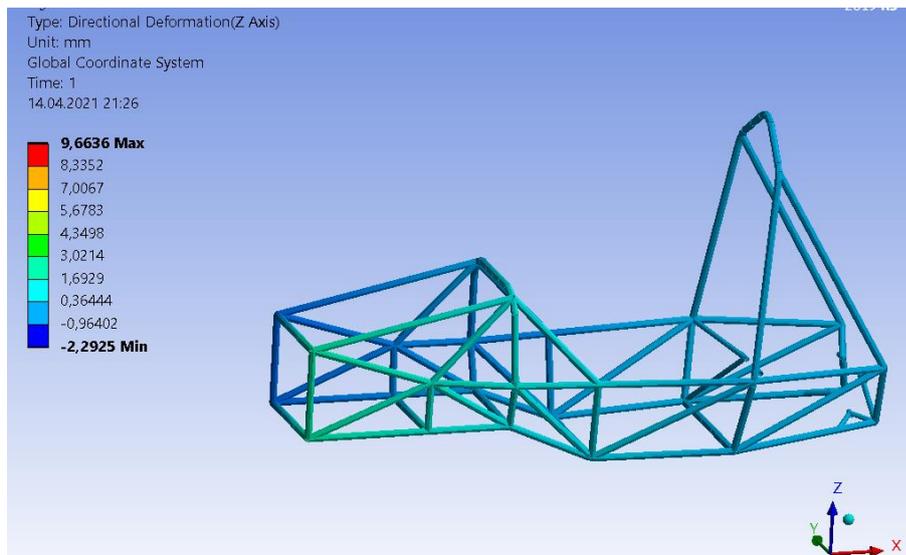


Рисунок 57 – Анализ рамы «Scorpion G2» на кручение при повороте (по оси Z)

Далее была нагружена рама болида «Scorpion G3». Из результатов видно, что максимальное перемещение в районе передней дуги составляет 3,1 мм по оси Y (рисунок 58), и по оси Z – 1,8 мм (рисунок 59).

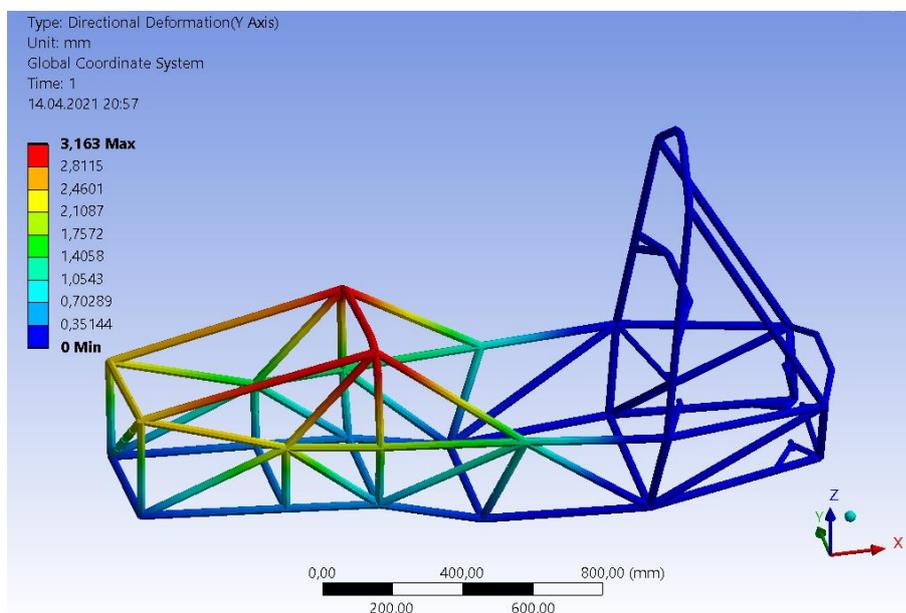


Рисунок 58– Анализ рамы «Scorpion G3» на кручение при повороте (по оси Y)

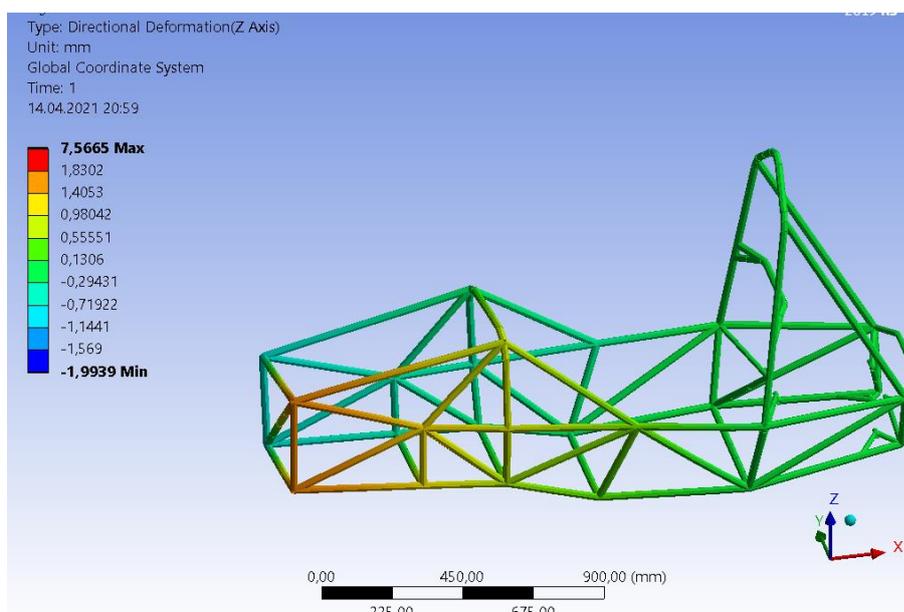


Рисунок 59 – Анализ рамы «Scorpion G3» на кручение при повороте (по оси Z)

### 3.2 Анализ рам болидов класса «Formula Student» на кручение при торможении

Вторым проводился расчет на кручение во время резкого торможения. Также как и во время первого расчета точки фиксации рамы находятся в точках крепления двигателя. Нагрузка прикладывается по касательной рычага по направлению к раме в размере 2 000 Н.

Результаты рамы болида «Scorpion G1» показали, что при данном усилии максимальное смещение по оси Y происходит у передней дуги всего – 6,6 мм (рисунок 60), а по оси Z – 1,1 мм (рисунок 61).

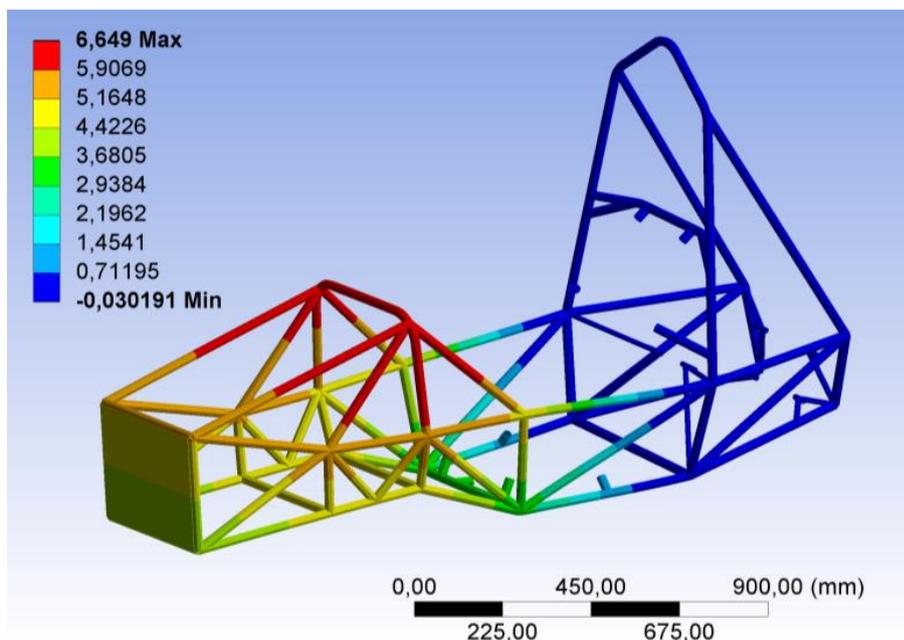


Рисунок 60 – Анализ рамы «Scorpion G1» на кручение при торможении (по оси Y)

