

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Проектирование и эксплуатация автомобилей»  
(наименование)

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Автомобили и автомобильный сервис  
(направленность (профиль)/специализация)

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

на тему «Разработка выпускной системы гоночного болида класса Formula Student»

Обучающийся

А. С. Клименко

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д. А. Бобровский

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

Тольятти 2024

## **Аннотация**

Разработка выпускной системы гоночного болида класса Formula Student. Выпускная квалификационная работа. Тольяттинский Государственный Университет, 2024.

Целью данной работы является разработка выпускной системы гоночного болида класса «Формула Студент», соответствующей основному регламенту соревнований «Формула Студент», а также, имеющую лучшие показатели по сравнению с конструкцией команд соперников. В связи с этим был определен ряд задач: 1) описать проект «Формула Студент»; 2) Изучить теоретические аспекты проектирования выпускной системы для автомобилей с ДВС; 3) провести анализ существующих конструкций выпускных систем зарубежных команд; 4) определить исходные данные, провести расчеты и разработать выпускную систему для гоночного болида.

В ходе работы был проведен анализ конструкций выпускных систем гоночных болидов соревнований «Формула Студент», описаны теоретические аспекты, описан процесс проектирования системы выпуска.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 49 страниц, содержащей 3 таблиц, 24 рисунка и графической части, содержащей 6 листов.

## **Abstract**

Development of an exhaust system for a Formula Student racing car.  
Graduation qualification work. Togliatti State University, 2024.

The purpose of this work is to develop an exhaust system for a Formula Student racing car that complies with the main regulations of the Formula Student competitions and has better performance than the designs of rival teams. In this regard, several tasks were defined: 1) describe the Formula Student project; 2) study the theoretical aspects of designing an exhaust system for cars with internal combustion engines; 3) analyze existing designs of exhaust systems of foreign teams; 4) determine the initial data, carry out calculations and develop an exhaust system for a racing car.

In the course of the work, an analysis of the designs of exhaust systems of Formula Student racing cars was carried out, theoretical aspects were described, and the process of designing an exhaust system was described.

The graduation qualification work consists of an explanatory note of 49 pages, containing 3 tables, 24 figures and a graphic part containing 6 sheets.

## **Содержание**

Введение.....	5
1 Состояние вопроса .....	6
1.1 Соревнования «Формула Студент».....	6
1.2 Требования регламента к разработке выпускной системы. .....	8
1.3 Теоретические аспекты выпускной системы .....	15
2 Сравнительный анализ существующих конструкций выпускной системы, используемых на гоночных автомобилях «Формула Студент».....	23
3 Разработка выпускной системы гоночного болида класса «Формула Студент».....	30
4 Безопасность и экологичность технического объекта .....	41
Заключение .....	46
Список используемой литературы и используемых источников.....	47

## **Введение**

На данный момент актуальным является вопрос получения квалифицированных инженерных кадров и в том, как эффективно организовать получения студентами необходимых теоретических и практических навыков.

Проект «Формула Студент» является одним из эффективных решений. Проект объединяет в себе и теоретические и практические развитие для студентов высших учебных заведений. Соревнования «Формула Студент» имеют регламент, в котором указано, что студенческая команда каждый год должна создавать новый гоночный болид, за счет чего студенты за четыре года обучения могут получить большое количество теоретических знаний и практических навыков.

Цель данной работы: разработать эффективную систему впуска для перспективного гоночного болида класса «Формула Студент» на базе общепринятого регламента соревнований.

Были определены задачи работы:

- проанализировать регламент соревнований «Формула Студент». Определить основные разделы, касающиеся проектирования впускной системы гоночного болида;
- изучить и провести анализ конструкций впускных систем гоночных болидов класса «Формула Студент» российских и зарубежных команд, участвующих в соревнованиях;
- исследовать основные теоретические аспекты проектирования впускной системы, а также применить их на практике.

# **1 Состояние вопроса**

## **1.1 Соревнования «Формула Студент»**

Соревнования «Формула Студент» – студенческие соревнования международного уровня.

По правилам соревнований, участие могут принимать только студенты высших учебных заведений. У соревнований «Формула Студент» существует собственный регламент. Регламент соревнований требует от студентов проектировать и создавать новый гоночный болид класса «Формула Студент» каждый год, болид должен отличаться от болида предыдущего года на 70%. Кроме того, чтобы получать высокие баллы и занимать призовые места, команде необходимо развиваться, применять новые технологии, новые конструкторские решения, развивать свои компетенции, чтобы иметь преимущество.

«Формула Студент» – проект, благодаря которому студенты превращаются в квалифицированных автомобильных инженеров. Студент, прийдя в проект, несколько раз проходит полный производственный цикл настоящего автомобиля. Начиная от создания концепции прототипа гоночного автомобиля, и заканчивая сборкой физической модели гоночного автомобиля, и его испытаниями, студент принимает участие в каждом этапе проекта. После прохождения нескольких полных циклов производства студент набирается достаточно опыта, как в инженерной деятельности, так и получает умение работы в команде, понимание производственных процессов (с точки зрения экономической части проекта, логистики, менеджмента). По итогу студент, прошедший высшую инженерную школу, является желанным кадром на многих предприятиях. На рисунке 1 изображен один из дней российского этапа соревнований.



Рисунок 1 – «Формула Студент» Россия

Соревнования состоят из нескольких важных этапов, которые необходимо пройти студентам, чтобы заработать баллы. Первым этапом является пре-инспекция, которая включает в себя проверку оборудования, экипировки и огнетушителей. По сути, данная проверка необходима для подтверждения сертификации всего оборудования и экипировки, используемых командой во время соревнований.

Далее идет этап технической инспекции самого гоночного болида. Инспекторы проверяют автомобиль на полное соответствие всем пунктам основного регламента соревнований «Формула Студент», что подтверждает безопасность болида.

Болид, не прошедший техническую инспекцию (не соответствующий регламенту), не может быть допущен к динамическим дисциплинам. В следующем этапе студентам необходимо пройти статические дисциплины, которые включают в себя защиту конструкции (студенты должны доказать судьям грамотность и обоснованность своих инженерных решений), защиту отчета о стоимости (студенты должны предоставить судьям отчет о стоимости всего производства болида, включая затраты на материалы, услуги, оплату

труда, тесты), бизнес презентация (студенты представляют свой болид с точки зрения бизнес концепции, и должны доказать, что идея, связанная с гоночным болидом, рентабельна и способна приносить прибыль). Хотелось бы отметить, что практически половина всех баллов зарабатывается студентами именно в статических дисциплинах.

Последним этапом проходят динамические дисциплины. Динамические дисциплины – это гоночные испытания, такие как восьмерка, ускорение 75 метров, автокросс и гонка на выносливость (которая также включает в себя топливную эффективность). Пилотами гоночного болида во время динамических испытаний являются также студенты.

## **1.2 Требования регламента к разработке выпускной системы.**

Регламент является неоспоримым документом, которому должны подчиняться все участники соревнований. Регламент соревнований создавался за счет многолетнего опыта организаторов соревнований, за счет чего в регламенте прописаны все необходимые требования по безопасности и технике безопасности для студентов, для обеспечения порядка и безопасности для всех участников и организаторов соревнований. Также, регламент и сейчас обновляется постоянно, и каждая новая серия этого документа включается в себя все больше правил и требований к конструкции гоночного автомобиля.

Рассмотрим основные разделы регламента соревнований «Формула Студент»:

- административный, включающий в себя обзор соревнований, правила поведения в зоне соревнований, общие требования для команд, перечень необходимых документов и крайние сроки их подачи, общие сведения;
- технический, включающий в себя технические требования к конструкции гоночного болида, приводятся требования, которые должны быть учтены студентами на этапе проектирования автомобиля, чтобы соответствовать нормам безопасности;

- раздел с требованиями только для гоночных болидов с двигателем внутреннего сгорания CV, в котором прописаны требования к конструкции автомобиля, относящиеся к автомобилям с ДВС;
- раздел с требованиями только для электромобилей EV, в котором прописаны требования к конструкции автомобиля, относящиеся к автомобилям с электрической силовой установкой;
- раздел с требованиями только для автономных автомобилей DV, в котором прописаны требования к конструкции автомобиля, относящиеся к автомобилям–беспилотникам;
- «техническая инспекция, в котором описаны общие сведения о технической инспекции, сведения о специфичных этапах технической инспекции (инспекция аккумулятора, электрическая инспекция, инспекция автономности, тест водонепроницаемости), а также сведения об основных этапах технической инспекции (механическая инспекция, тест на опрокидывание, тест на шум, тест на торможение, взвешивание авто), а также сведения об инспекции, которую команды должны пройти после прохождения всех динамических дисциплин;
- статические дисциплины, в этом разделе прописаны общие сведения обо всех статических дисциплинах, которые включают в себя защиту конструкции, защиту отчета о стоимости, бизнес–презентация» [11].;
- динамические дисциплины, в котором описаны правила вождения для студентов, сведения о возможных штрафах и штрафных очках, сведения о каждой динамической дисциплине, таких как восьмерка, ускорение 75 метров, автокросс, гонка на выносливость, топливная эффективность.

Для выполнения данной работы наиболее значимым разделом является раздел с общими техническими требованиями к конструкции автомобиля.

Регламентом соревнований «Формула Студент» ограничен объем силового агрегата, а именно максимально допустимый объем не может превышать 710 кубических сантиметров. Сделано это для того, чтобы обеспечить безопасность студентам, являющимися пилотами, однако не

имеющие профессионального опыта пилотирования. К тому же большая мощность не нужна болидам «Формула Студент», так как трассы в основном больше спроектированы для проверки маневренности, а не скорости. «Для ограничения мощностных характеристик, безопасности пилотов и снижения экологических выбросов в регламенте под пунктом CV 1.7.1. Для ограничения мощности двигателя необходимо установить рестриктор в систему впуска воздуха; весь воздушный поток должен проходить через рестриктор.

Рестриктор ограничивает поток воздуха для снижения мощности. Допускается для атмосферных двигателей расположением между дроссельной заслонкой и ГБЦ» [16]. Схему установки рестриктора во впускной системе можно увидеть на рисунке 2.

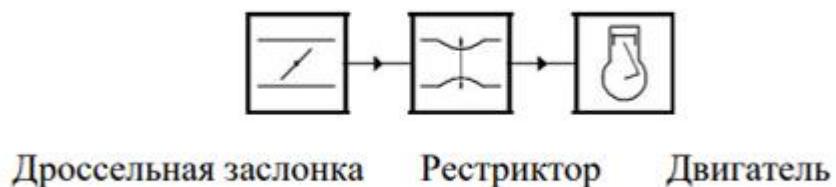


Рисунок 2 – Схема установки рестриктора во впускной системе гоночного болида класса «Формула Студент»

Также некоторые команды оснащают двигатель болида турбокомпрессором или механическим нагнетателем воздуха. Для таких случаев в регламенте соревнований так же предусмотрена схема, которую можно увидеть на рисунке 3. В такой схеме рестриктор должен устанавливаться перед системой впуска.

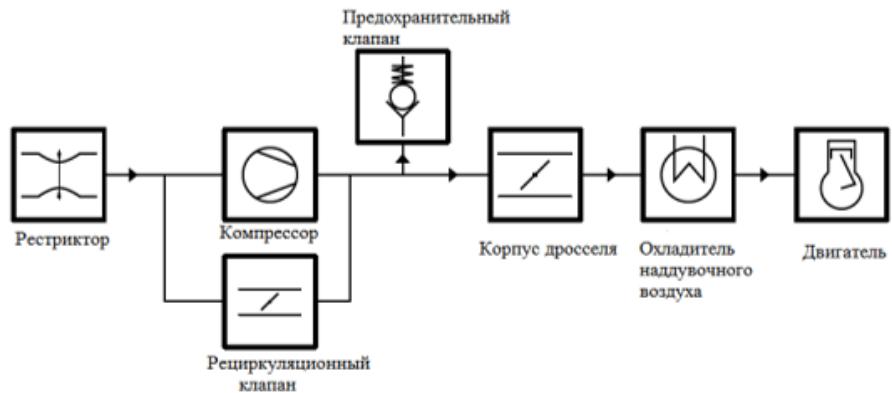


Рисунок 3 – Схема установки рестриктора во впускной системе гоночного болида класса «Формула Студент»

Пункты регламента, посвященные системе выпуска отработавших газов:

- CV 1.3.1 Все элементы систем управления впуска и выпуска воздуха, должны располагаться внутри поверхности, ограниченной вершиной дуги и внешними гранями четырёх шин. Огибающая поверхность расположения впускной системы представлены на рисунке 4.

