

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)

13.03.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Проектирование и эксплуатация автомобилей с гибридными силовыми установками

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Расчет и проектирование системы выпуска газов гоночно-спортивных автомобилей»

Обучающийся

К. А. Папонин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Е. Д. Чижаткина

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

Тольятти 2025

Аннотация

Расчет и проектирование системы выпуска газов гоночно-спортивных автомобилей. Выпускная квалификационная работа. Тольяттинский государственный университет, 2025.

Целью этой работы является создание эффективной выпускной системы для гоночного автомобиля класса «Формула Студент», которая будет соответствовать регламенту соревнований, а также будет принята во время технической инспекции, а также будет превосходить по эффективности конструкции конкурентов.

- 1) Обозреть назначение проекта «Формула Студент»;
- 2) провести детальный анализ теоретических сведений, касающихся выпускных систем для ДВС;
- 3) провести сравнительную аналитическую работу в отношении конструкций выпускных систем гоночных болидов конкурирующих команд «Формула Студент»;
- 4) произвести расчетные работы и разработать оптимальную конструкцию выпускной системы.

Во время проведения данной работы, был выполнен подробный анализ теоретических данных об устройстве и работе системы выпуска в связке с двигателем внутреннего сгорания, а также был проведен анализ существующих конструкций выпускных систем, устанавливаемых на гоночные болиды конкурирующих команд.

Работа состоит из пояснительной записки в размере 49 страниц, содержащей 3 таблицы, 23 рисунка и графической части, содержащей 6 листов.

Abstract

Calculation and design of the exhaust system of racing and sports cars. Graduation qualification work. Togliatti State University, 2025.

The purpose of this work is to create an effective exhaust system for a Formula Student racing car that will comply with the competition regulations, will be accepted during the technical inspection, and will also be superior in efficiency to competitors' designs.

- 1) Review the purpose of the Formula Student project;
- 2) conduct a detailed analysis of theoretical data regarding exhaust systems for internal combustion engines;
- 3) conduct a comparative analytical work regarding the designs of exhaust systems of racing cars of competing Formula Student teams;
- 4) perform calculations and develop an optimal design of the exhaust system.

During this work, a detailed analysis of theoretical data on the design and operation of the exhaust system in conjunction with an internal combustion engine was performed, and an analysis of existing designs of exhaust systems installed on racing cars of competing teams was carried out. The work consists of an explanatory note of 49 pages, containing 3 tables, 23 figures and a graphic section containing 6 sheets.

Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса	7
1.1 Основные сведения о соревнованиях «Формула Студент».....	7
1.2 Основные требования регламента соревнований «Формула Студент» к конструкции системы выпуска.	9
1.3 Теоретические сведения о системе выпуска автомобиля.....	15
2 Проведение анализа конструкций гоночных болидов класса «Формула Студент».....	23
3 Проектирование системы выпуска гоночного болида класса «Формула Студент».....	30
4 Безопасность и экологичность технического объекта	40
Заключение	45
Список используемой литературы и используемых источников.....	46

Введение

Актуальность проекта «Формула Студент» как способа получения высококвалифицированных инженерных кадров можно обосновать несколькими ключевыми аспектами. В условиях стремительного развития технологий и цифровизации экономики наблюдается растущий спрос на высококвалифицированных инженеров. Проект «Формула Студент» может стать эффективным инструментом для подготовки специалистов, способных решать современные задачи. Внедрение современных методов обучения, таких как проектное обучение, стажировки на предприятиях, участие в реальных проектах, позволит студентам не только получить теоретические знания, но и развить практические навыки, необходимые для работы в инженерной сфере. Взаимодействие с предприятиями и организациями даст возможность студентам получать актуальный опыт и знания, соответствующие требованиям рынка труда, а также наладить связи между образовательными учреждениями и работодателями, что способствует более эффективному трудоустройству выпускников. Важной частью подготовки инженеров является развитие навыков командной работы, критического мышления и креативности.

Кроме того, инженерные специальности постоянно эволюционируют, и важно, чтобы образовательные программы адаптировались к новым требованиям. Проект может предусматривать регулярное обновление учебных планов и курсов с учетом современных тенденций и технологий. Наконец, проект может стимулировать студентов к созданию собственных стартапов и инновационных проектов, что не только развивает их предпринимательские навыки, но и способствует созданию новых рабочих мест и развитию экономики. «Таким образом, проект «Формула Студент» представляет собой актуальный и необходимый шаг в подготовке высококвалифицированных инженерных кадров, способных успешно работать в условиях быстро меняющегося мира.