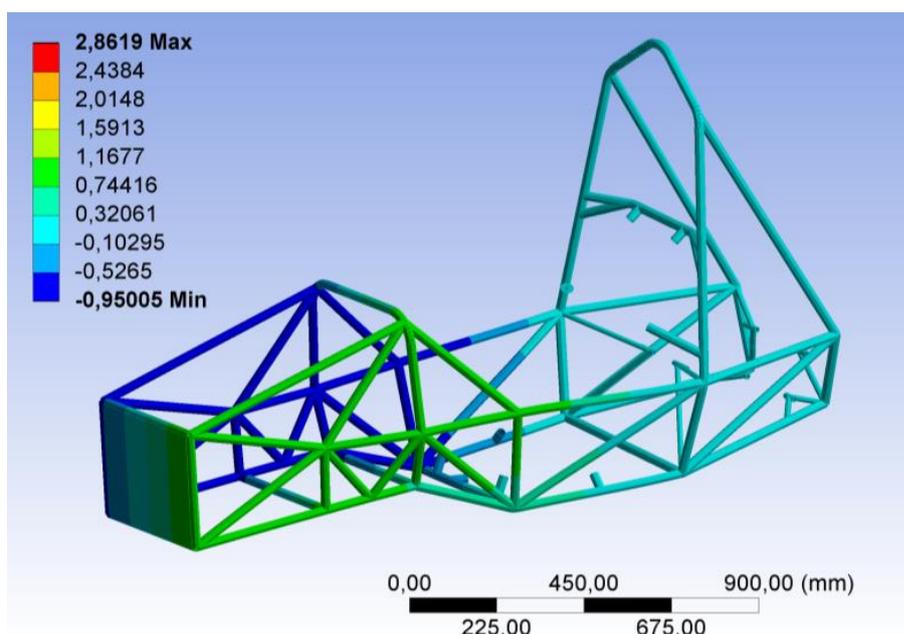


Рисунок 61 – Анализ рамы «Scorpion G1» на кручение при торможении (по оси Y)

Результаты рамы болида «Scorpion G2» показали, что максимальное смещение у передней дуги составляет 5,3 мм (рисунок 62), а по оси Z – 1,1 мм (рисунок 63).

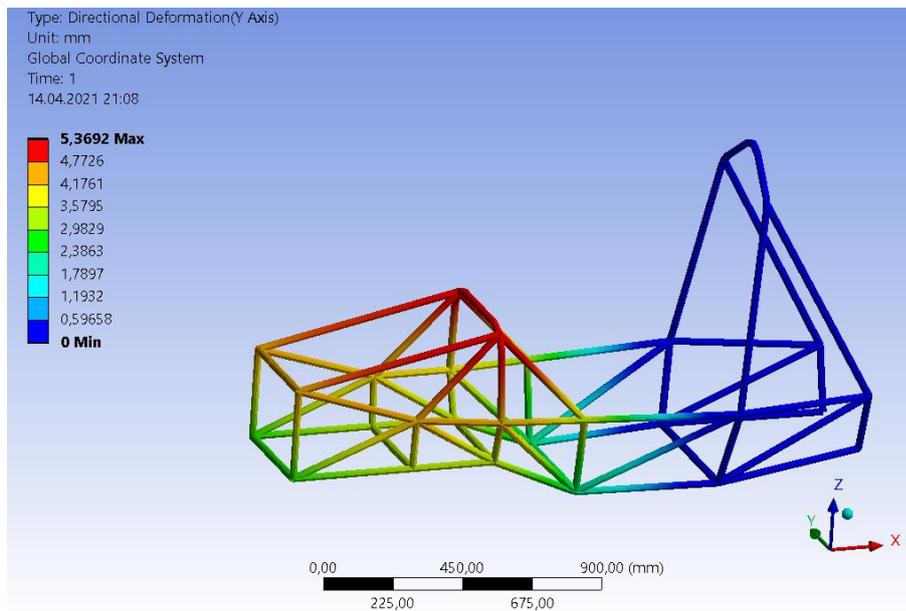


Рисунок 62 – Анализ рамы «Scorpion G2» на кручение при торможении (по оси Y)

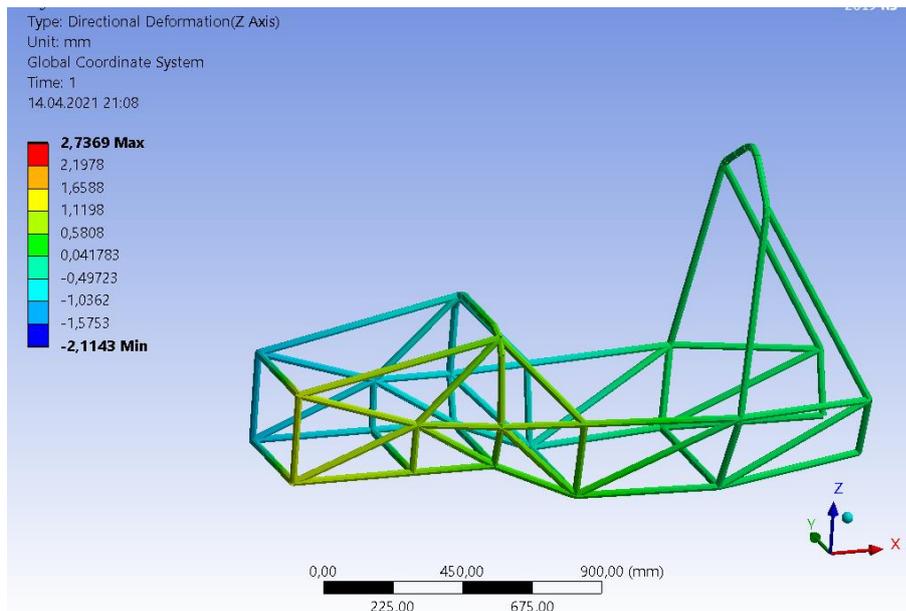


Рисунок 63 – Анализ рамы «Scorpion G2» на кручение при торможении (по оси Z)

По результатам нагружения рамы болида «Scorpion G3» максимальное смещение по оси Y меньше, чем у Scorpion G2 на 2 мм и составило 4,8 мм (рисунок 64), а по оси Z – 1,3 мм (рисунок 65).

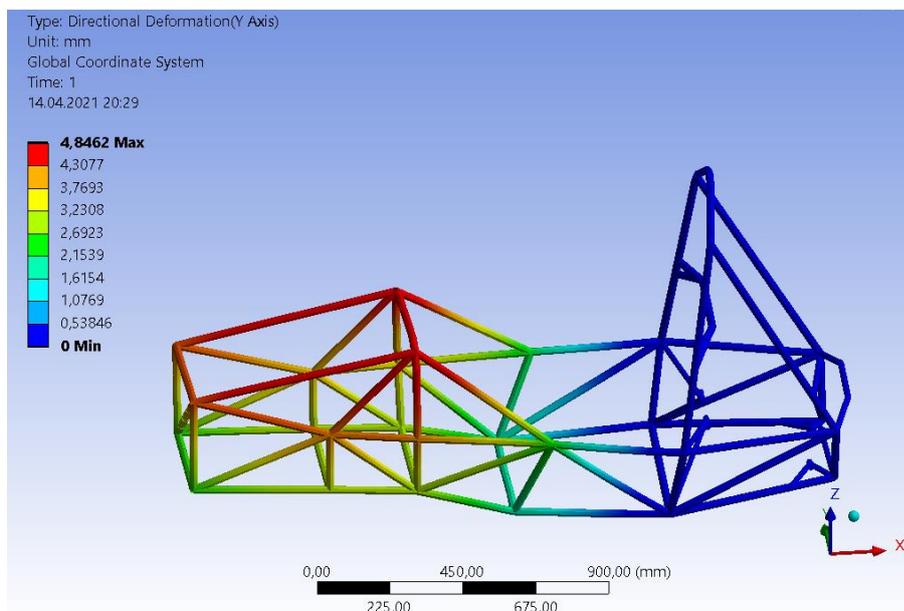


Рисунок 64 – Анализ рамы «Scorpion G3» на кручение при торможении (по оси Y)