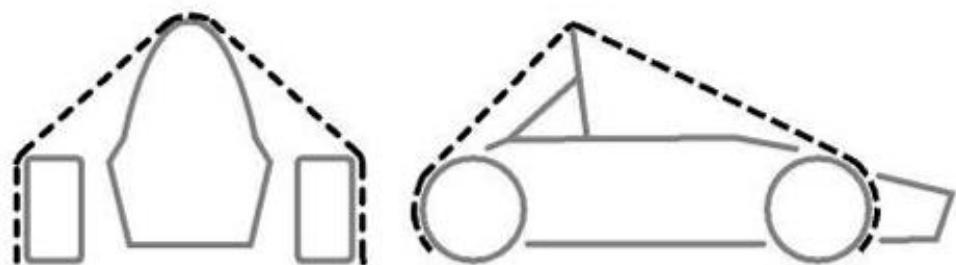


Рисунок 4 – огибающая поверхность гоночного болида класса «Формула Студент»

– Т2.1.3 Ни одна из частей автомобиля не может входить в "свободную зону", определяющуюся двумя вертикальными линиями, проходящими на расстоянии 75 мм, считая спереди автомобиля и 75 мм, считая от конца внешнего диаметра передних и задних шин. Колеса в это время расположены прямо. Эта зона впоследствии будет проходить от внешней плоскости колеса/шины к внутренней плоскости колеса/шины. Данное правило также схематично изображено в регламенте соревнований «Формула Студент», это можно увидеть на рисунке 5.

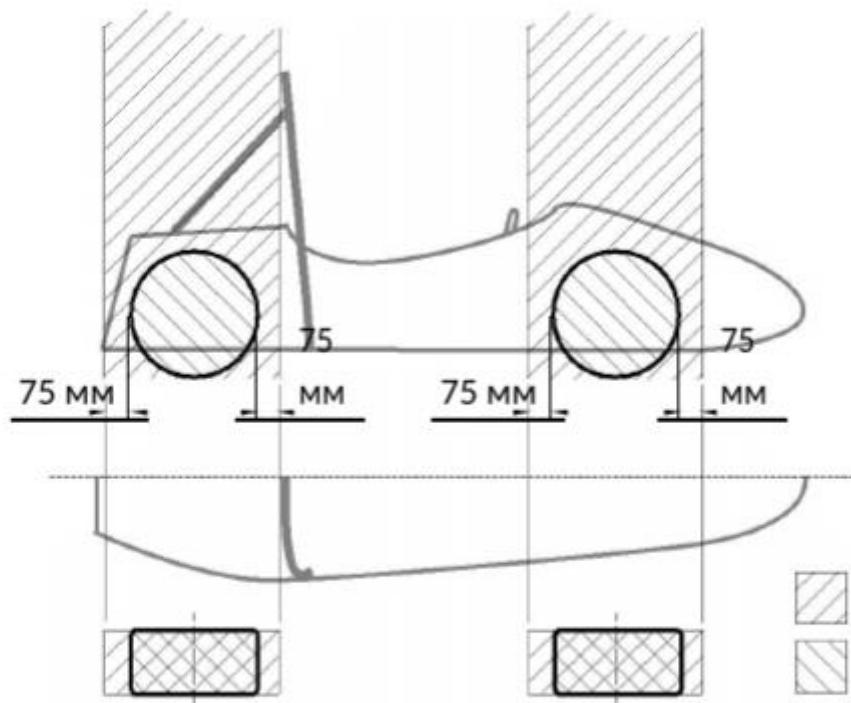


Рисунок 5 – Свободная колесная зона гоночного болида класса  
«Формула Студент»

– «CV 3.1.1 Выпускная система должна быть расположена так, чтобы пилот не подвергался воздействию выхлопных газов на любой скорости движения гоночного болида с учетом тяги автомобиля.

– CV 3.1.2 Выхлопная труба или трубы не должны выступать больше, чем на 450 мм за центральную линию задней оси гоночного болида, а также располагаться не выше 600 мм над землей.

– CV 3.1.3 Любой компонент выхлопной системы (коллектор, глушитель, и т. д.), который выступает перед главной дугой гоночного болида класса «Формула Студент», должен быть огражден, чтобы предотвратить контакт с людьми, приближающимися к гоночному болиду. Температура внешней поверхности не должна наносить людям вред при касании с ней.

– CV 3.1.4 Запрещено использование волокнистого/поглощающего материала, например сетки, на внешней части выпускного коллектора или выхлопной системы» [13].

Все эти пункты строго проверяются техническими инспекторами во время прохождения основной части технической инспекции гоночного болида. Если выхлопная система не соответствует хотя бы одному пункту регламента соревнований, то есть три варианта развития событий:

- команда будет дисквалифицирована;
- команда получит штраф (размер штрафа обсуждается между техническими инспекторами и организаторами соревнований);
- команда может привести свой автомобиль в соответствие регламенту в течение времени, пока доступна зона прохождения технической инспекции соревнований.

Кроме того, к системе выпуска отработавших газов есть также требование, касательно шума, издаваемого выхлопной системой во время работы двигателя:

– CV 3.2.1 Максимальной тестовой скоростью для двигателя является машинная скорость, которая соответствует средней скорости поршня в 15–25 м/с для двигателя. Расчетная скорость будет округлена до ближайшей кратной

500 оборотам в минуту скорости. Исходя из этих вычислений, максимальный уровень шума может быть не более 110 Дб.

– СВ 3.2.2 Тестовый холостой ход для определенного двигателя выбирает команда. Холостой ход определяется их откалиброванным холостым ходом. Если частота вращения при холостом ходе варьируется, тогда автомобиль будет протестирован на разном количестве оборотов при холостом ходе, определенном командой. Максимально допустимый уровень шума на холостом ходу не может превышать 103 Дб.

Можно увидеть, что требования по шуму гоночного болида замеряют специальным устройством. На соревнованиях «Формула Студент», как правило существует отдельная зона для прохождения данного этапа технической инспекции. Также, инспекторы вправе в любой момент попросить команду проехать в зону технической инспекции для повторной проверки выпускной системы гоночного болида, а также для замера уровня шума.

### Выводы по разделу

В данном разделе были описаны международные соревнования «Формула Студент», а также проанализирован основной регламент соревнований, определены необходимые разделы. Были рассмотрены пункты регламента соревнований, касающиеся конкретно выпускной системы гоночного болида класса «Формула Студент»

### 1.3 Теоретические аспекты впускной системы

Выпускная система отработавших газов ДВС в автомобиле необходима для того, чтобы отводить продукты сгорания из камеры сгорания двигателя, кроме того, выхлопная система необходима автомобилю для подавления высокого уровня шума, создаваемого силовым агрегатом. На данный момент большая часть современных выхлопных систем имеют большое влияние на мощностные и динамические характеристики автомобиля.

«Еще на первых автомобилях, которые начали выходить в серию, выхлопная система имела лишь функцию поглощения сильного шума от двигателя автомобилей. Такие старинные системы включали в себя канал, который раздваивался на два выхода. Для того, чтобы повысить мощность двигателя, использовали клапанную систему, которая помогала отводить газы в атмосферу. Из-за применения такого рода конструкций начали выпускаться различные законопроекты, ограничивающие уровень шума серийных автомобилей, почему серийным производителям и пришлось со временем усовершенствовать свои конструкции, отводящие отработавшие газы» [21].

«В настоящее время законами регулируется предельно допустимый уровень шума и уровень содержания токсичных компонентов выхлопных газов» [8].

«Система выпуска обеспечивает:

- продувку и хорошую очистку цилиндров двигателя;
- минимальные потери энергии отработавших газов.

Применяемые в наше время системы выпуска состоят из следующих частей:

- выпускной коллектор – отводит отработавшие газы от отдельных цилиндров двигателя в один газоотводящий канал;
- резонатор – применяется для уменьшения противодавление в системе и сглаживания ударных волн;

— глушитель – предназначен для снижения уровня шума. Глушитель состоит из следующих элементов: поглощающие, отражающие и ограничительные;

— каталитический нейтрализатор – используется в выпускных системах для уменьшения доли содержания токсичных компонентов в выхлопных газах» [4].

Автомобили, на которых применяется каталитический нейтрализатор, имеют некоторые потери в мощности своего силового агрегата, по причине того, что отработавшие газы сталкиваются с большим сопротивлением при прохождении по выпускному каналу с каталитическим нейтрализатором.

На рисунке 6 можно увидеть типичную схему установки выпускной системы на серийных автомобилях.

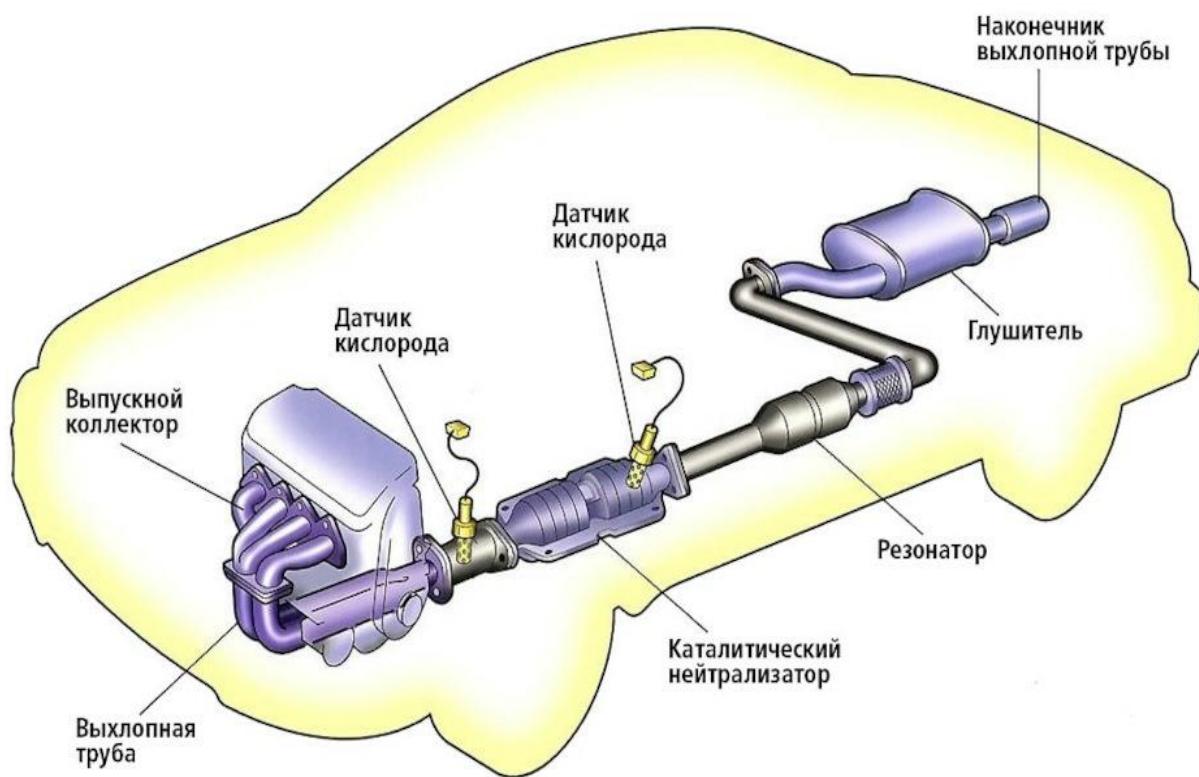


Рисунок 5 – Схема выпускной системы гражданского автомобиля

«Обычно, выпускной коллектор в двигателях внутреннего сгорания располагается на ГБЦ (головке блока цилиндров) силового агрегата.

По каналам выпускного коллектора отработавшие газы поступают в катализатор. Именно выпускной коллектор является одной из составляющих мощностной эффективности гоночного болида. Дело в том, что выпускной коллектор играет роль в эффективности сгорания топлива, а также его потребления.

На соревнованиях «Формула Студент» разрешено использовать только четырехтактные двигатели внутреннего сгорания с объемом до 710 кубических сантиметров. Известно, что в таких двигателях четыре рабочих такта, а именно такт впуска, когда за счет хода поршня создается отрицательное давление в камере сгорания, за счет чего через дроссельную заслонку и выпускной коллектор поступает воздух, а вместе с ним подается объем топлива для образования топливно-воздушной смеси» [2]. Далее идет такт сжатия, при котором поршень идет по направлению вверх, тем самым сжимая топливно-воздушную смесь в минимальный объем, после чего происходит воспламенение, за счет накаливания свечи зажигания двигателя, что можно видеть на рисунке 6.