Основная цель каждой команды, участвующей в соревнованиях «Формула Студент» заключается в том, чтобы построить гоночный болид, который должен соответствовать регламенту соревнований, а также, который приведет команду к победе. Целью же данной работы является разработка максимально эффективной выпускной системы для гоночного болида класса «Формула Студент» [21].

В связи с поставленными целями, был сформирован ряд необходимых задач:

– для того, чтобы гоночный болид соответствовал регламенту, все его системы также должны соответствовать регламенту, поэтому необходимо провести подробный анализ общепринятого регламента соревнований;

– для того, чтобы не повторять ошибки других команд, а также перенять у них только лучший опыт, необходимо провести подробный анализ конструкций выпускной системы, которые используют зарубежные команды;

– необходимо провести исследование основных теоретических аспектов, влияющих на эффективность выпускной системы.

1 Состояние вопроса

1.1 Основные сведения о соревнованиях «Формула Студент»

Соревнования «Формула Студент» (Formula Student) – это международный инженерный конкурс, в котором студенты университетов проектируют, строят и тестируют малые гоночные автомобили. Основная цель «Формулы Студент» – дать студентам возможность применить теоретические знания на практике, работая над реальным проектом. Участники создают команды, которые занимаются проектированием, производством и тестированием автомобиля, соответствующего определенным техническим требованиям и стандартам безопасности.

Соревнования проводятся на различных уровнях, включая локальные, национальные и международные этапы. Команды начинают с разработки концепции автомобиля, включая его дизайн, выбор материалов и технологий. На этом этапе студенты проводят расчеты, создают чертежи и модели. После завершения проектирования команды переходят к строительству автомобиля, что включает в себя изготовление шасси, установку двигателя, трансмиссии и других компонентов.

После сборки автомобиля команды проводят тесты для проверки его производительности, безопасности и надежности, что может включать как статические, так и динамические испытания. Основная часть соревнований проходит на треке, где команды соревнуются в различных дисциплинах, которые можно разделить на статические и динамические.

Статические дисциплины включают технический осмотр (Scrutineering), где проверяется соответствие автомобиля техническим требованиям и стандартам безопасности, презентацию проекта (Design Event), где команды представляют свои проекты жюри, объясняя выбор решений, использованных в конструкции автомобиля, и экономический анализ (Cost Event), где оценивается стоимость автомобиля и бизнес-план команды.

На рисунке 1 можно увидеть атмосферу соревнований «Формула Студент».



Рисунок 1 – Совместное фото команд, участвующих на российском этапе соревнований

Динамические дисциплины включают в себя ускорение (Acceleration), где измеряется время, для того чтобы болид разогнался до определенной скорости на дистанции 75 метров, восьмерку (Skid Pad), для определения динамических возможностей автомобиля при движении по окружности, автокросс, для того, чтобы проверить маневренность, болид должен на время проехать извилистую трассу, что показывает его динамические способности, гонку на выносливость, где болид должен двигаться по кругу на протяжении 21 км, чтобы доказать свою надежность и не сломаться за время дисциплины, но также важно проехать круг быстро, иначе баллы будут достаточно низкими.

В некоторых соревнованиях также участвуют электрические автомобили, где команды разрабатывают и тестируют электромобили. Соревнования «Формула Студент» представляют собой уникальную возможность для студентов получить практический опыт в инженерии, развить навыки работы в команде и научиться решать реальные проблемы, что способствует подготовке высококвалифицированных специалистов, готовых к вызовам современного рынка труда.

1.2 Основные требования регламента соревнований «Формула Студент» к конструкции системы выпуска

Регламент соревнований «Формула Студент» представляет собой свод правил и требований, которые определяют условия участия команд, проектирующих и строящих малые гоночные автомобили. Этот регламент служит основой для обеспечения безопасности, справедливости и технической целостности соревнований. Он необходим для обеспечения безопасности участников, зрителей и окружающей среды, так как содержит требования, направленные на защиту всех вовлеченных.

Регламент устанавливает единые правила для всех команд, что позволяет избежать неравенства и обеспечивает честную конкуренцию, предоставляя всем участникам равные условия для демонстрации своих инженерных решений. Он также определяет допустимые технологии и материалы, что способствует инновациям и развитию инженерных решений, позволяя командам сосредоточиться на проектировании и оптимизации своих автомобилей.