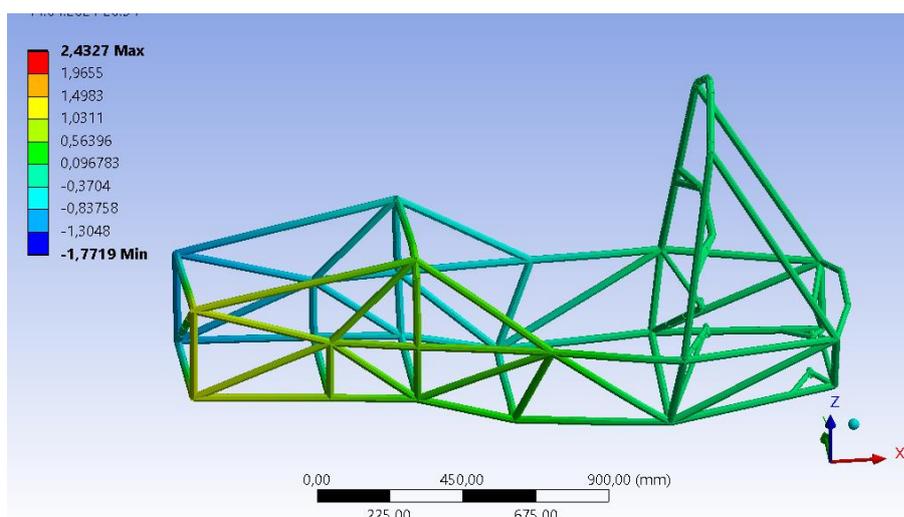


Рисунок 65 – Анализ рамы «Scorpion G3» на кручение при торможении (по оси Y)

Из полученных результатов нагружения видно, что с каждым годом смещение по оси Z и Y уменьшается за счет оптимизации рам. «Scorpion G2» отличается от «Scorpion G1» передней структурой. У рамы болида «Scorpion G1» диагональный элемент опоры передней перегородки и диагональный элемент боковой защитной структуры располагаются в одном направлении и

работают на сжатие. «Scorpion G1» отличается от «Scorpion G2» наличием двух диагональных труб, вместо одной в боковой передней конструкции, трубы располагаются также в одном направлении, только работают уже на растяжение. Второе отличие распорка передней дуги располагается под менее острым углом.

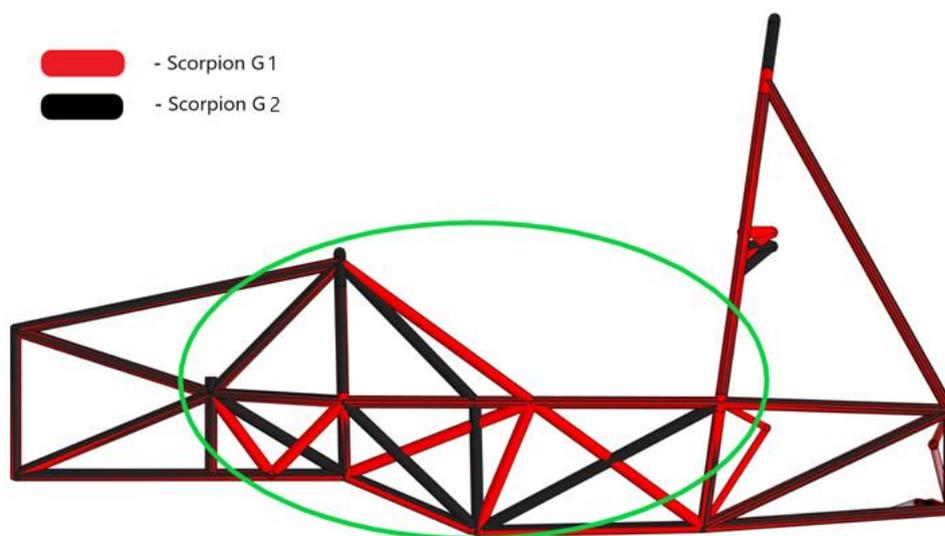


Рисунок 66 – Разница в конструкции рамы «Scorpion G1» и «Scorpion G2»

«Scorpion G3» отличается от «Scorpion G2» и «Scorpion G1» тем, что во всей раме происходит чередование труб, работающих на сжатие и растяжение. Передняя часть рамы увеличена на 20 мм вдоль оси X. Передняя дуга увеличена вниз на 45 мм, данное увеличение позволило расположить рулевую рейку внутри рамы. Высота главной дуги увеличена пропорционально сдвигу передней части на 20 мм.

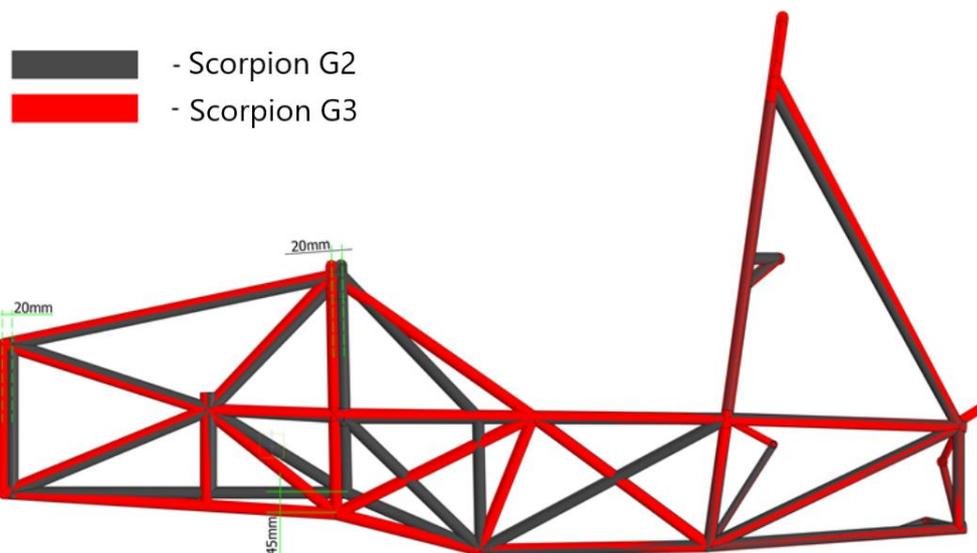


Рисунок 67 – Сравнение конструкций рам «Scorpion G2» и «Scorpion G3»

### Вывод по главе

Из полученных данных видно, что за счет правильного направления труб можно улучшить жесткость рамы.

В «Scorpion G2» в передней структуре была введена одна труба вместо двух как у «Scorpion G1», за счет этого уменьшилась деформация по оси Y приблизительно на 0,5 – 1,5 мм.

Однако за счет изменения направления труб в боковой защитной структуре увеличилась деформация по оси Z на 1,2 мм. Поэтому лучшими оказались результаты у «Scorpion G3», так как направление труб в передней структуре было взято от «Scorpion G2» а направление труб в боковой защитной структуре от «Scorpion G1». За счет этого в раме «Scorpion G3» при виде сбоку можно заметить, что в каждой части рамы образованы треугольники, поэтому жесткость данной рамы выше, чем у «Scorpion G1» и «Scorpion G2». У них при виде сбоку можно заметить, что в районе передней дуги образуется параллелограмм, за счет этого жесткость данных рам снижается. Также стоит отметить, что на жесткость рамы влияет не только вес конструкции и ее геометрия, но и общая масса всего болида.

## 4 Оптимизация конфигурации основных элементов несущей конструкции болидов «Формула Студент»

### 4.1 Построение эффективной конструкции рамы болида «eScorpion 2021»

С каждым годом все больше производителей автомобилей беспокоится об экологии. Производители машин стремятся перевести свое производство с бензиновых двигателей на машины с электродвигателем. Соревнований «Формула Студент» тоже коснулась данная тема. Организаторами соревнований «Формула Студент» была поставлена цель уменьшить число слотов для команд использующих ДВС к 2022 году, а затем и полностью исключить данный вид болидов из соревнований. В связи с этим появилась необходимость разработать электроболид.

На основании ранее полученных результатов в главах 2 и 3 было принято решение построить новую раму для болида «eScorpion 2021» на базе рамы болида «Scorpion G3», так как данная рама имеет оптимальную геометрическую сетку, минимальный вес и достаточную жесткость.

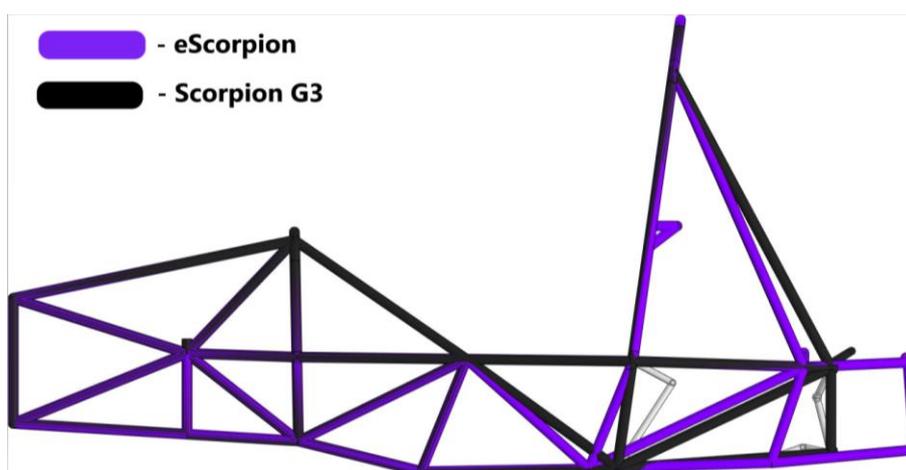


Рисунок 68 – Сравнение конструкций рам Scorpion G3 и eScorpion 2021

Передняя перегородка рамы болида «eScorpion 2021» такая же, как и на всех болидах команды «Togliatti Racing Team», и имеет размеры: 399 мм × 332 мм, данные размеры позволяют использовать стандартный аттенюатор, без дополнительной диагональной трубы в передней перегородки. Но команда по желанию может ее добавить для увеличения жесткости конструкции.