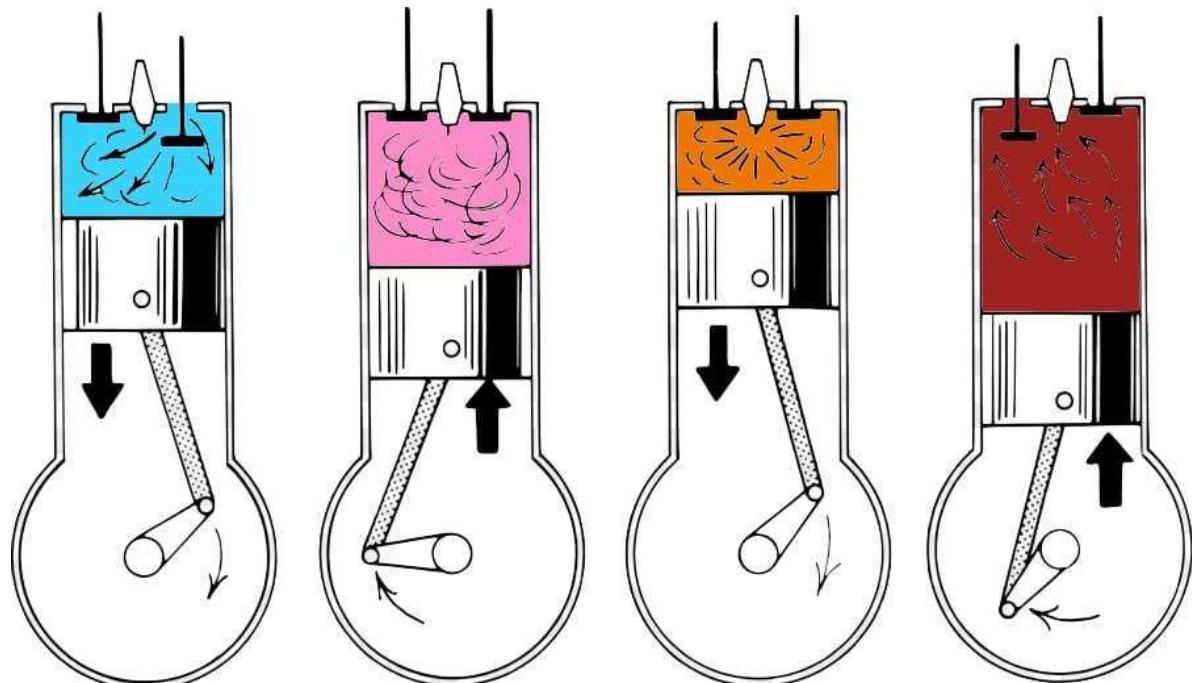


Рисунок 6 – Схема работы 4-тактного двигателя

«Следующим идет рабочий ход поршня, при котором поршень под действием взрывной силы от подожженной сжатой смеси с большой скоростью движется вниз, раскручивая коленчатый вал. Заключительным же тактом является такт выпуска, когда по инерции поршень движется обратно вверх под действием инерции и выталкивает отработавшие газы, которые образовались от поджога топливно-воздушной смеси. Именно в этот момент открываются выпускные клапаны и выпускают все отработавшие газы из камеры сгорания в выпускной коллектор» [17].

В момент, когда отработавшие газы, выталкиваемые поршнем из камеры сгорания поступают в выпускной коллектор, данный элемент выпускной системы может нагреваться до очень высоких температур, в районе 750 градусов, а также давление в этот момент может колебаться от 100 до 500 кПа.

Выпускной коллектор больше всего подвержен высоким температурам, так как находится ближе всего к камере сгорания, из-за чего постоянно работает в условиях термической усталости. Именно поэтому чаще всего выпускной коллектор изготавливают из термостойкого материала. Более того, чаще всего применяют нержавеющую сталь или сталь с антикоррозионным термостойким покрытием, потому что помимо температурного влияния, выпускной коллектор также подвергается влиянию внешних факторов, таких как окисление на воздухе, абразив с дорожного покрытия, реагенты для растапливания льда на дорогах общего пользования. Более того, термостойким и антикоррозионными свойствами должны обладать не только выпускные коллекторы, но и другие элементы выпускной системы. Все это необходимо, чтобы элементы выпускной системы не выходили из строя. Частыми проблемами выпускных систем являются трещины, сквозная коррозия и т. д. Наиболее опасно иметь трещину, сквозную коррозию или же прогоревшую прокладку между головкой блока цилиндров и выпускным коллектором. Дело в том, что выхлопные газы являются очень вредными для человека, и если газы будут выходить через трещину или же прогоревшую прокладку, то отработавшие газы могут попасть в салон автомобиля и навредить человеку.

Инженеры стараются разработать элементы выпускной системы таким образом, чтобы во время такта выпуска из камеры сгорания было выпущено как можно больше отработавших газов, чтобы следующий заряд топливно-воздушной смеси был чистым и хорошо воспламенялся. Некоторые элементы выпускной системы, конечно же, препятствуют полному выпуску всех отработавших газов, например резонатор и катализатор, однако избавиться от них как минимум серийному автомобилю нельзя, из-за установленных правил экологичности и шума. Позволить себе отказаться от лишних элементов выпускной системы могут гоночные автомобили, таким образом на спортивных автомобилях добиваются эффективности выпускной системы в целом, и соответственно за счет этого повышается мощность болидов.

«Наиболее распространенными в автомобильных двигателях выхлопными системами являются импульсные.

«Отвод отработавших газов из цилиндра двигателя происходит на такте выпуска, при движении поршня от верхней мертвой точки к нижней, с открытием выпускного клапана. Этот процесс происходит благодаря разности давлений газа в цилиндре и выпускном коллекторе, при этом создается волна давления, распространяющаяся со скоростью звука. Волна, отражаясь от стенок выпускного коллектора, может препятствовать истечению газов из цилиндров, повысив сопротивление. Дальнейшая очистка цилиндра от остаточных газов проходит за счет выталкивающего движения поршня от нижней мертвой точки к верхней мертвой точке. Неудовлетворительная очистка цилиндров от отработавших газов отрицательно скажется на последующем наполнении свежим зарядом, следовательно, на мощности, экономичности и экологических показателях двигателя» [19].

«Для улучшения очистки цилиндра от остаточных газов выпускная система настраивается так, что к концу процесса выпуска (в период перекрытия клапанов) за выпускным клапаном образовалось разряжение. Таким образом, улучшаются продувка цилиндра и наполнение его свежим зарядом. Данный эффект называется резонансной продувкой цилиндра.

Обеспечение такого эффекта является одной из основных задач проектирования выпускного коллектора. Для того, чтобы получить эту зависимость, параметрическое исследование выполнялось для V20 двигателя. Результаты показывают, что эффективность работы двигателя возрастает с удлинением выпускных труб. Удлинение выпускных труб в результате приводит к увеличению во времени волны, идущую между цилиндрами, и, таким образом, взаимодействие между цилиндрами уменьшается. Это означает, увеличение среднего эффективного давления, а также эффективности двигателя» [5]. Однаковая длина первичных выпускных труб придает данному эффекту большую регулярность. В таком случае газообмен в цилиндре осуществляется не только за счет хода поршня. «Методом подбора длины и площади сечения выпускных труб осуществляется настройка выпускной системы. Изначально указанные параметры могут быть определены расчетным методом, однако необходимо уточнение результатов по данным испытаний» [6].

Чаще всего импульсные системы для двигателей внутреннего сгорания делают следующим образом:

- две трубы соединяются в один патрубок, и еще две трубы соединяются в один патрубок, далее две вторичных трубы объединяются в одну выпускную трубу, получается схема 4–2–1;
- Все четыре первичных трубы объединяются в один трубопровод по схеме 4–1.

На рисунках 7 и 8 можно увидеть выпускные системы, разработанные по схемам 4–2–1 и 4–1 соответственно.

Очень важно правильно подобрать длину элементов трубопровода выпускной системы, что позволит увеличить или уменьшить коэффициент наполнения цилиндров на различных диапазонах частот вращения коленчатого вала. Длина первичных трубопроводов сильнее всего влияет на эффективность очистки камеры сгорания.

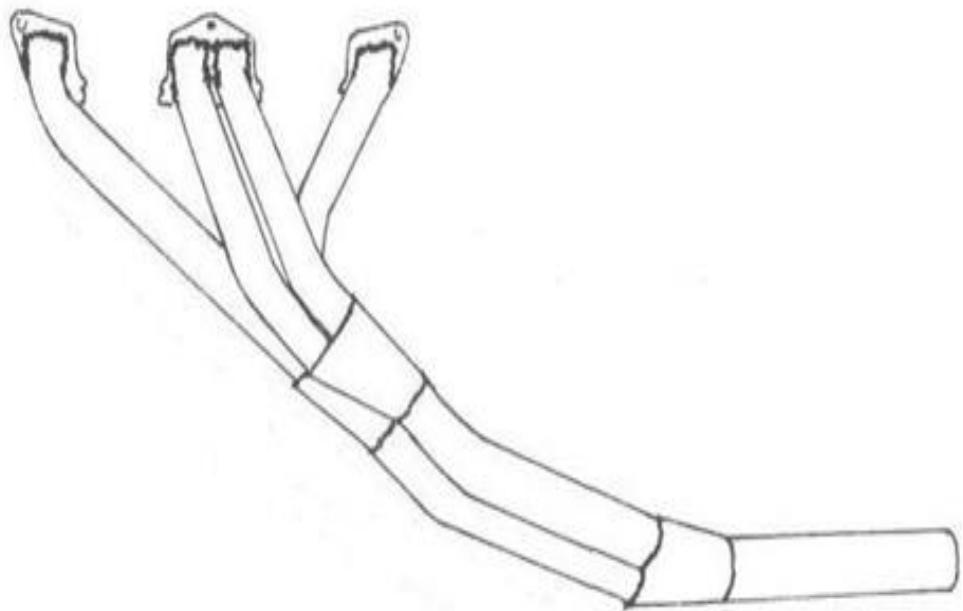


Рисунок 7 – Импульсная выхлопная система 4–2–1

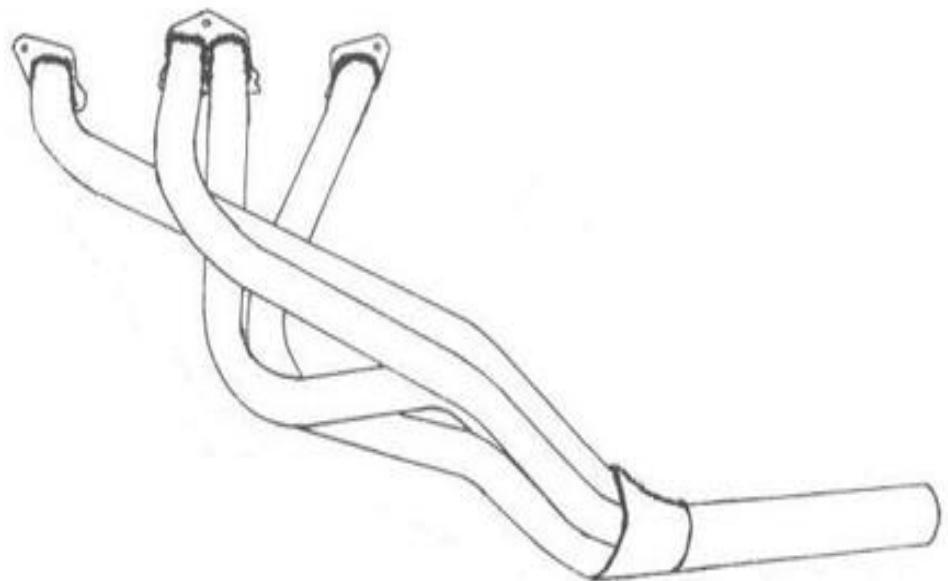


Рисунок 8 – Импульсная выхлопная система 4–1

Существуют также эжекционные выпускные системы. Принцип эжекционных выпускных систем заключается в том, что одна из двух сред находится в постоянном давлении и тем самым двигает вторую среду в необходимое направление.

«В эжекционных выпускных системах поток отработавших газов по впускному патрубку поступает в коллектор. Проходя по коллектору, поток газов вызывает эжекцию в выпускных патрубках. В свою очередь, газовые потоки в выпускных патрубках вызывают эжекцию в выпускном коллекторе» [14].

Схема исполнения эжекционной однотрубной выпускной системы показана на рисунке 9.

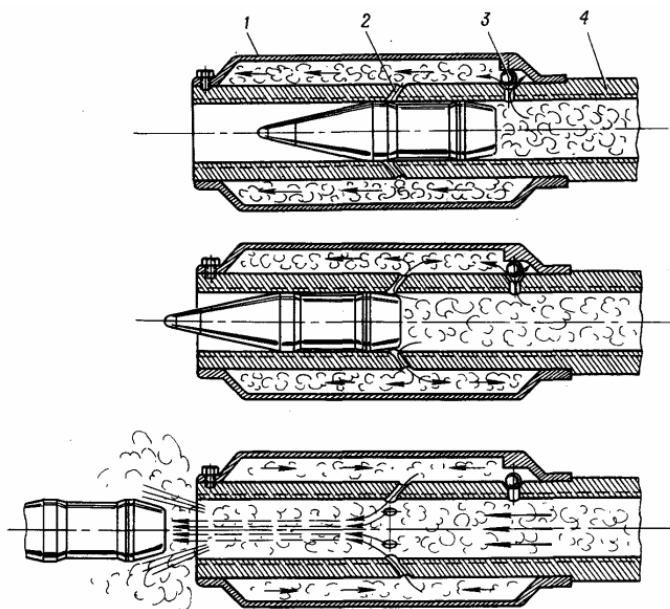


Рисунок 9 – Эжекционная однотрубная выпускная система

### Выводы по разделу

В данном разделе были описаны соревнования «Формула Студент», а также назначение общего регламента соревнований. Выделены основные требования к выпускным системам гоночного болида. Рассмотрены теоретические аспекты проектирования выпускных систем.