Кроме того, регламент описывает критерии, по которым команды будут оцениваться в различных дисциплинах, что помогает судейской коллегии объективно оценивать результаты.

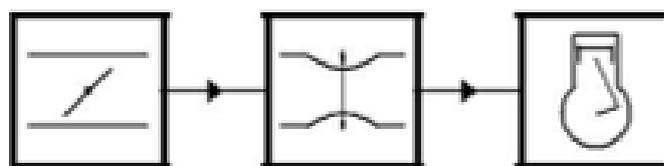
Основные разделы регламента обычно включают общие положения, где описываются цели соревнований, требования к участникам и правила участия;

требования к автомобилю, содержащие подробные технические требования к конструкции, включая размеры, вес, материалы и системы безопасности; безопасность, где указаны правила, касающиеся защиты водителя и автомобиля; тестирование и сертификацию, а также экологические требования, которые могут быть указаны для электрических и гибридных моделей, включая ограничения на выбросы и требования к использованию устойчивых технологий. Таким образом, регламент «Формула Студент» является важным документом, который определяет правила и условия для всех участников, помогая им создавать безопасные, эффективные и конкурентоспособные автомобили.

В рамках данной работы разрабатывается система выпуска, поэтому наиболее важным разделом регламента соревнований является именно раздел с общими требованиями к конструкции автомобиля. Для того, чтобы обезопасить неопытных пилотов (в соревнованиях «Формула Студент» пилотами являются сами студенты, которые построили автомобиль), ассоциацией инженеров были введены некоторые ограничения в регламент соревнований.

Например, одно из требований регламента гласит, что объем двигателя внутреннего сгорания не может превышать 710 см^3 . Помимо того, что объем двигателя ограничен, мощность двигателя также ограничивается, но только искусственно. Для случаев, когда из малообъемного мотора пытаются получить максимальное количество мощности ввели специально пункт регламента 1.7.1, который обязует каждую команду принудительно уменьшать подачу воздуха в камеру сгорания. Данным приспособлением является рестриктор.

Рестриктор – специально установленный ограничитель или же заложенное в конструкцию сужение впускного канала для ограничения потока воздуха. На рисунке 2 можно увидеть схему, рекомендуемую регламентом соревнований



Дроссельная заслонка

Рестриктор

Двигатель

Рисунок 2 – Требование к установке рестриктора в автомобиль класса «Формула Студент»

«Кроме того, иногда команды оснащают свой ДВС дополнительные устройства, нагнетающие воздух в камеру сгорания для получения большего количества воздуха. Однако для таких случаев ассоциацией инженеров было также предусмотрено требование и схема-инструкция для установки рестриктора в систему впуска болида класса «Формула Студент». На рисунке 3 можно увидеть требование регламента соревнований к установке рестриктора в систему впуска. На рисунке можно разглядеть, что рестриктор должен быть установлен перед компрессором» [2].



Рисунок 3 – Требование к установке рестриктора в автомобиль класса «Формула Студент» с турбокомпрессором

Также нам необходимо рассмотреть пункты общепринятого регламента, которые напрямую относятся к выпускной системе гоночного автомобиля класса «Формула Студент»:

– пункт 1.3.1 Для обеспечения безопасности пилота во время переворота, на огибающую поверхность болиде, которая проходит через главную дугу, а также по касательной к передним и задним колесам, что образует купол над машиной;

– пункт 2.1.3 Запрещается размещать любые твердотельные элементы в зону свободы колем, обусловленные определенным расстоянием в 75 мм спереди и сзади колеса. Это касается и переднего и заднего колеса. На рисунке 4 можно увидеть схему с зонами, свободными от размещения в них каких-либо конструкций.