Далее передняя часть рамы электроболида была полностью взята с болида «Scorpion G3». Передняя часть рамы имеет правильную треугольную сетку, а именно идет чередование труб, работающих на сжатие и растяжение, что позволяет иметь большую жёсткость конструкции, чем при другом расположении труб.

Боковая защитная структура болида «eScorpion 2021» имеет одно небольшое отличие от «Scorpion G3» в районе главной дуги. Из-за особенностей компоновки электроболида необходимо было увеличить пространство под сидением пилота для расположения аккумулятора и других элементов. Поэтому было принято решение согнуть нижнюю часть главной дуги начиная от верхнего элемента боковой защитной структуры на 22 градуса вперед. Ранее при анализировании требований регламента, было написано, что нижнюю часть главной дуги можно дополнительно сгибать на любой угол вперед, и не больше 10 градусов назад. В нашем случае требования регламента выполняются. Так же за счет данного сгиба были уменьшены нижний и диагональный элементы боковой защитной структуры.

Основные изменения в раме болида «eScorpion 2021» произошли в задней части. Так как для расположения электродвигателей и аккумуляторов, а также элементов подвески необходимо больше пространства. Поэтому было принято решение увеличить раму на 18,6 см, по сравнению с работой болида «Scorpion G3», добавив боковой защитный каркас.

Для удобного расположения точек подвески, а именно для расположения точек подвески в узлах рамы, были произведены следующие изменения: уменьшен на 8 см верхний элемент опоры главной дуги,

уменьшена длина дополнительной трубы введённой для нижней точки подвески на 15 см.

Уменьшение длины верхнего элемента опор главной дуги позволило сократить длину самих распорок. Длина была сокращена на максимально допустимое расстояние, так как угол между главной дугой и распоркой главной дуги должен быть не менее 30 градусов. В нашем случае угол составил 31 градус, что удовлетворяет требованиям регламента.

Боковой защитный каркас не попадает под требования регламента, а следовательно, в данной зоне не обязательно использовать триангуляцию, а также нет регламентирующих требований по минимальной толщине стенки трубы. Поэтому в данной зоне можно использовать трубы с минимальной толщиной стенки, которая будет обеспечивать необходимую жесткость конструкции.

В задней части рамы в качестве распорок были добавлены две трубы соединяющих левую и правую сторону рамы, одна труба соединяет нижние точки распорок главной дуги, вторая замыкает боковой защитный каркас. В «Scorpion G3» в качестве распорки рамы использовался двигатель.

## **4.2 Прочностные исследования жёсткости рамы болида eScorpion 2021**

Проведем прочностной анализ и сравним результаты с рамой «Scorpion G3». Первым проводился прочностной анализ на кручение при повороте.

Максимальное смещение при нагрузке по оси Y составило – 2,7 мм (рисунок 69), а по оси Z – 1,8 мм (рисунок 70). Из результатов видно, что смещение по оси Y уменьшилось не значительно на 0,4 мм по сравнению с «Scorpion G3».

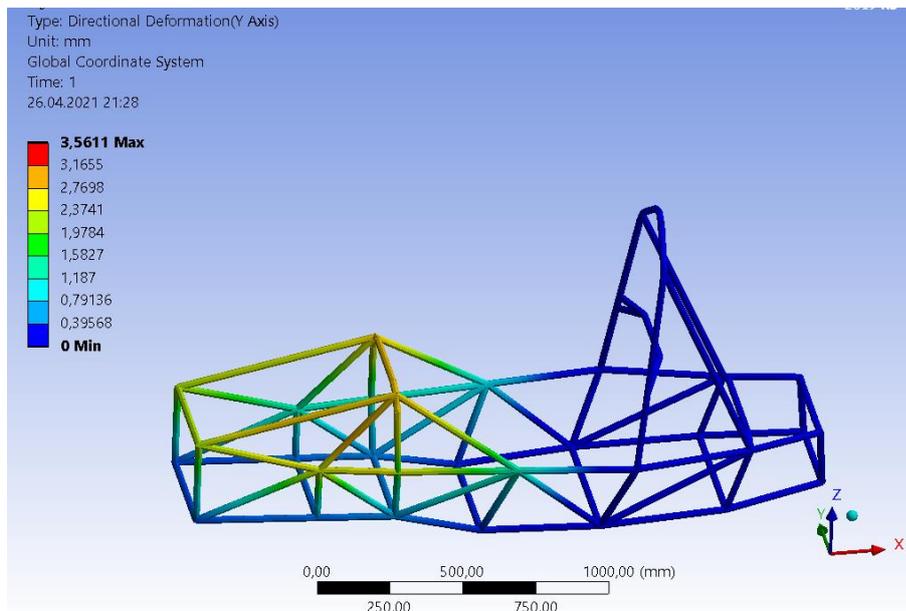


Рисунок 69 – Анализ рамы «eScorpion» на кручение при повороте (по оси Y)

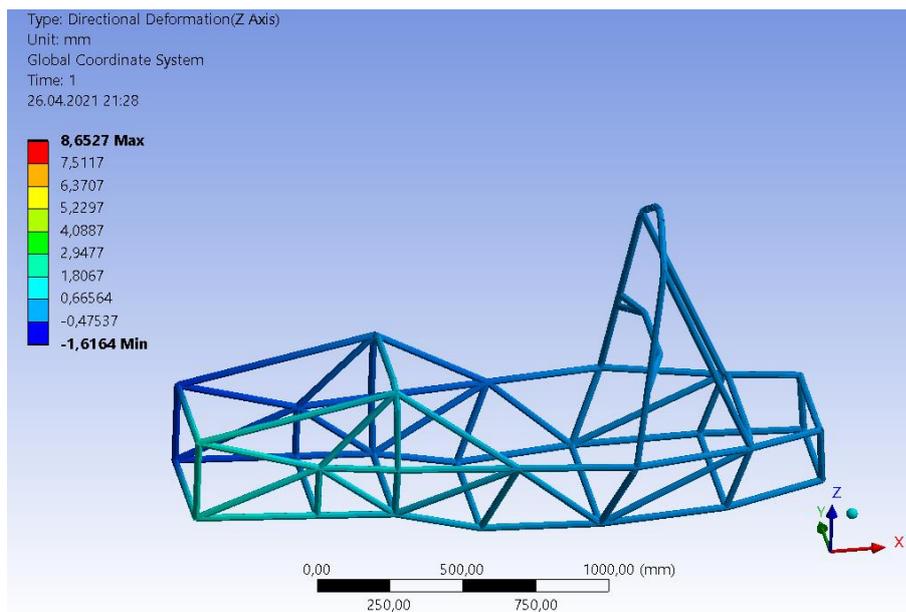


Рисунок 70 – Анализ рамы «eScorpion» на кручение при повороте (по оси Z)

Вторым проводился расчет на торможение. Максимальное смещение по оси Y составило 4,3 мм (рисунок 71), а по оси Z – 1,6 мм (рисунок 72). Данные значения меньше на 0,2 мм по сравнению с «Scorpion G3».