## **2 Сравнительный анализ существующих конструкций выпускной системы, используемых на гоночных автомобилях «Формула Студент»**

Соревнования «Формула Студент» существуют уже более 30 лет, и за эти годы было построено огромное количество гоночных болидов класса «Формула Студент» студентами высших учебных заведений со всего мира. Конструкции автомобилей со временем становились все более технологичными, эффективными и сложными. Кроме того, развивался и обновлялся регламент соревнований «Формула Студент», за счет чего появлялось все больше требований ко всем системам гоночного болида, в том числе и к выпускной системе.

Для того, чтобы спроектировать хорошую систему выпуска для гоночного болида класса «Формула Студент», необходимо не только изучить теорию о двигателях внутреннего сгорания и теорию о выпускной системе, также очень важно проанализировать существующие конструкции и посмотреть на них в действии [24]. Правильно будет провести исследовательскую работу, в ходе которой будут проанализированы несколько различных выпускных систем гоночных болидов, что позволит рассмотреть проблемные моменты конструкций зарубежных команд, положительные моменты зарубежных команд, а также научиться на их ошибках, и больше не допускать подобных [9].

В рамках данного сравнительного анализа будут рассмотрены пять гоночных болидов класса «Формула Студент», спроектированные и построенные зарубежными студенческими командами, которые завершили этап соревнований «Формула Студент». Анализировать различные конструкции выпускной системы гоночных автомобилей можно будет по таким критериям как:

- соответствие регламенту соревнований;
- схема выпускной системы;
- эффективность.

На рисунке 10 можно увидеть первый гоночный болид от американской команды «Формула Студент»

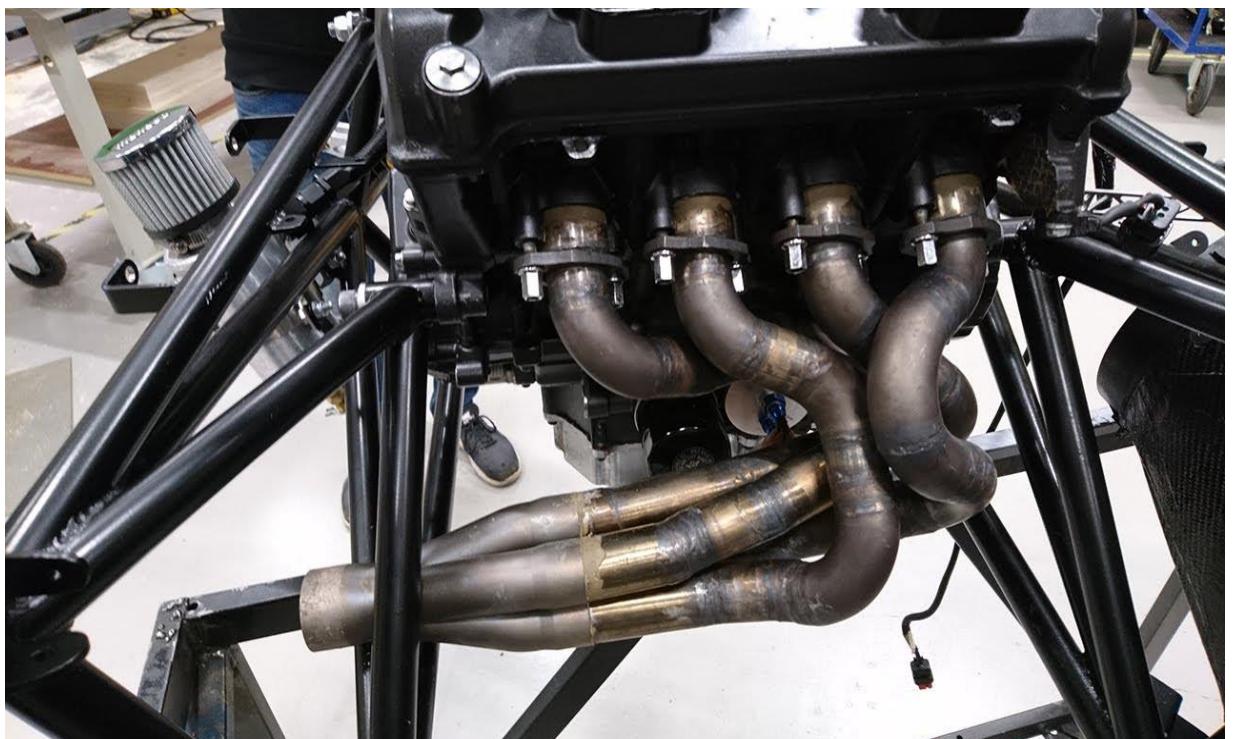


Рисунок 10 – Выпускная система 4–1 американской команды «Формула Студент»

Можно увидеть, команда использует 4-цилиндровый двигатель внутреннего сгорания, и что для своего гоночного болида команда выбрала схему импульсной выпускной системы 4–1, а также установили достаточно длинные первичные трубопроводы. Данное решение может эффективно сказаться на очищении камеры сгорания от отработавших газов, для получения свежего заряда на такте впуска. Более того, можно увидеть, что команда решила отказаться от глушителя и других элементов выпускной системы совсем, что в теории должно привести к увеличению мощности автомобиля [1]. Минусами данной конструкции является то, что без глушителя, существует большая вероятность, что автомобиль не сможет пройти проверку на шум во время технической инспекции, за счет чего

команда будет дисквалифицирована. Так же хотелось бы отметить, что выхлопная труба направлена на автомобильное колесо, что негативно может сказаться на управляемости гоночного автомобиля, за счет разницы температур правой и левой шины.

Далее, на рисунке 11 рассмотрим конструкцию выпускной системы одной из австралийских команд «Формула Студент»



Рисунок 11 – Гоночный болид австралийской команды «Формула Студент»

На рисунке можно увидеть, что данная команда также использует 4-цилиндровый двигатель внутреннего сгорания в связке с выпускной системой 4-1. В данном случае можно увидеть два основных отличия, это более длинные первичные трубопроводы, что приводит к большей эффективности мотора на низких оборотах, но к снижению эффективности на высоких оборотах. Также можно увидеть, что данная команда в отличие от

предыдущей, используют глушитель для снижения шума и успешного прохождения технической инспекции [3]. Также хочется отметить, что выпускная система данной команды выступает за пределы пространственной рамной конструкции, из-за чего человек легко может контактировать с раскаленными элементами выпускной системы данного гоночного болида класса «Формула Студент», а это запрещено регламентом соревнований, и за такую ошибку, команда тоже может быть не допущена до динамических дисциплин.

Далее рассмотрим одну из немецких команд «Формула Студент», гоночный болид которой изображен на рисунке 12.



Рисунок 12 – Гоночный болид немецкой команды класса «Формула Студент»

На рисунке 12 можно увидеть, что команда также использует 4-цилиндровый двигатель внутреннего сгорания в сочетании со схемой 4-1, что как мы уже заметили очень распространено для данного класса гоночных болидов. Из того, что можно заметить на рисунке, это достаточно длинный вторичный трубопровод, ведущий к глушителю выпускной системы, в свою очередь это говорит о том, что команда сделала больший акцент на получение эффективности двигателя на высоких оборотах. Также можно увидеть, что элемент глушителя на данном гоночном болиде имеет достаточно

внушительные размеры, что говорит скорее всего о том, что у данного двигателя были проблемы с шумом, и чтобы его нивелировать, команде пришлось прибегнуть к такому решению. Один из недостатков данной конструкции заключается в том, что раскаленные части выхлопной системы также находятся в доступной для человека зоне, из-за чего любой человек находящийся рядом с данным гоночным болидом может получить серьезный ожог, это запрещено регламентом соревнований, и скорее всего данная команда должна быть не допущена до прохождения динамических дисциплин.

Далее рассмотрим еще один гоночный болид одной из венгерских команд класса «Формула Студент», увидеть его можно на рисунке 13.

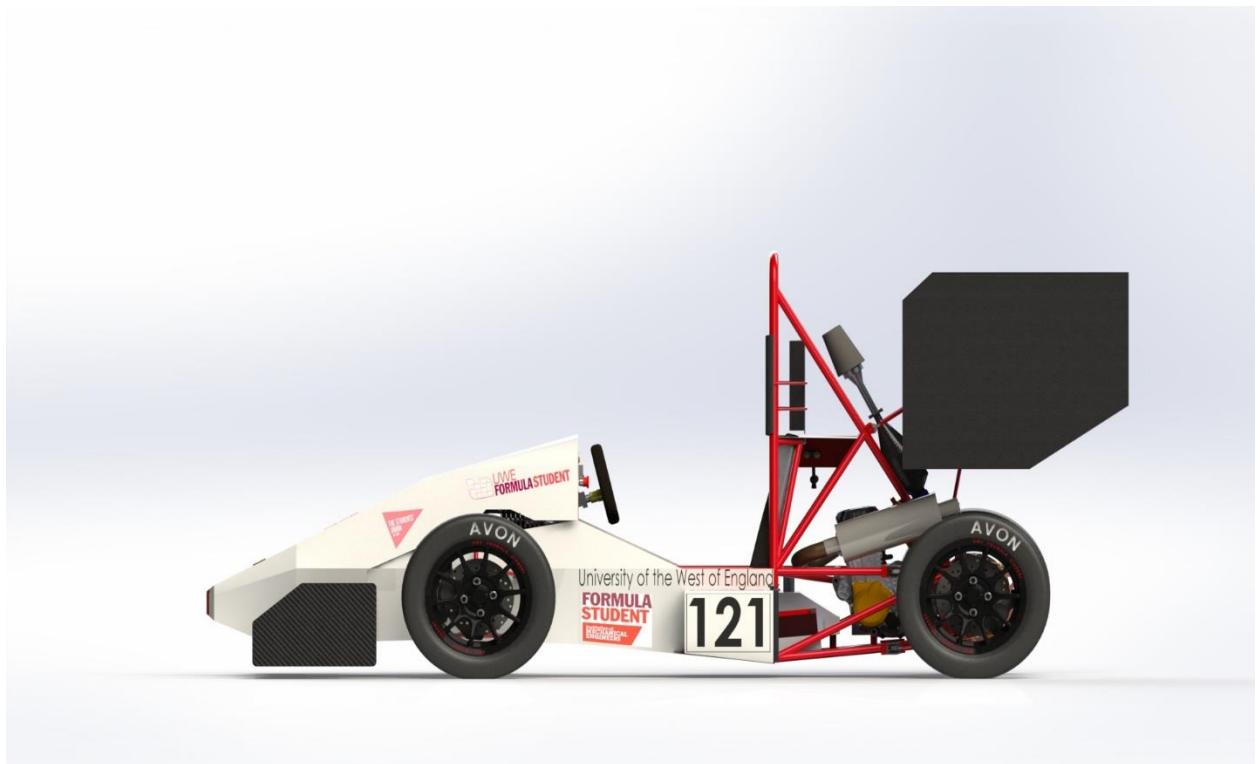


Рисунок 13 – Гоночный болид венгерской команды класса «Формула Студент»

На рисунке 13 можно увидеть, что команда на своем гоночном болиде класса «Формула Студент» использует 1-цилиндровый двигатель внутреннего сгорания, соответственно схема здесь 1–1 [23]. Сразу хочется подметить, что

1-цилиндровые моторы обычно достаточно оборотистые, и очень часто работают в условиях высоких оборотов, поэтому уменьшив длину первичной трубы приходящей до глушителя выпускной системы скорее всего было правильным решением, так как это увеличивает мощность двигателя. Однако замечанием к данной конструкции будет также про раскаленные части выхлопной системы, которые также находятся в доступной для человека зоне, из-за чего любой человек находящийся рядом с данным гоночным болидом может получить серьезный ожег.

Далее рассмотрим гоночный болид класса «Формула Студент» одной из перспективных австрийских команд на рисунке 14.