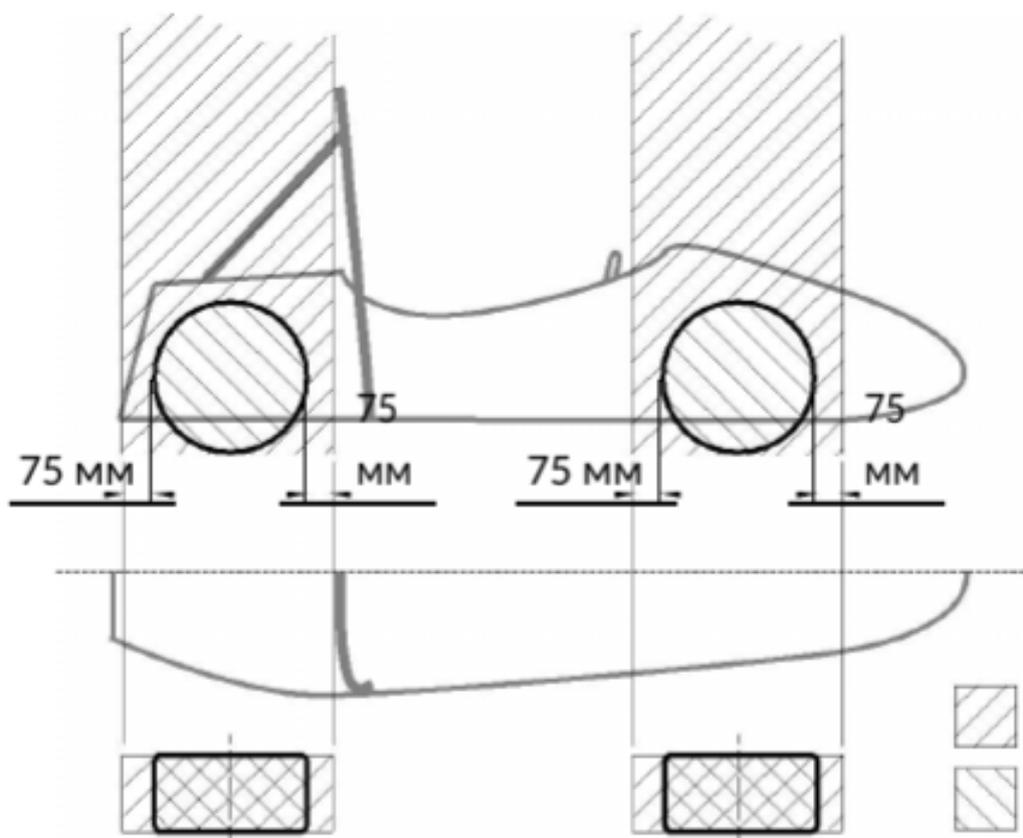


Рисунок 4 – Схема с зонами, свободными от размещения в них каких-либо конструкций

Вот еще некоторые требования, касающиеся выпускной системы гоночного болида «Формула Студент» из регламента соревнований:

– запрещено, чтобы на пилота во время движения могли попадать отработавшие газы с выхлопной трубы, причем в любых условиях и при любых скоростях на трассе;

– запрещается располагать части выхлопной трубы болида в зоне 400 мм относительно задней оси гоночного болида класса «Формула Студент», а также нельзя устанавливать части выпускной системы на высоте более 600 мм над уровнем земли;

– если хоть какая-то часть выпускной системы выходит за пределы главной дуги автомобиля, то любые открытые части имеющие высокую

температуру, а именно более 70 градусов должны быть надежно спрятаны или закрыты таким образом, чтобы не было никакой возможности обжечься человеку, подходящему к автомобилю;

– любые поглощающие материалы не могут быть допущены в случае, если они используются на наружной поверхности элементов выпускной системы.

«Все эти требования тщательно проверяются техническими инспекторами в процессе основной части технической инспекции гоночного автомобиля. Если выхлопная система не соответствует хотя бы одному из пунктов регламента, возможны три сценария:

– команда будет дисквалифицирована;

– команда получит штраф (размер штрафа определяется в обсуждении между техническими инспекторами и организаторами);

– команда может внести изменения в свой автомобиль, чтобы привести его в соответствие с регламентом, пока зона технической инспекции остается открытой.

Кроме того, к системе выпуска отработавших газов предъявляются требования по уровню шума, который она издает во время работы двигателя:

– максимальная тестовая скорость для двигателя соответствует средней скорости поршня в диапазоне 15–25 м/с. Расчетная скорость округляется до ближайшего значения, кратного 500 оборотам в минуту. Исходя из этих расчетов, максимальный уровень шума не должен превышать 110 дБ;

– команда самостоятельно выбирает тестовый холостой ход для своего двигателя. Холостой ход определяется на основе их откалиброванного значения. Если частота вращения при холостом ходе изменяется, автомобиль будет протестирован на различных оборотах, определенных командой. Максимально допустимый уровень шума на холостом ходу не должен превышать 103 дБ» [4]. На рисунке 5 можно увидеть процесс замера шума выпускной системы.