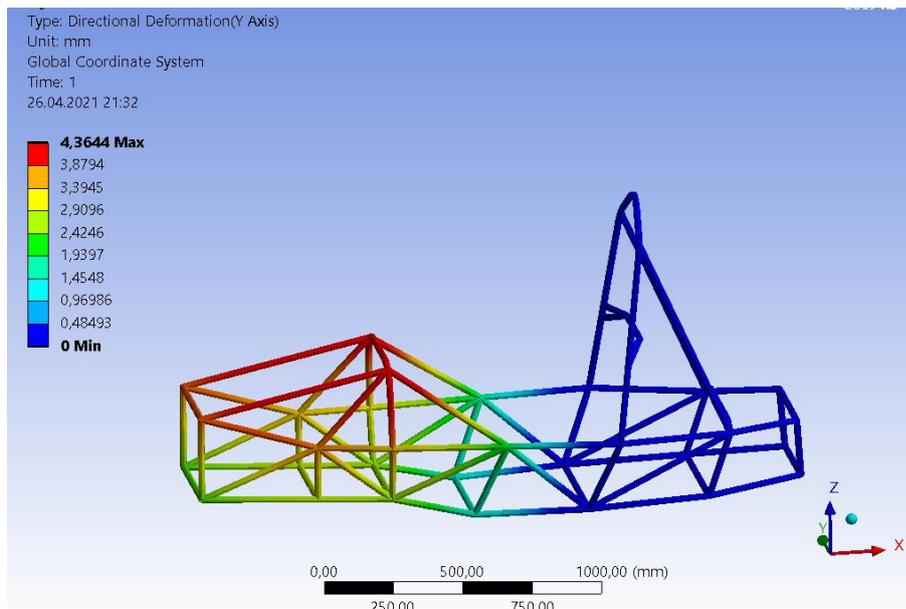


Рисунок 71 – Анализ рамы «eScorpion» на кручение при торможении (по оси Y)

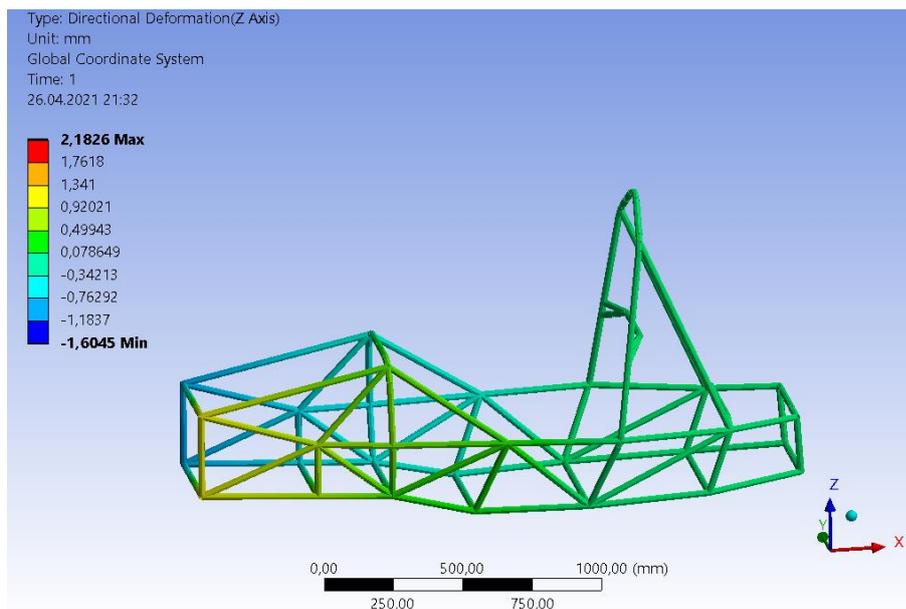


Рисунок 72 – Анализ рамы «eScorpion» на кручение при торможении (по оси Z)

Также был рассмотрен вариант рамы с диагональной распоркой в основании под сидением водителя. Был проведен прочностной анализ рамы на кручение при повороте. Из результатов нагружения видно, что смещение

по оси Y составило 2,5 мм (рисунок 73), а по оси Z – 1,7 мм (рисунок 74), что всего на 0,1 – 0,2 мм лучше, вариант рамы без диагональной распорки в основании.

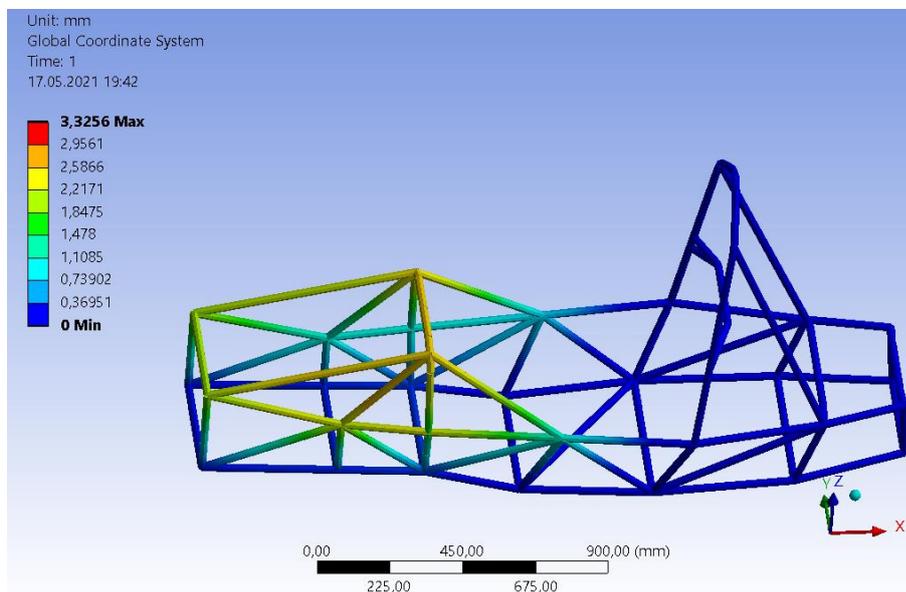


Рисунок 73 – Анализ рамы «eScorpion» с диагональной распоркой в основании на кручение при повороте (по оси Y)

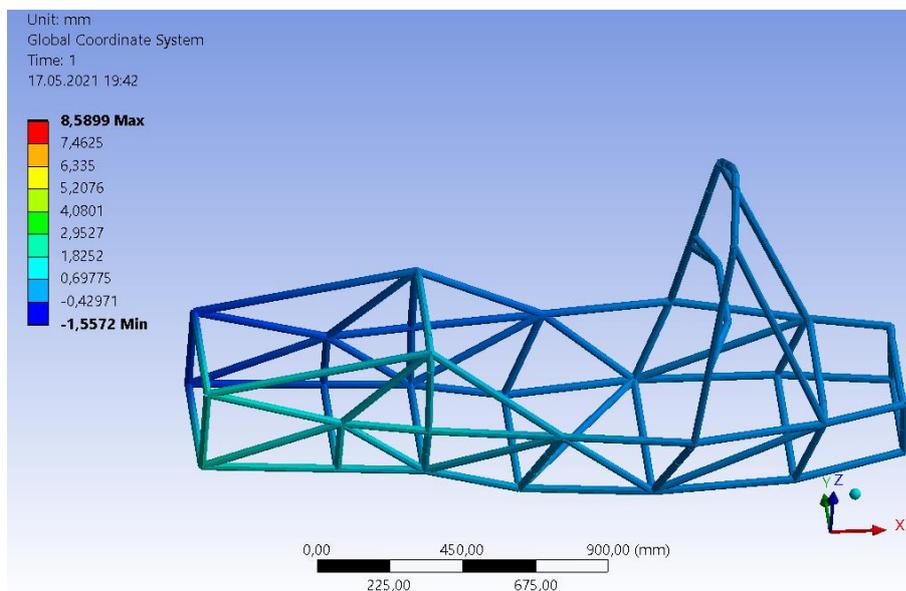


Рисунок 74 – Анализ рамы «eScorpion» с диагональной распоркой в основании на кручение при повороте (по оси Z)

Далее был проведен расчет на кручение при торможении. В этом случае смещение по оси Y – 2,9 мм (рисунок 75), а по оси Z – 0,9 мм (рисунок 76).