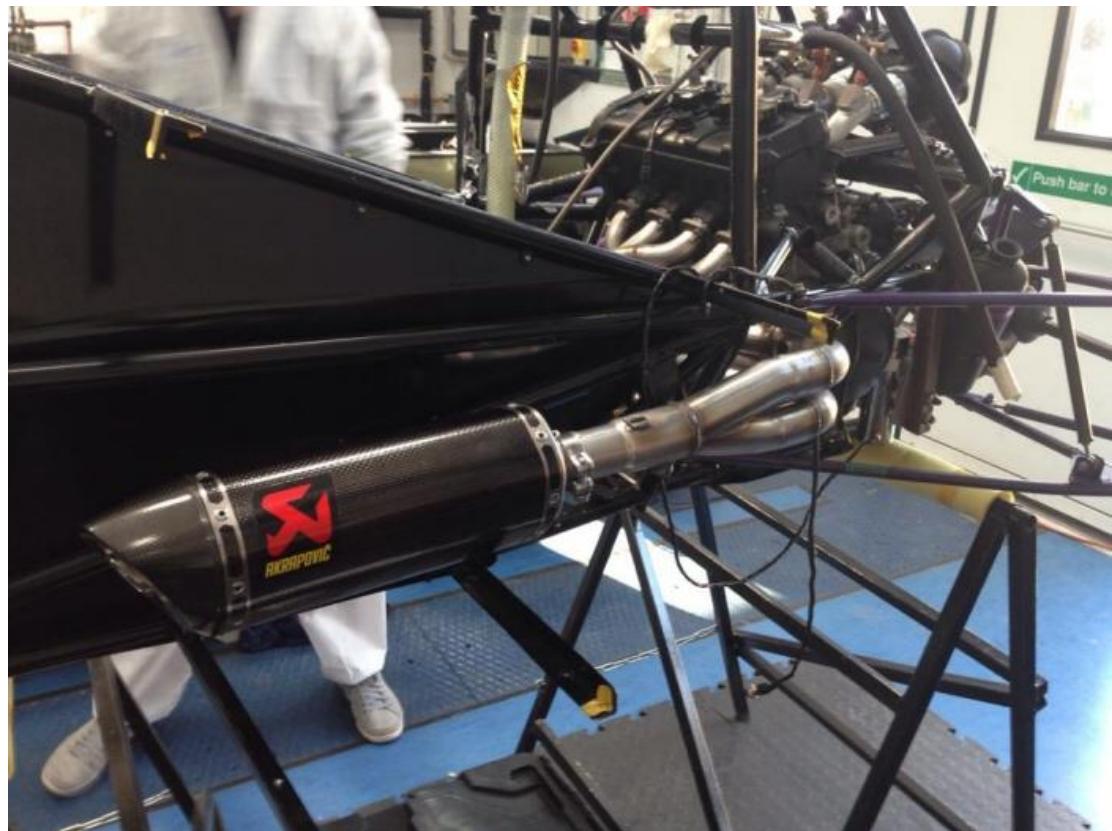


Рисунок 14 – Гоночный болид австрийской команды класса «Формула Студент»

На рисунке 14 можно увидеть, что команда на своем гоночном болиде класса «Формула Студент» использует 4-цилиндровый двигатель внутреннего

сгорания. Здесь можно увидеть применение нетипичной для данного класса схемы 4–2–1. Судя по общей компоновке, данная схема (4–2–1) была применена по конструктивным соображениям. Можно увидеть, что данная команда сократила длину первичных трубопроводов выхлопной системы и сделала акцент на низкие обороты для своего двигателя. В данной схеме четыре трубы соединяются в два последующих трубопровода, а далее соединяются еще раз в единую трубу перед глушителем выпускной системы. Из положительных моментов хочется отметить, что глушитель выпускной системы частично изготовлен из карбонового волокна, за счет чего снижается общая масса выпускной системы, а также возможность прогореть и получить трещину из-за термического воздействия или агрессивного воздействия окружающей среды гораздо меньше [25]. Кроме того, хотелось бы отметить, что все раскаленные элементы выпускной системы защищены и спрятаны от человека, так как все будет скрыто за счет боковых аэродинамических обвесов данной команды. Однако есть одно замечание в данной компоновке. Можно увидеть, что при выходе из пространственной рамной конструкции для того, чтобы перейти в глушитель, команде пришлось загнуть трубные элементы практически под 90 градусов, что может привести к частичному возврату выхлопных газов и созданию резонансных колебаний, а соответственно это приведет к увеличению шума и вибраций.

### Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены и проанализированы различные конструкции выпускной системы гоночных болидов класса «Формула Студент», создаваемых зарубежными студенческими командами. Определены положительные и отрицательные стороны, применяемых командами конструкций выпускных систем.

### **3 Разработка выпускной системы гоночного болида класса «Формула Студент»**

Для того, чтобы начать проектирование какого-либо узла или элемента необходимо для начала определиться с концепцией, с сопутствующими элементами, с назначением, а также с требованиями, которые будут предъявляться к конечному изделию.

Итак, в нашем случае необходимо разработать впускную систему для гоночного болида класса «Формула Студент». Разработанная система впуска обязательно должна соответствовать основному регламенту соревнований «Формула Студент» для того, чтобы команда могла успешно пройти техническую инспекцию и быть допущенной до динамических дисциплин соревнований [18].

Помимо того, что выпускная система гоночного болида класса «Формула Студент» должна просто соответствовать основному регламенту соревнований, во время концептуальной разработки были представлены следующие требования к выпускной системе будущего болида:

- увеличение эффективности работы двигателя;
- шум около выходной трубы выпускной системы на холостом ходу не должен превышать 103 Дб, а на оборотах 110 Дб;
- общая масса выпускной системы гоночного болида не должна превышать 5.5 кг;
- необходимо уменьшить вибрации, для этого нужно исключить резкие завороты трубопровода;
- расположение любых раскаленных элементов выпускной системы должно быть вне зоны доступа человека, данное требование может быть также достигнуто за счет аэродинамических элементов обвеса гоночного болида «Формула Студент»;
- завершающий элемент выпускной системы не может быть направлен на шины автомобиля

– соединение выпускной системы с двигателем внутреннего сгорания должно быть герметичным, и не должно допускать утечки отработавших газов в зону размещения пилота

Также входными данными служит сам силовой агрегат, а именно 1-цилиндровый двигатель от мотоцикла KTM 450, обороты которого могут достигать 11500 оборотов в минуту. Соответственно длину первичного трубопровода необходимо делать более короткой для увеличения эффективности на высоких оборотах. Двигатель можно увидеть на рисунке 15.



Рисунок 15 – двигатель внутреннего сгорания от мотоцикла KTM 450 EXC-F

Помимо того, что необходимо знать какой будет использоваться двигатель внутреннего сгорания, также, прежде чем начинать разработку выпускной системы гоночного автомобиля, необходимо четко определить и зафиксировать положение силового агрегата в будущем гоночном автомобиле. Для этого необходимо иметь как минимум пространственную раму, которая изначально строится от точек подвески автомобиля, а также необходимо иметь расположение сиденья пилота и огнеупорной стенки для того, чтобы в дальнейшем двигатель точно не мог упираться в данные элементы. Более того, необходимо иметь точную модель силового агрегата, или как минимум правильно оцифрованную упрощенную габаритную модель необходимого двигателя [15]. Как можно увидеть на рисунке 16 изображена часть гоночного болида класса «Формула Студент», необходимая для начала проектирования выпускной системы.

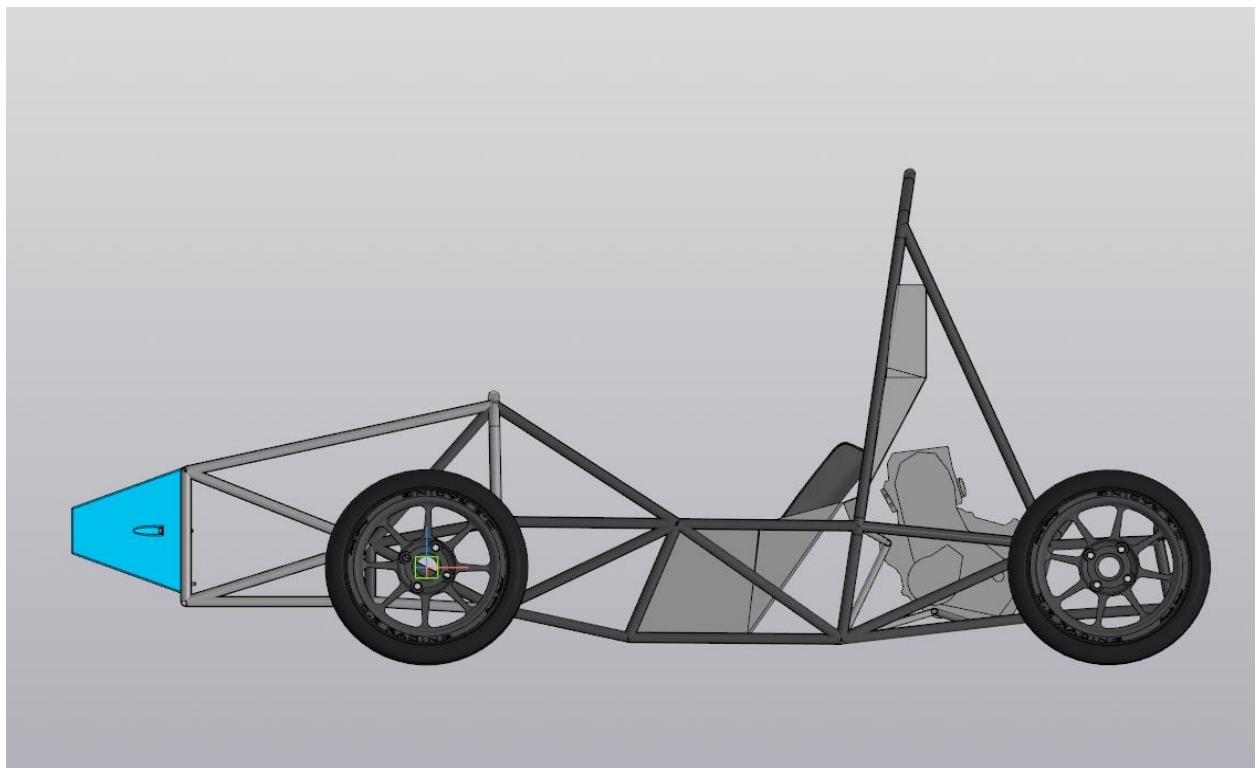


Рисунок 16 – Первый этап проектирования выпускной системы гоночного болида

После того, как силовой агрегат выставлен и зафиксирован в пространстве, необходимо проложить первичный трубопровод, и стоит начать с переходного фланца, который будет обеспечивать герметичное соединение выпускного коллектора и двигателя внутреннего сгорания. Переходной фланец был смоделирован с внутренним диаметром 40 мм, так как для ламинарного потока отработавших газов необходимо обеспечить максимально гладкий отток газов без каких-либо ям и других дефектов [10]. На рисунке 17 можно увидеть переходной фланец.

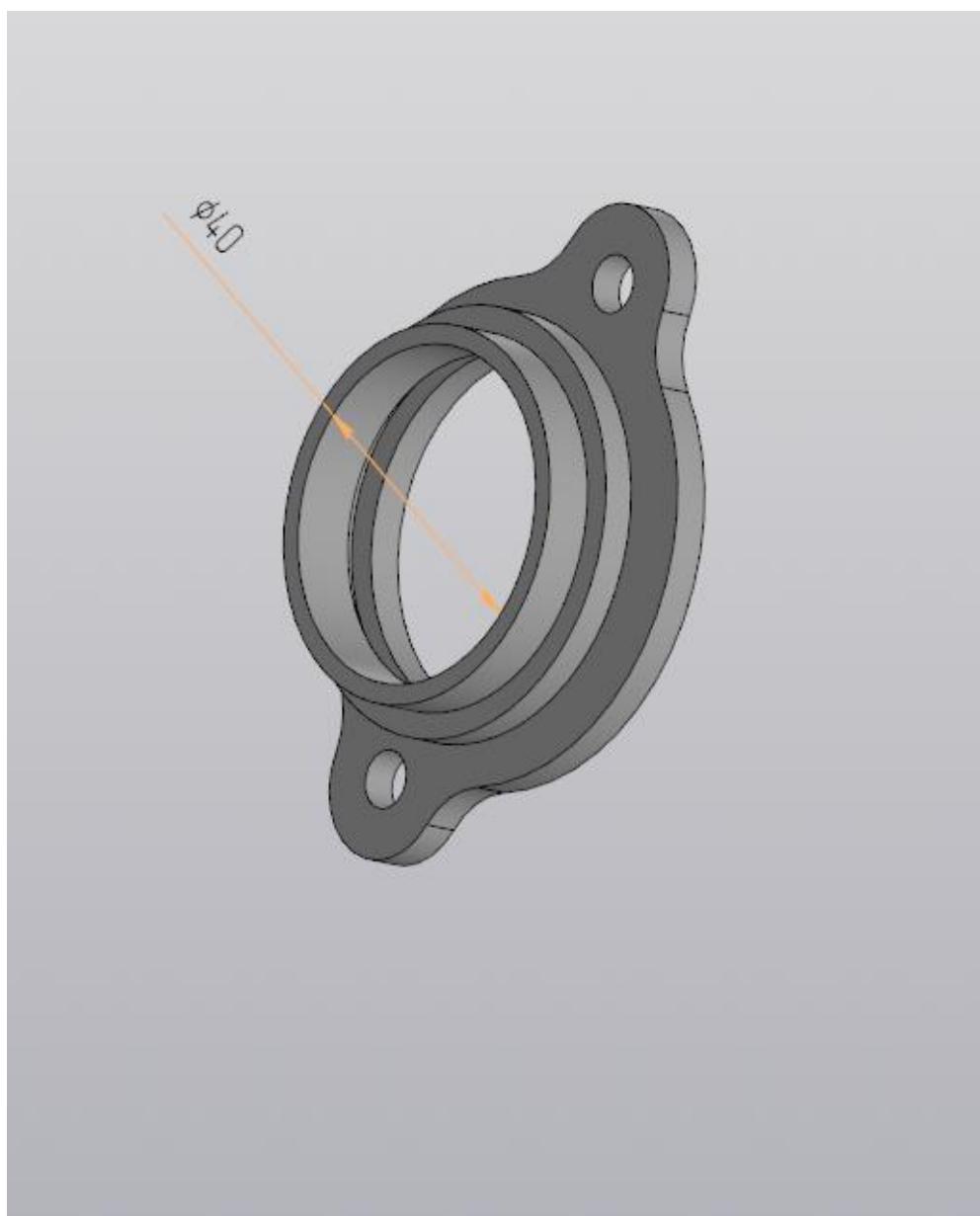


Рисунок 17 – Переходной фланец выпускной системы

После того, как был разработан переходной фланец, необходимо спроектировать непосредственно выпускной коллектор. Как мы помним, из наших требований, трубопровод первого порядка должен иметь настолько короткий, насколько это возможно участок отвода отработавших газов. С учетом требований регламента удалось достичь прямой длины первичной трубы в 262 мм, это можно увидеть на рисунке 18.

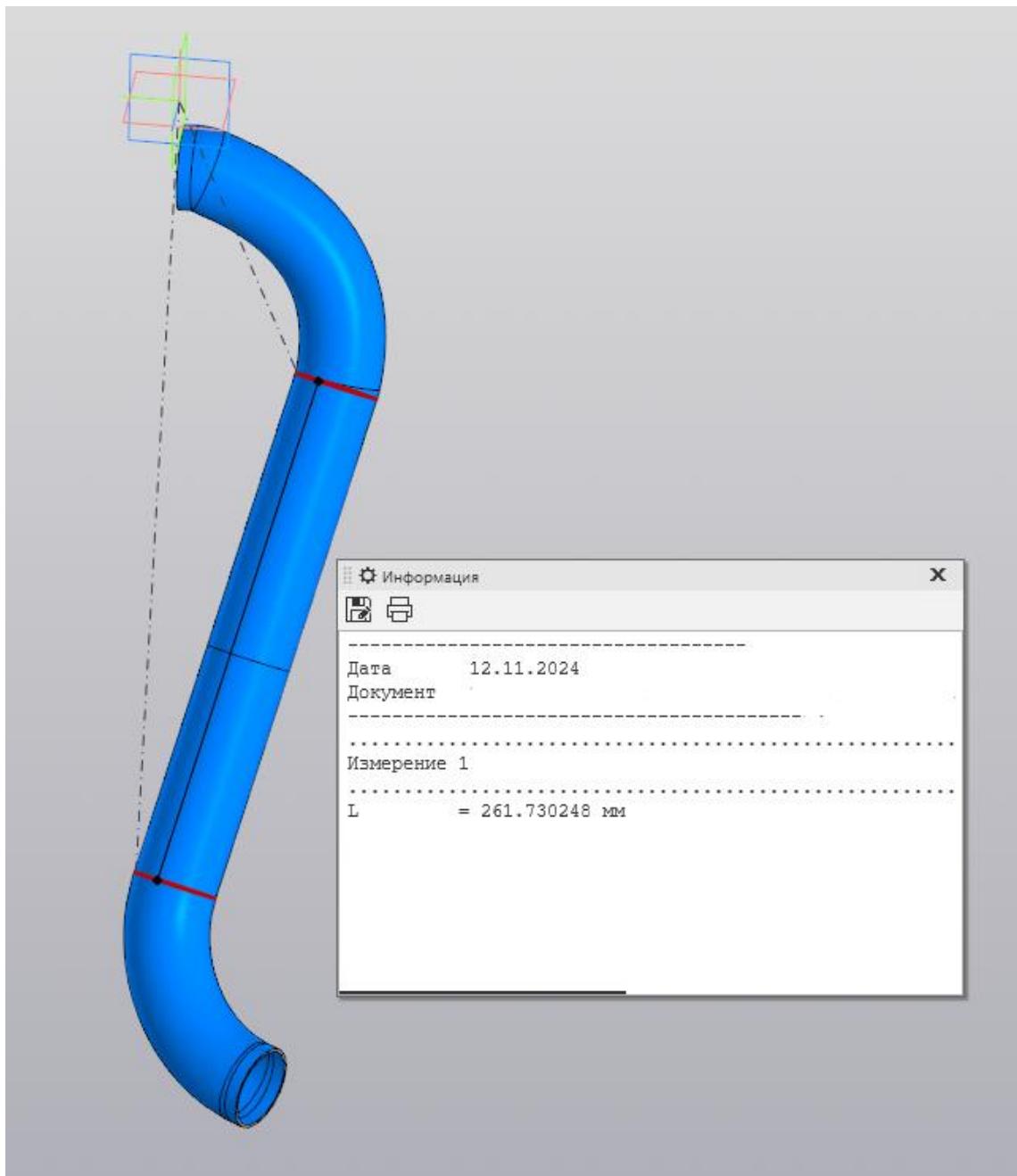


Рисунок 18 – Выпускной коллектор гоночного болида

Можно также увидеть, что все резкие повороты были нивелированы большим радиусом загиба трубы, что в теории должно давать улучшение отхода отработавших газов.

Труба для первичного трубопровода использовалась диаметром 40 мм для обеспечения ламинарности потока отработавших газов во время такта выпуска [12]. Были также проведены симуляции выпускного коллектора на предмет ламинарности и плавности воздушных потоков, а также на предмет скорости протекания воздушных потоков. Результат одной из симуляций можно увидеть на рисунке 19.

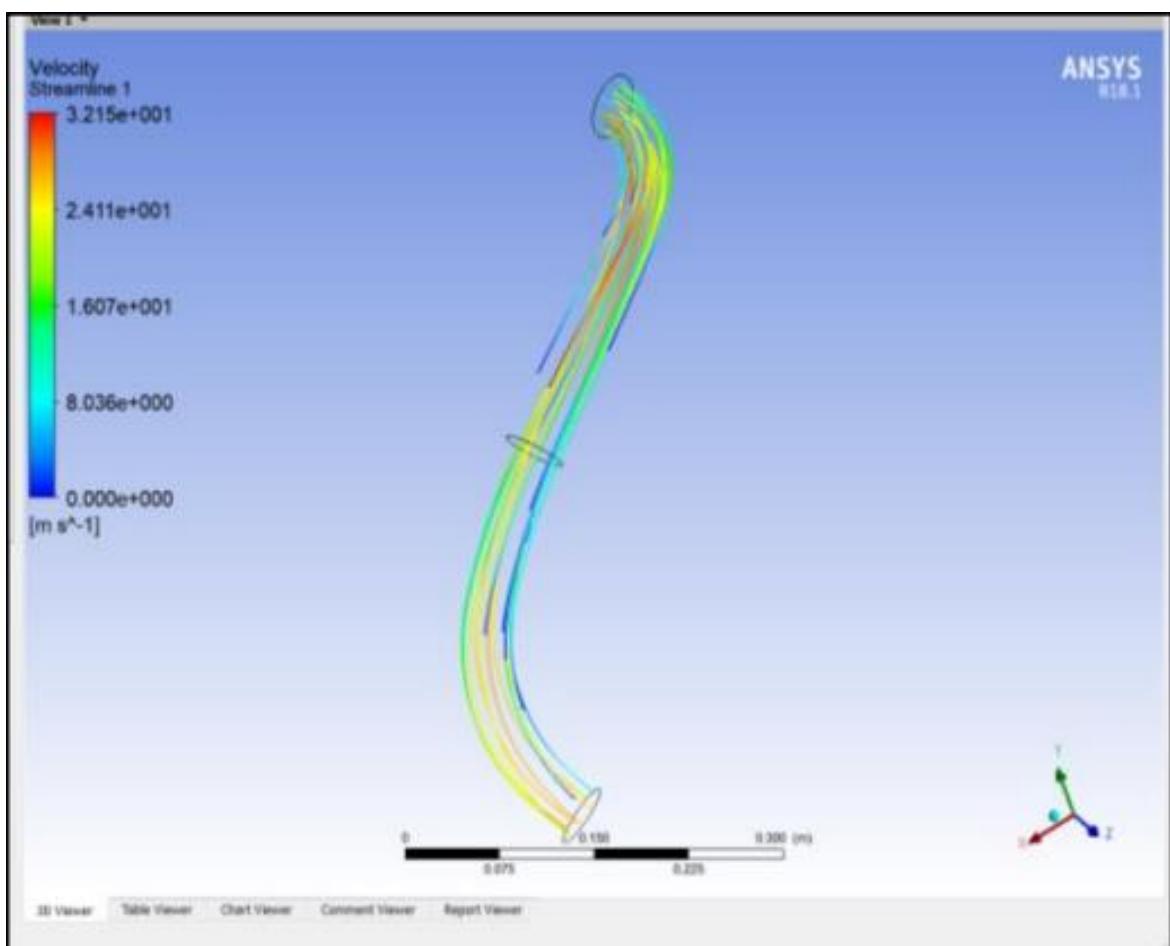


Рисунок 19 – Симуляция скорости потоков воздуха внутри первичного трубопровода выпускной системы

Что касается обеспечения низкого уровня шума выпускной системы гоночного болида класса «Формула Студент», то для этого был разработан глушитель, который можно увидеть на рисунке 20.

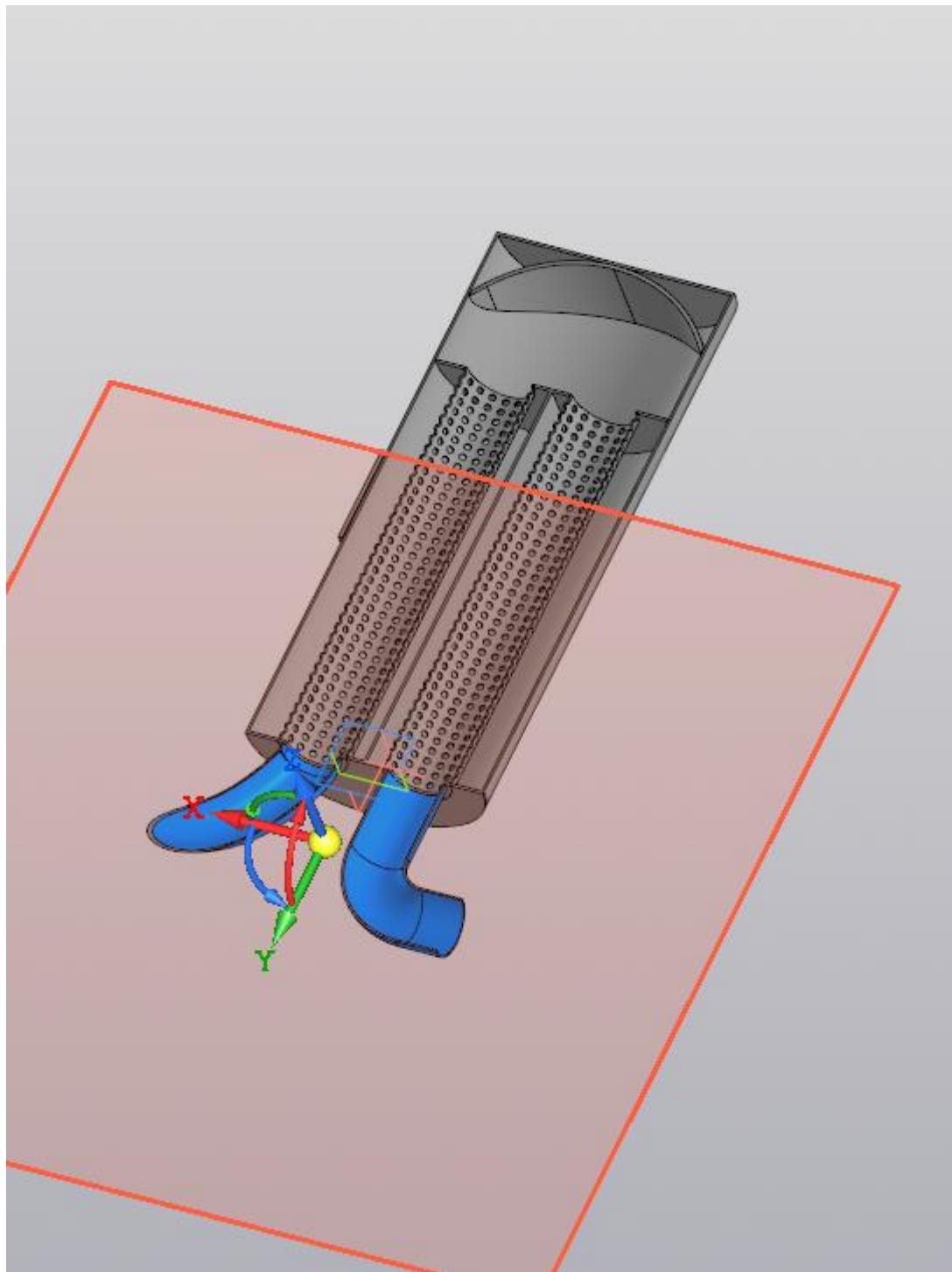


Рисунок 20 – Глушитель гоночного болида в разрезе

На рисунке 20 можно увидеть, что глушитель состоит из непосредственно корпуса, изготовленного из нержавеющей стали, двух перфорированных трубок с внутренним диаметром 40 мм, огражденных друг от друга перегородками, одна из которых продольная, а другая перпендикулярная, а также изогнутая стенка, которая имеет такую форму для предотвращения резонансных импульсов. Кроме того, в 3Д модель на рисунке 19 не вошли такие элементы, как стальная волокнистая вата, а также негорючая поглощающая стекловата [22].