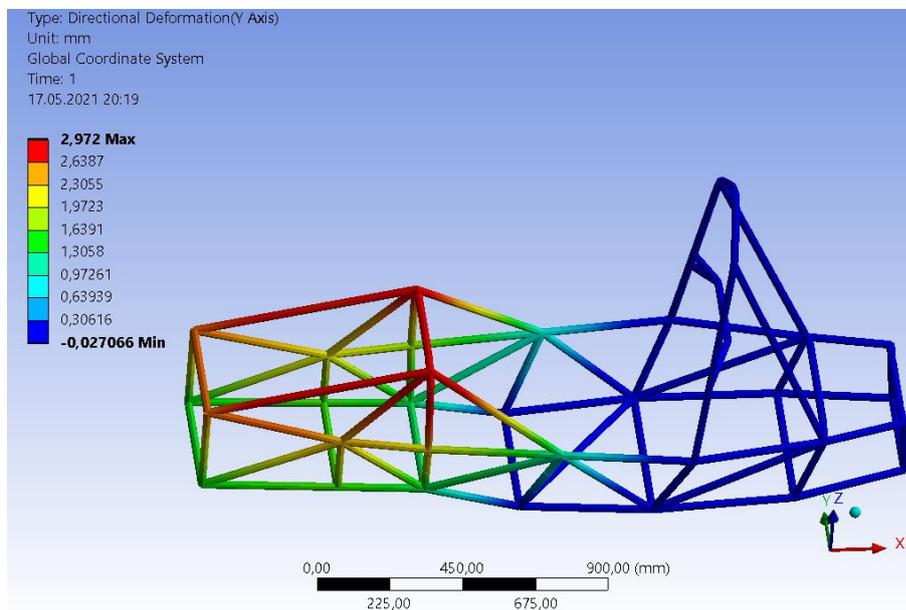


Рисунок 75 – Анализ рамы «eScorpion» с диагональной распоркой в основании на кручение при торможении (по оси Y)

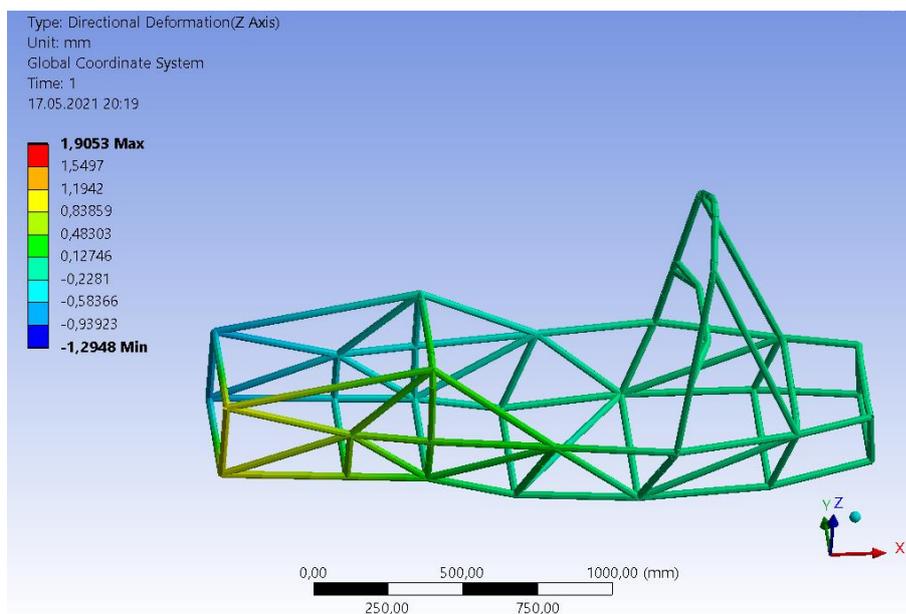


Рисунок 76 – Анализ рамы «eScorpion» с диагональной распоркой в основании на кручение при торможении (по оси Z)

В данном случае диагональная распорка позволяет сократить на 1,4 мм по оси Y и на 0,7 по оси Z. Однако нет необходимости в добавлении диагональной трубы, т. к. диагональная распорка добавляет 0,5 кг, при этом жесткость рамы не увеличивается намного. Также по расчетам жесткость рамы без диагональной распорки является уже достаточной.

Также был рассмотрен вариант рамы, где распорки главной дуги располагались под углом в 35 градусов. Из результатов расчета рамы на кручение при повороте смещение по оси Y составило – 2,9 мм (рисунок 77), а по оси Z – 1,8 мм (рисунок 78). Из результатов видно, что значения не значительно ухудшились по сравнению с распорками, расположенными под углом в 31 мм.

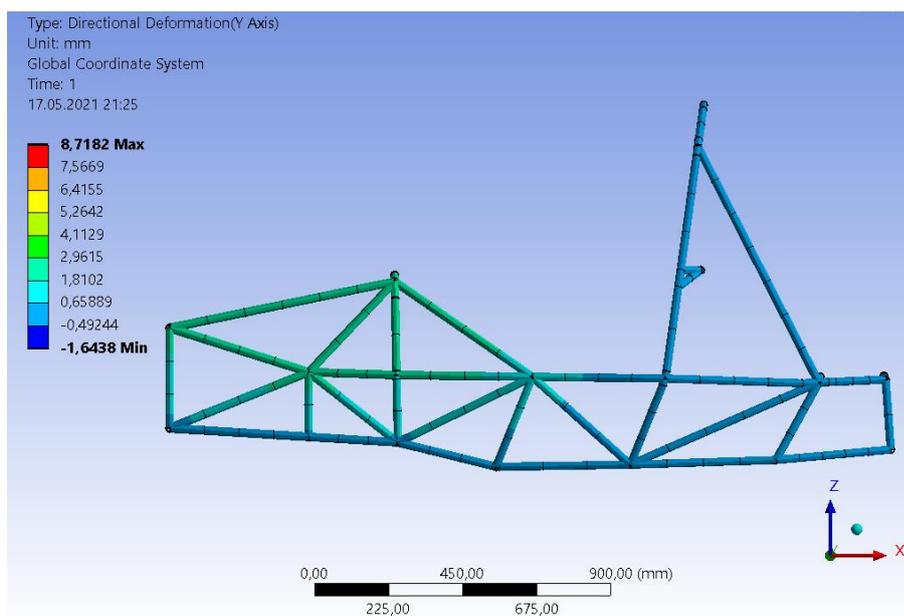


Рисунок 77 – Анализ рамы «eScorpion» с диагональной распоркой в основании на кручение при повороте (по оси Y)

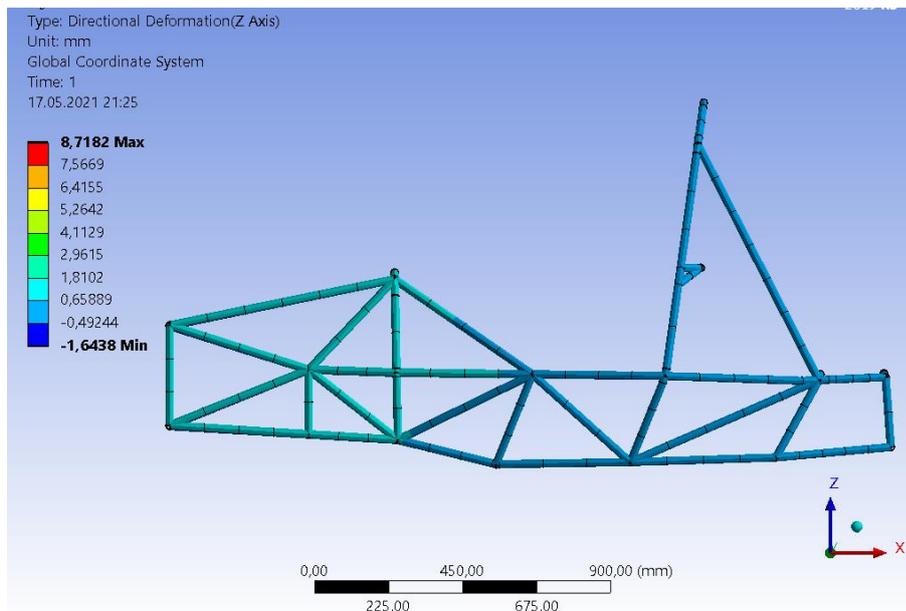


Рисунок 78 – Анализ рамы «eScorpion» с диагональной распоркой в основании на кручение при повороте (по оси Z)

Далее был проведен расчет рамы на кручение при торможении. Из данного нагружения видно, что смещение по оси Y – 4,4 мм (рисунок 79), по оси Z – 1,1 мм (рисунок 80).