Глушитель изготавливается таким образом, что вся сваренная конструкция самым последним делом вставляется в нержавеющий корпус и заваривается. Последовательность именно такая из-за того, что металлическую вату и стекловату необходимо обмотать несколькими слоями вокруг перфорированных труб таким образом, чтобы вся эта конструкция очень плотно входила в свой корпус. Таким образом можно обеспечить эффективное шумоподавление. Также очень важно обеспечить хороший сварочный шов по всем стыкам конструкции системы выпуска, в том числе и глушителя, потому что система выпуска подвергается сильным вибрациям и склонна к образованию трещин.

После того, как двигатель установлен в пространственную раму гоночного болида класса «Формула Студент», необходимо также присоединить выпускную систему к двигателю с целью установить в нужное положение и приварить фиксационные кронштейны, которые будут крепить выпускную систему за корпус глушителя с помощью фиксации к пространственной рамной конструкции.

Результат того, как была реализована выпускная система гоночного болида класса «Формула Студент» можно увидеть на рисунке 21 (вид слева), а также на рисунке 22 (вид справа).

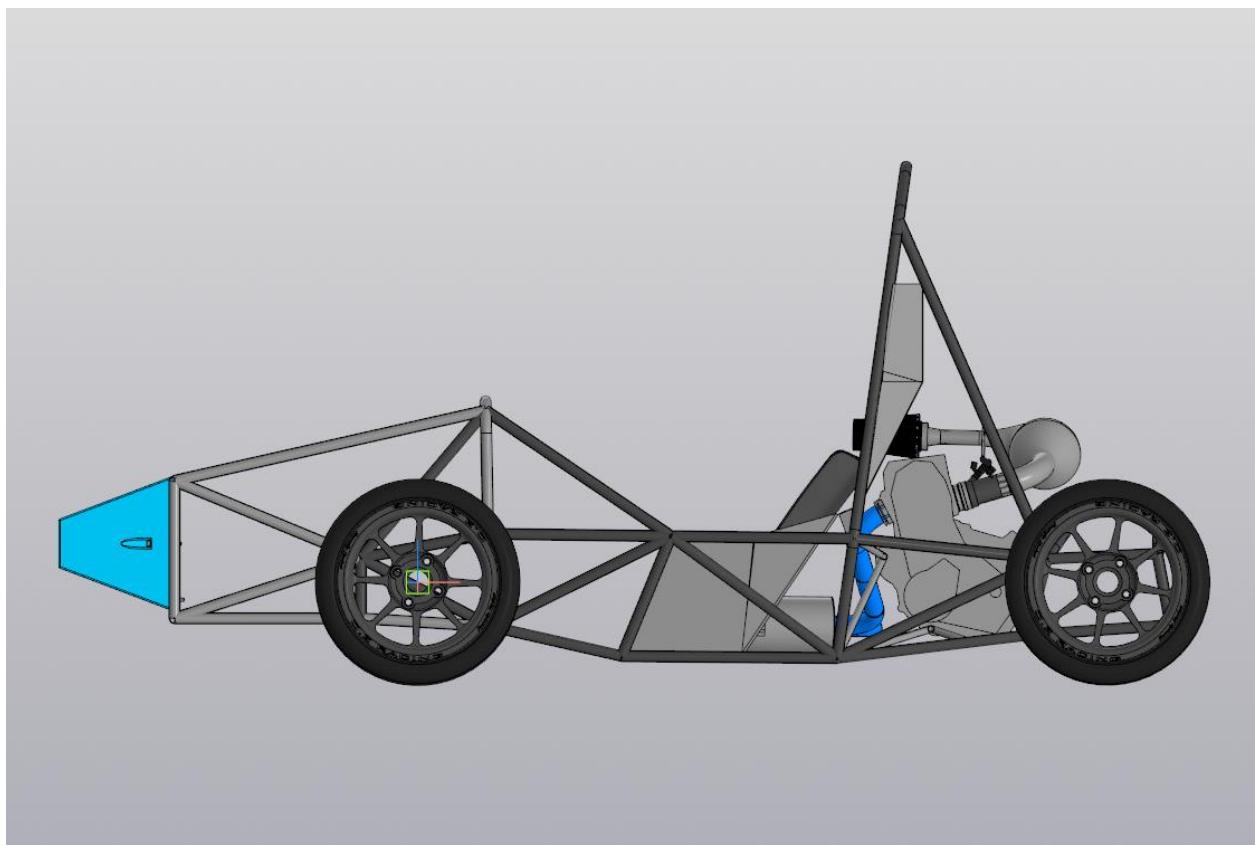


Рисунок 21 – Болид, оснащенный выпускной системой, вид слева

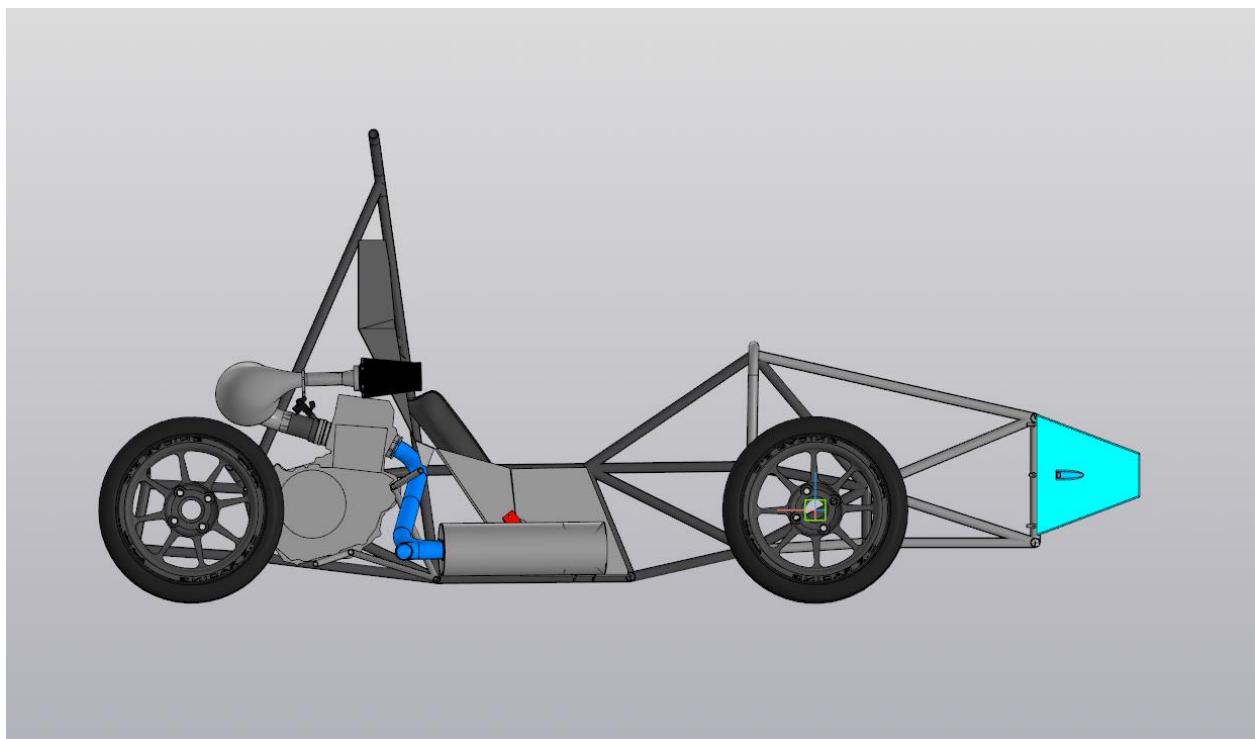


Рисунок 22 – Болид, оснащенный выпускной системой, вид справа

Для системы выпуска были проведены расчеты на этапе проектирования. Так, например была рассчитана длина первичной трубы выпускного коллектора по формуле 1.

$$L1 = A \times S \times D^2 / 140 \times d^2 \quad (1)$$

где  $L1$  – длина первичной трубы, мм;  
 $A$  – величина фазы выпуска, град;  
 $S$  – ход поршня, дюйм;  
 $D$  – диаметр цилиндра, дюйм;  
 $d$  – диаметр выпускного окна, дюйм.

Также по формуле 2 была рассчитана длина свободного выхлопа

$$L = 5100 \times \varphi / n \times 6 \quad (2)$$

где  $L$  – длина свободного выхлопа, мм;  
 $\varphi$  – опережение открытия выпускного клапана до нижней мёртвой точки, град;  
 $n$  – частота вращения, об/мин.

Диаметр первичной трубы выпускного коллектора не всегда подбирается в соответствии с выходным отверстием силового агрегата. Данная величина рассчитывается по формуле 3

$$D = \sqrt{2} \times V / L1 \times \pi \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр первичной трубы, мм;  
 $V$  – объем цилиндра, м<sup>3</sup>;  
 $L1$  – длина первичной трубы, мм.

В случае, если первичная труба перетекает во вторичный трубопровод, то в таком случае диаметр вторичного трубопровода выпускной системы рассчитывается по формуле 4

$$D = \sqrt{2} \times V_t / L_1 \times \pi \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр вторичной трубы, мм;

$V_t$  – объем трубопровода, м<sup>3</sup>;

$L_1$  – длина первичной трубы, мм.

Кроме того, необходимо знать температуру отработавших газов на выходе из камеры сгорания. Расчет можно провести по формуле 5

$$t = Q_p + i_{\text{воздуха}} + i_t - Q_{\text{дис}} / V_g \times c_g \quad (5)$$

где  $t$  – энталпия топлива, кДж/ед. топлива;

$Q_p$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$i_{\text{воздуха}}$  – теоретическое теплосодержание воздуха, кДж/м<sup>3</sup>;

$i_t$  – теоретическое теплосодержание дымовых газов, кДж/м<sup>3</sup>;

$Q_{\text{дис}}$  – теплота на диссоциацию продуктов сгорания, кДж/кг;

$V_g$  – объем дымовых газов, м<sup>3</sup>;

$c_g$  – объемная теплоемкость дымовых газов, кДж/м<sup>3</sup>.

## Выводы по разделу

В данном разделе представлены исходные данные для проектирования выпускной системы для гоночного болида класса «Формула Студент». Также в данном разделе были представлены основные принципы проектирования выпускной системы и показан принцип реализации выпускной системы на гоночном болиде.

## 4 Безопасность и экологичность технического объекта

«Изготовление выпускной системы для гоночного болида класса «Формула Студент» связано с опасностью для изготовителя, поэтому весь процесс должен быть заключен в регламенте по охране труда, которое обеспечивает безопасность рабочим при изготовлении деталей. Разработка документации ведется с упором на опыт иностранных предприятий в области машиностроения, а также на законы, действующие на территории Российской Федерации. На предприятиях прописаны все необходимые данные для поддержания безопасности, и каждый работник проходит инструктаж, регулярно проходит семинары по повышению квалификации, это способствует созданию безопасных условий труда на производстве.» [20].

Для производства выпускной системы автомобиля необходимы слесарные, сварочные и сборочные работы. ОВПФ слесарных работ указаны в таблице 1.

Таблица 1 – ОВПФ слесарных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
1	2	3	4
Слесарные работы	– резка металла, – сверление, – резьбонарезание	Углошлифовальная машина, струбцина, керн, шуруповерт, молоток, метчик и метчикодержатель	Физические: механизмы, изделия, вращающиеся части, острые кромки, повышенная запыленность и загазованность

Для данного рабочего действуют требования по технике безопасности:

- применять в процессе своей работы оборудование, инструменты и средства малой механизации по назначению, в соответствии с инструкциями завода – изготовителя,
- выполнять только порученную непосредственным руководителем работу и не передавать ее другим без разрешения непосредственного

руководителя,

- содержать рабочее место, в том числе и проходы к рабочим местам в чистоте и порядке, при обнаружении захламления рабочей зоны – необходимо обеспечить ее уборку
- систематическая проверка знаний по технике безопасности и охране труда,
- регулярная проверка здоровья и медицинские осмотры,
- соблюдения правил внутреннего распорядка предприятия,
- соблюдать пожарную безопасность и правила охраны труда на рабочем месте.

ОВПФ сварочных работ указаны в таблице 2.

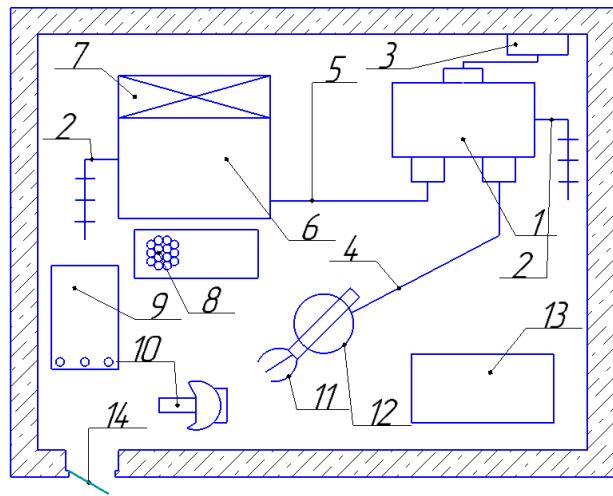
Таблица 2 – ОВПФ сварочных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
1	2	3	4
Сварочные работы	Сварка деталей	Сварочная оснастка, источник сварочноготока, пинцы, ручной инструмент.	Физические: механизмы, изделия, острые кромки, повышенная запыленность и загазованность, высокая температура, ультрафиолетовое и инфракрасное излучение, излишняя яркость сварочной дуги, опасность ожогов, возможность взрыва баллонов и систем, электромагнитные поля.
			Химические: –аргон, вольфрам, хлориды железа, натрия и калия.

Для данного рабочего действуют требования по технике безопасности:

- необходимо подготовиться и произвести уборку перед сварочными операциями,
- проверка работоспособности и настройка рабочего оборудования происходит перед началом работы,
- систематическая проверка знаний по технике безопасности и охране труда,

- регулярная проверка здоровья и медицинские осмотры,
- соблюдения правил внутреннего распорядка предприятия,
- соблюдать пожарную безопасность и правила охраны труда на рабочем месте.



1 – сварочный аппарат; 2 – заземление; 3 – силовой провод питания; 4 – шланг для подачи проволоки и газа; 5 – обратный токоподводящий провод; 6 – верстак; 7 – вентиляция; 8 – резиновая изоляция рабочего; 9 – проволока; 10 – щиток; 11 – пистолет для подачи проволоки и газа; 12 – стул; 13 – ящик для отходов; 14 – дверной проем.

Рисунок 23 –Рабочие место для проведения сварочных работ

«К основным задачам сварщика относятся:

- производить сварку конструкций из любых материалов, которые обладают необходимыми свойствами,
- выполнять прихватки деталей,
- ликвидировать дефекты по средствам зачистки,
- резать простые детали с помощью дуговой сварки;
- осуществлять контроль качества сварочного шва и его проникание в материал после сварки, специальными инструментами.» [7].

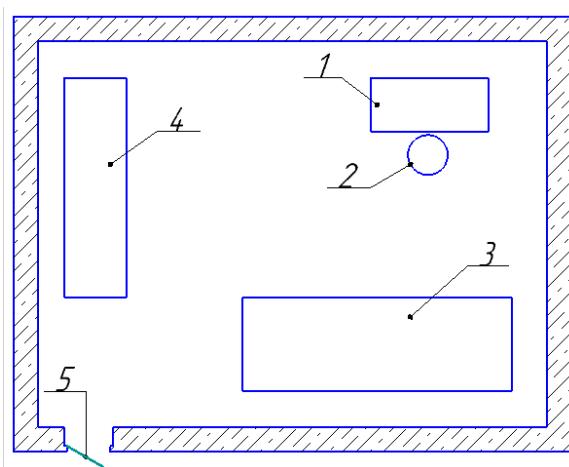
ОВПФ сборочных работ указаны в таблице 3.

Таблица 3 – ОВПФ сборочных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
Сборочные работы	Сборка узла с упором на чертежи и модели	– стол для работы, тиски, инструмент (зубило, молоток, напильник), инструменты для измерения (линейка, штангенциркуль), электроинструмент.	Физические: – части разрушающегося изделия, острые края; – повышенный уровень шума; – абразивная пыль, воздействие электрического тока

Для данного рабочего действуют требования по технике безопасности:

- ознакомление с инструктажами по технике безопасности,
- промышленная санитария (чистота рабочего места),
- дисциплина на рабочем месте,
- использование оборудования по назначению.
- при обнаружении поломки – сообщать спецгруппе по ремонту оборудования



1 – рабочее место; 2 – стул; 3 – верстак; 4 – инструментальный шкаф; 5 – дверной проем.

Рисунок 24 – Рабочее место для сборочных работ

К основным задачам сборщика относятся:

- сборка деталей или узлов конструкции в кондукторе по чертежу либомодели,
- проверка точности установки деталей с опорой на чертежи при помощи измерительных инструментов,
- указание примечаний для дальнейшей работы с данной деталью.

Выводы по разделу

Реализация на практике всего комплекса мероприятий и мер, разработанных для данных ОВПФ, позволит практически полностью обезопасить работников во время выполнения технологического процесса.

## **Заключение**

В выпускной квалификационной работе рассмотрено назначение выпускной системы двигателя внутреннего сгорания и их типы. Целью работы являлось проектирование и расчет системы выпуска для гоночного болида класса «Формула Студент», подходящей для двигателя КТМ 450 и удовлетворяющей требованиям регламента международных соревнований «Формула Студент».

В ходе выполнения работы описаны теоретические аспекты проектирования выпускной системы для автомобилей, оснащенных двигателем внутреннего сгорания.

Проведен анализ существующих конструкций выпускной системы, используемых зарубежными командами для гоночных болидов класса «Формула Студент».

Подготовлена 3D-модель выпускного коллектора для болида «Формула Студент». Проведено моделирование потоков выхлопных газов в выпускном коллекторе. Результаты показали отсутствие завихрений внутри разработанной конструкции.

Спроектированная выпускная система, установленная на двигатель от мотоцикла КТМ 450 и протестирована в ходе стендовых испытаний. Во время эксперимента на двигателе была установлена система впуска с реостриктором. Результаты эксперимента показывают, что двигатель развивает максимальную мощность (55 л.с) при частоте вращения коленчатого вала 10000 мин<sup>-1</sup>, максимальный крутящий момент (52 Нм) достигается при частоте вращения 9200 мин<sup>-1</sup>.

## **Список используемой литературы и используемых источников**

1. Регламент международных соревнований 2022 Formula SAE® Rules
2. Exhaust Systems — Выхлопные системы [электронный ресурс]: URL: [http://ideal-plm.ru/flowmaster/exhaust\\_systems.html/](http://ideal-plm.ru/flowmaster/exhaust_systems.html/) (дата обращения 01.10.2024)
3. Автомобильные выхлопные системы [электронный ресурс]: URL: [http://www.poiskavtouslug.ru/tehnicheskoe-obsluzhivanie/avtomobilnye\\_vyhlopnye-sistemy.html](http://www.poiskavtouslug.ru/tehnicheskoe-obsluzhivanie/avtomobilnye_vyhlopnye-sistemy.html) (дата обращения 07.10.2024)
4. Модернизация системы выпуска отработавших газов [электронный ресурс]: URL: <http://pajero.us/repair/107.shtml> (дата обращения 08.09.2024)
5. Доводка выхлопной системы атмосферных ДВС [электронный ресурс]: URL: [https://azlk-team.ru/articles/stati\\_s\\_clubazlknet/dovodka\\_vykhlopnojj\\_sistemy\\_atmosfernykh\\_dvs/](https://azlk-team.ru/articles/stati_s_clubazlknet/dovodka_vykhlopnojj_sistemy_atmosfernykh_dvs/) (дата обращения 08.08.2024)
6. Выхлопная система [электронный ресурс]: URL: <http://www.avtika.ru/qa/393-vykhlopnaja-sistema> (дата обращения 08.05.2024)
7. Вырубов, Д. Н. Двигатели внутреннего сгорания: теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст]: учеб. для втузов по спец. "Двигатели внутр. сгорания / Д. Н. Вырубов [и др.] ; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 1983. - 375 с.
8. Graham Bell A. Perfomance Tuning in Theory and Practice Four Strokes [Текст] / A. Graham Bell. Haynes Publishing Group, 1981. -252 p.
9. DALHOUSIE FORMULA SAE [электронный ресурс]: URL: <https://blogs.dal.ca/formulaSAE/2012/03/27/few-powertrain-updates/> (дата обращения 07.09.2024)

10. MUR Motorsports Newsletter (Sep 14) [электронный ресурс]: URL: <http://formulasae.eng.unimelb.edu.au/content/mur-motorsports-newsletter-sep-14> (дата обращения 07.10.2024)
11. Formula Student [электронный ресурс]: URL: <https://fsoulu.wordpress.com/> (дата обращения 07.07.2024)
12. TEAM HARE - UNIVERSITY OF HUDDERSFIELD'S FORMULA STUDENT CAR [электронный ресурс]: URL: <http://www.pistonheads.com/gassing/topic.asp?h=0&f=47&t=995969&i=20> (дата обращения 07.07.2024)
13. Ceramic coating of exhaust systems in motor racing [электронный ресурс]: URL: [http://metallspritztechnik.de/?loc=auspuff-keramik\\_beschichtung&u=22&lang=en](http://metallspritztechnik.de/?loc=auspuff-keramik_beschichtung&u=22&lang=en) (дата обращения 07.09.2024)
14. Выпуск [электронный <http://www.baumanracing.ru/?p=8447#more-8447> 07.08.2024)
15. Колчин, А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]: учеб. пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. - Изд. 3-е, перераб. и доп.; Гриф МО. - Москва: Высш. шк., 2003. - 496 с.
16. 2003 Honda CBR600RR First Ride [электронный ресурс]: URL: <http://www.motorcycle-usa.com/2003/02/article/2003-honda-cbr600rr-first-ride/> (дата обращения 07.10.2024)
17. Вибе, И.И. Теория двигателей внутреннего сгорания [Текст]: Конспект лекции / И.И.Вибе - Челябинск: ЧПИ, 1974. – 252с.
18. Попык, К. Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей [Текст]: учебник / К. Г. Попык. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - Москва: Высш. шк., 1970. – 326с
19. HondaCBR600RR (2007) [электронный ресурс]: URL: <http://www.bikewalls.com/wallpaper/CBR600RR/31464631/1024x768.html> (дата обращения 07.05.2024)

20. 2003 CBR 600 RR -- Part One: On Paper [электронный ресурс]: URL <http://www.motorcycle.com/manufacturer/honda/2003-cbr-600-rr-part-one-on-paper-1227.html> (дата обращения 07.05.2016)
21. SolidWorks) [электронный ресурс]: URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> (дата обращения 07.05.2024)
22. Davies P. O. A. L. Piston engine intake and exhaust system design [электронный ресурс] / P. O. A. L. Davies // Journal of Sound and Vibration (1996) 190(4), 677–712. -URL: <https://sci-hub.io/http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X96900851>
23. Sulaiman S. A., Murad S. H. M., Ibrahim I. and Abdul Karim Z. A. Study of flow in air-intake system for a single-cylinder go-kart engine [электронный ресурс] / S. A. Sulaiman and the others // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME). -ISSN: 2180-1606 (Online). Volume 1. -pp. 91-104. [http://ijame.ump.edu.my/images/Volume\\_1/S.%20A.%20Sulaiman%20et%20al.pdf](http://ijame.ump.edu.my/images/Volume_1/S.%20A.%20Sulaiman%20et%20al.pdf)
24. Akshay Tajane, Mahesh Jadhav, Rumdeo Rathod, Vilas Elavande Design and testing of automobile exhaust system [электронный ресурс] / Akshay Tajane and the others // IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. -ISSN: 2319-1163. <http://esatjournals.net/ijret/2014v03/i11/IJRET20140311026.pdf>
25. Gopaal, MMM Kumara Varma, Dr L Suresh Kumar Exhaust Manifold Design – FEA Approach [электронный ресурс] / Gopaal // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 17. - № 10. 2014. -URL: <http://www.ijettjournal.org/volume-17/number-10/IJETT V17P295.pdf>