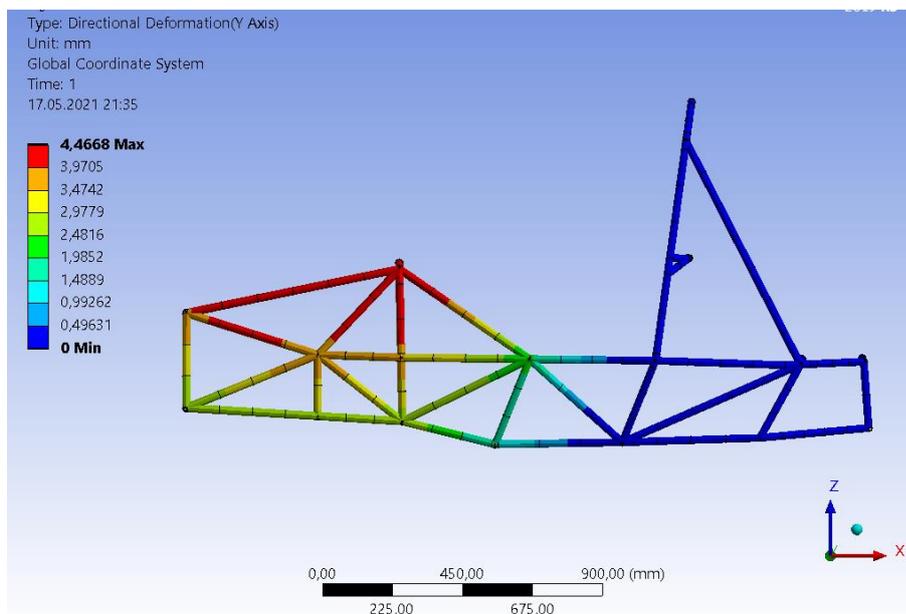


Рисунок 79 – Анализ рамы «eScorpion» с диагональной распоркой в основании на кручение при торможении (по оси Y)

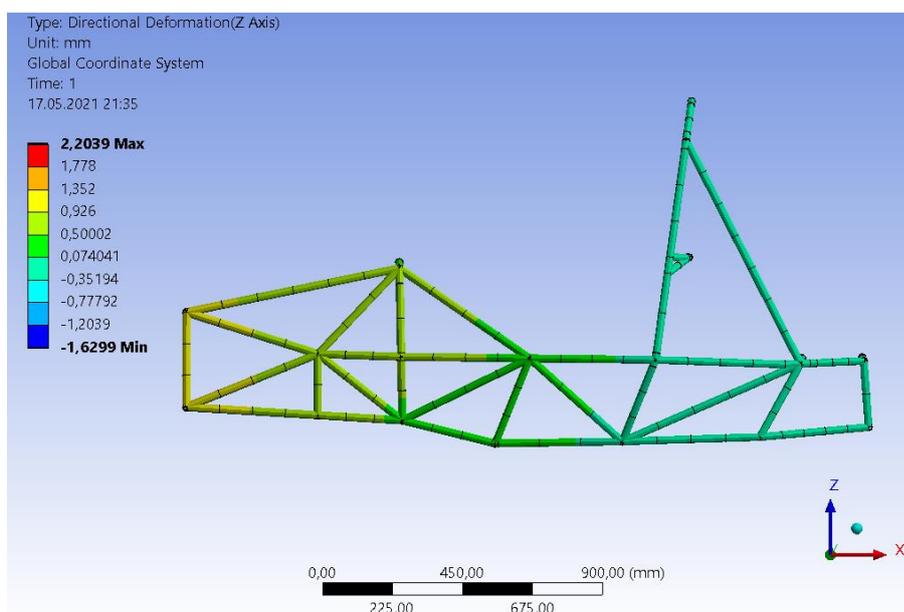


Рисунок 80 – Анализ рамы «eScorpion» с диагональной распоркой в основании на кручение при торможении (по оси Z)

Из данного нагружения можно сделать вывод, что при данном расположении распорок главной дуги улучшений по жесткости рамы не происходит. Результаты значений на 0,1 – 0,2 мм хуже, чем при расположении распорок под углом 31 градус.

К недостаткам расположения распорок под углом в 35 градусов можно отнести увеличение длины распорок главной дуги и опор распорок главной дуги. Ранее в главе 2 были рассмотрены распорки передней дуги, где результаты нагружения также показали, что чем больше угол у распорок, тем больше смещение. Также в данном случае меняется конструктивный подход к проектированию подвески, так как точки подвески приходят в узлы бокового каркаса. При расположении распорок под углом 35 градусов двигается нижняя точка распорок главной дуги назад, что приводит к изменению сбалансированной подвески.

Поэтому оптимальным вариантом было решено использовать распорки под углом 31 градус, так как минимально разрешенный угол распорок 30 градусов.

## **Вывод по главе**

Крутильная жесткость рамы увеличилась на 100 Н·м/град, по сравнению с «Scorpion G3», и составила 2704 Н·м/град.

Незначительная разница в результатах нагружения и в крутильной жесткости объясняется тем, что основная нагрузка при нагружениях приходила на переднюю часть рамы. Передняя часть рамы полностью соответствует «Scorpion G3», за счет этого разница в значениях минимальная.

Вес рамы «eScorpion 2021» больше на 3 кг, чем «Scorpion G3». Увеличение массы объясняется тем, что не смотря на небольшие сокращения длин труб в основных структурах, в которых применяется трубы с толщиной стенки трубы 1,8 мм, произошло удлинение рамы за счет добавления бокового защитного каркаса, в котором используются трубы с толщиной стенки 1,5 мм. Увеличение жесткости объясняется увеличением веса рамы и всего болида.

### **4.3 Практические рекомендации при проектировании рамы**

На основе выше изученного материала в главах 1 – 4 можно дать следующие практические рекомендации к разработке рамной конструкции:

1. Необходимо изучить все требования к рамной конструкции и четко понимать терминологию.
2. Перед началом проектирования рамы необходимо знать, какой двигатель будет использоваться, как он будет устанавливаться в раму и его размеры.
3. Необходимо знать точки подвески для того, чтобы кронштейны подвески приходили в узел рамы или максимально близко к нему. А также необходимо приблизительно понимать, где будут располагаться все

элементы подвески, для того чтобы заранее предусмотреть необходимые элементы рамы.

4. На всех этапах разработки рамы и всего болида нужно проверять стандартные шаблоны.

5. При разработке передней перегородки следует выбрать прямоугольную или квадратную форму, вместо многоугольной, так как к прямоугольной форме подходит стандартный аттенюатор, также в этом случае используется минимальное количество труб, для увеличения фронтальной жесткости можно добавить диагональную трубу. При использовании многоугольной передней перегородки перегружается вся передняя часть за счет того, что к каждой вершине должна подходить труба.

6. Для получения оптимальной жёсткости достаточно использовать принцип триангуляции в раме так, чтобы при виде сбоку в каждой части рамы образовывались треугольники.

7. По результатам нагружения переднюю дугу желательно располагать с наклоном вперед до 10 градусов. А главную дугу с наклоном назад до 10 градусов.

8. Распорки передней дуги желательно не располагать под острым углом к передней дуге, и не доводить распорки до главной дуги, в этом случае пилотом труднее быстро выйти из болида. Оптимально доводить распорки до середины боковой защитной структуры, в случае если в нижнем элементе защитной боковой структуры есть сгиб.

9. Желательно для опор распорок главной дуги использовать только две трубы, верхний и нижний элемент. И распорки присоединять именно к ним. Дополнительно присоединенные трубы к нижнему элементу рамы не будут регламентироваться, поэтому можно использовать трубы с любой толщиной стенки, обеспечивающую необходимую жесткость. Оптимальный угол для расположения распорок главной дуги к главной дуге от 30 до 35 градусов.

10. Переднюю и главную дугу не следует изготавливать с большим количеством изгибов. К каждому изгибу необходимо подводить опору. Переднюю дугу не следует делать полукруглой сверху, так как в этом случае уменьшается пространство для расположения приборов для управления болидом. Желательно, делать ровную поверхность с закруглениями по краям. А главную дугу наоборот следует делать зауженной кверху. Однако необходимо следить за сгибами, так как не должно быть перегибов, и минимальный радиус сгиба должен быть равен трем диаметрам трубы.

11. Не нужно образовывать дополнительную секцию в передней структуре между передней дугой и передней перегородкой. Данная секция образовывается, когда команда решает соединить левую и правую сторону. Это приводит только к лишним килограммам.

12. Стоит обратить внимание на длину передней части болида от передней перегородки до передней дуги. Для правильного размера необходимо учесть рост пилотов и компоновку педального узла, так как в противном случае пилот не сможет достать до педалей.

13. То же самое и с зоной кокпита, есть минимальный шаблон, но никто не запрещает делать данную зону длиннее. Однако также стоит взять во внимание рост и комплектацию пилотов, так как при очень большом расстоянии от передней дуги до задней, пилот может не дотянуться до руля, или наоборот при минимальном расстоянии кокпита, пилот не сможет быстро покинуть болид.

14. Также стоит использовать как можно меньше гнутых труб в раме.

## Заключение

В данной работе были решены следующие задачи:

1. Рассмотрены требования регламента «Formula Student» к построению рамной конструкции.
2. Рассмотрены аналоги типовых решений несущих рамных конструкций.
3. Разработаны теоретические аспекты расчета прочности рамы на кручение.
4. Промоделированы существующие рамные конструкции команды «Togliatti Racing Team».
5. Проведен сравнительный анализ существующих рамных конструкций команды «Togliatti Racing Team» и выбрана оптимальная геометрия.

В первой главе были подробно рассмотрены требования регламента к рамной конструкции гоночного болида класса «Формула Студент. Были проанализированы существующие рамные конструкции команд «Формулы Студент», которые имеют свои плюсы и минусы. Рассмотрены требования и особенности изготовления монокока.

Во второй главе была подробно рассмотрена геометрия всех основных элементов рамы, и проведены прочностные расчеты. Данные расчеты показали, как влияет геометрия определенной части рамы на ее жесткость. Так же в данной главе были рассмотрены варианты минимизации веса. Рассмотрено что такое триангуляция и что она дает. Рассчитана жесткость для рамы гоночного болида «Scorpion G2».

В третьей главе были рассмотрены существующие рамные конструкции команды «Togliatti racing team» и проведены прочностные расчеты. По результатам прочностных анализов лучшей оказалась рама гоночного болида Scorpion «G3» за счет оптимальной геометрии. Также был

проведен сравнительный анализ, который показал отличительные особенности каждой рамы, которые повлияли на жесткость конструкций.

В четвертой главе была разработана оптимизированная рамная конструкция для болида «eScorpion 2021» на основе рамы гоночного болида «Scorpion G3». Так как по результатам нагружения в 3 главе, данная рамная конструкция оказалась оптимальной. Также в оптимизированной раме «eScorpion 2021» был добавлен боковой каркас безопасности. Рассмотрен оптимальный вариант расположения распорок главной дуги. Рассмотрено влияние на жесткость диагональной трубы в основании рамной конструкции. И проведены прочностные анализы, на основе которых были сделаны выводы об оптимальной геометрии для рамной конструкции «eScorpion 2021»

На основе всего изученного были получены практические рекомендации по разработке рамной конструкции для болидов класса «Formula Student» в 4 главе.

Таким образом задачи поставленные в начале работы были выполнены, а цель достигнута.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bhande Akshay S., Design and Analysis of Space Frame Chasis for Formula Student Race Car / Bhande Akshay S., Bhagat R. V., Anwer D., Anand A., Nitnaware P. T.// International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)
2. Chambers, A. E. Development of a Test Standard for Determining the Torsional Rigidity of a Formula SAE space Frame / A.E. Chambers, S. A. Rodriguez, R. M. Walsh, D. Wootton // American society for Engineering Education (ASEE's 123<sup>rd</sup> Annual), – 2016
3. Clarke, P. Technical Introduction for New Teams/ P. Clarke, 2014
4. Cunningham, A. Carbon Fiber Monocoque Development for a Formula SAE Racecar / A. Cunningham, A. Ferrell, M. Lee, T. Loogman// Senior Project Design Report Cal Poly Formula SAE, – 2015.
5. FSAE RULES 2021 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx> (дата обращения: 15.12.2019)
6. FSG RULES 2019 [Электронный ресурс]// URL: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/> (дата обращения: 18.12.2019)
7. Jannis, D.G. van Kerkhoven, Design of a Formula Student race car chassis [Электронный ресурс] // URL: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/10019.pdf> (дата обращения: 18.03.2021)
8. Kale, A. Design of Formula Student Race Car Chassis [Электронный ресурс] // URL: [https://www.academia.edu/26127708/DESIGN\\_OF\\_FORMULA\\_STUDENT\\_RACE\\_CAR\\_CHASSIS](https://www.academia.edu/26127708/DESIGN_OF_FORMULA_STUDENT_RACE_CAR_CHASSIS) (дата обращения: 23.03.2021)
9. Krzikalla, D. Analysis of Torsional Stiffness of the Frame of a Formula Student Vehicle / D. Krzikalla, J. Mesicek, J. Petru, A. Sliva, J. Smiraus// Journal of Applied Mechanical Engineering

10. More, A. Design, Analysis and Optimization of Space Frame Chassis/ A. More, C. Chavan, N. Patil//International Journal of Engineering and Technology (IJET)
11. Pathak, R. Analysis of Student Formula Car for optimum safety and performance/ R. Pathak// EPRA International Journal of Research and Development (IJRD)
12. Sithananum, C. SAE Student Formula Space Frame Design and Fabrication [Электронный ресурс] // URL: <https://ru.scribd.com/document/115923929/SAE-Student-Formula-Space-Frame-Design-and-Fabrication> (дата обращения: 02.03.2021)
13. Siswanto, R. Odeling Analysis of The Effect of The Main Roll-Hoop Length on The Strength of Formula Student Chassis/ R. Siswanto, R. Subagyo, H. Isworo, F. Gapsari // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies
14. Turner, S. Chassis Design Analysis for Formula Student Car [Электронный ресурс]// URL: [https://warwick.ac.uk/fac/sci/eng/meng/flowmotion/projects/automotiveengineeringprojects/chassisanalysis/es327\\_-\\_chassis\\_design\\_analysis\\_for\\_formula\\_student\\_car\\_-\\_2009\\_-\\_0619743.pdf](https://warwick.ac.uk/fac/sci/eng/meng/flowmotion/projects/automotiveengineeringprojects/chassisanalysis/es327_-_chassis_design_analysis_for_formula_student_car_-_2009_-_0619743.pdf) (дата обращения: 18.02.2021)
15. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. Т.3. - 8-е изд. Перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестоквой./ В.И. Анурьев. - М.: Машиностроение, 2001. – 864 с.
16. 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.
17. 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.

18. Головин Д. В., Прочностной Анализ Рамы Болида «Формула Студент» ПНИПУ / Головин Д. В. // Международный научно – исследовательский журнал, – 2015. – 15 -19 с.
19. Головин Д. В., Анализ материалов для производства рамы болида класса «Формула Студент» [Электронный ресурс]// URL: <https://scienceproblems.ru/images/scientific-articles/o-nauchnyh-zhurnalah/analiz-materialov-dlja-proizvodstva-ramy.pdf> (дата обращения: 04.04.2021)
20. Головин Д. В., Разработка общей концепции болида «Формула Студент» / Д. В. Головин // Сборник трудов конференции «Проблемы функционирования систем транспорта». – 2015. – 165-171 с.
21. Иванов А. С., Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учебное пособие / А. С. Иванов, П. А. Давыденко, Н.П. Шамшов. - М.: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 276 с.
22. Кулагин А. Л., Исследование Свойств Пассивной Безопасности Пространственного Каркаса Рамы Спортивного Автомобиля Класса «Формула Студент» / Кулагин А. Л., Гончаров К. О., Тумасов А.В., Орлов Л. Н.// Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6
23. Кулагин А. Л., Комплексная разработка и оценка прочности пассивной безопасности и элементов спортивных автомобилей класса «Formula Student» на основе композиционных материалов / А. Л. Кулагин, Р.В. Денужаев, К. О. Гончаров, А. В. Тумасов, Л. Н. Орлов // Сборник трудов 4-го Всероссийского форума «Студенческие инженерные проекты» – 2016. – 75-80 с.
24. 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.

25. Основы расчетов на прочность и жесткость элементов конструкции [Электронный ресурс] // URL:  
<https://portal.tpu.ru/SHARED/d/DROBCHIK/materiali/Posobiya/Tab/sopro mat.pdf> (дата обращения: 11.01.2020)
26. Плетин Д. А., Особенности конструкции гоночных автомобилей класса Формула / Д.А. Плетин // Журнал Известия МГТУ «МАМИ» №1(19), – 2014, т.1, – 63-66 с.
27. Пути повышения жесткости конструкции [Электронный ресурс]// URL:  
[https://student.com/503035/tehnika/puti\\_povysheniya\\_zhestkosti\\_konstrukts ii](https://student.com/503035/tehnika/puti_povysheniya_zhestkosti_konstrukts ii) (дата обращения: 15.02.2020)
28. Родионов В. Ф., Фитгерман Б.М., Проектирование легковых автомобилей. – М.: машиностроение, – 1980. – 479 с.
29. Рубцов А. В., Применение сварных стальных конструкций в гоночных болидах серии «Формула Студент» на примере болида WhiteShark2014/ А. В. Рубцов, А. А. Воронин, А. В. Бобровский // Сборник тезисов докладов ХLI Самарской областной студенческой конференции. -2015. – 288 с.
30. Хусаинов А. Ш., Пассивная безопасность автомобиля: учебное пособие для студентов направлений 190100.62 «Наземные транспортно-технологические комплексы» по профилю – Автомобиле- и тракторостроение и 190109.65 «Наземные транспортно-технологические средства» по специализации «Автомобили и тракторы» / А. Ш. Хусаинов, Ю. А. Кузьмин. – Ульяновск: УлГТУ, 2011 – 89 с.