Рисунок 5 – Замер шума

Для того чтобы провести замеры шума выпускной системы обычно используется высокоточное специализированное оборудование. Для того чтобы замерить шум на соревнованиях, команде необходимо проехать в специальную зону для замера шума. Повторная проверка шума также может быть назначена техническими инспекторами в случае необходимости.

1.3 Теоретические сведения о системе выпуска автомобиля

Система выпуска гоночного болида – это важный компонент, который играет очень важную роль в работе ДВС автомобиля. Эта система позволяет очищать камеру сгорания после рабочего цикла, и набрать после этого свежий заряд, для последующего эффективного такта.

История выпускных систем начинается с появления первых автомобилей в конце 19 века. На ранних моделях отработавшие газы просто выбрасывались в атмосферу, что приводило к загрязнению и неприятным запахам. С развитием технологий и увеличением числа автомобилей возникла необходимость в более эффективных системах, способных не только отводить газы, но и очищать их. В 20-х годах 20 века начали появляться первые системы, использующие глушители для снижения шума. В 1970-х годах, с

введением строгих экологических норм, таких как Закон о чистом воздухе в США, выпускные системы стали включать катализаторы, которые значительно снизили уровень вредных выбросов.

Основная функция выпускной системы – безопасный отвод отработавших газов из двигателя, что предотвращает их накопление в моторном отсеке.

Современные выпускные системы оснащены катализаторами и фильтрами, которые помогают снизить уровень токсичных веществ, таких как угарный газ, углеводороды и оксиды азота.

Правильная работа выпускной системы способствует улучшению производительности двигателя, так как обеспечивает оптимальный отвод газов и поддерживает необходимое давление в системе.

«Выпускная система состоит из нескольких ключевых компонентов:

- выпускные коллекторы, которые собирают отработавшие газы из цилиндров двигателя и направляют их в дальнейшие части системы;
- глушитель, который уменьшает уровень шума, создаваемого отработавшими газами;
- катализатор, устанавливаемый для химической обработки отработавших газов;
- выходная труба, которая выводит очищенные газы в атмосферу» [6].

Работа выпускной системы начинается с того, что отработавшие газы, образующиеся в процессе сгорания топлива, попадают в выпускные коллекторы. Затем они проходят через глушитель, где уровень шума снижается, и далее через катализатор, где происходит химическая реакция, уменьшающая количество вредных веществ. Наконец, очищенные газы выбрасываются через выходную трубу. Таким образом, выпускная система автомобиля является неотъемлемой частью, обеспечивающей как безопасность, так и экологичность работы транспортного средства.

«Каталитический нейтрализатор, или катализатор, является важным компонентом выпускной системы автомобиля, предназначенным для

снижения вредных выбросов. У него есть как плюсы, так и минусы. Основное преимущество катализатора заключается в его способности значительно уменьшать количество токсичных веществ, таких как угарный газ (CO), углеводороды (HC) и оксиды азота (NOx), которые выбрасываются в атмосферу. Использование катализаторов позволяет автомобилям соответствовать строгим экологическим нормам и стандартам, что особенно важно в странах с жестким контролем за выбросами. Снижение вредных выбросов способствует улучшению качества воздуха в городах и уменьшению негативного воздействия на здоровье людей и экосистему. Кроме того, катализаторы могут способствовать более полной переработке топлива, что может привести к небольшому увеличению мощности и эффективности работы двигателя. Современные катализаторы имеют длительный срок службы, что делает их экономически выгодными в долгосрочной перспективе. Однако у каталитических нейтрализаторов есть и недостатки. Они могут быть дорогими в производстве и замене, особенно если они повреждены или требуют ремонта. Использование некачественного топлива или добавок может привести к повреждению катализатора, что снизит его эффективность и срок службы. Для эффективной работы катализатора требуется поддержание определенной температуры и состава отработавших газов, и он может не работать эффективно при низких температурах. Утилизация старых катализаторов может быть проблематичной, так как они содержат драгоценные металлы, такие как платина, палладий и родий, которые требуют специальной переработки. В некоторых случаях установка катализатора может привести к небольшому снижению мощности двигателя, особенно если он неправильно подобран или установлен. В целом, каталитический нейтрализатор играет важную роль в снижении вредных выбросов и улучшении экологической ситуации, однако его использование связано с определенными затратами и требованиями» [8].

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

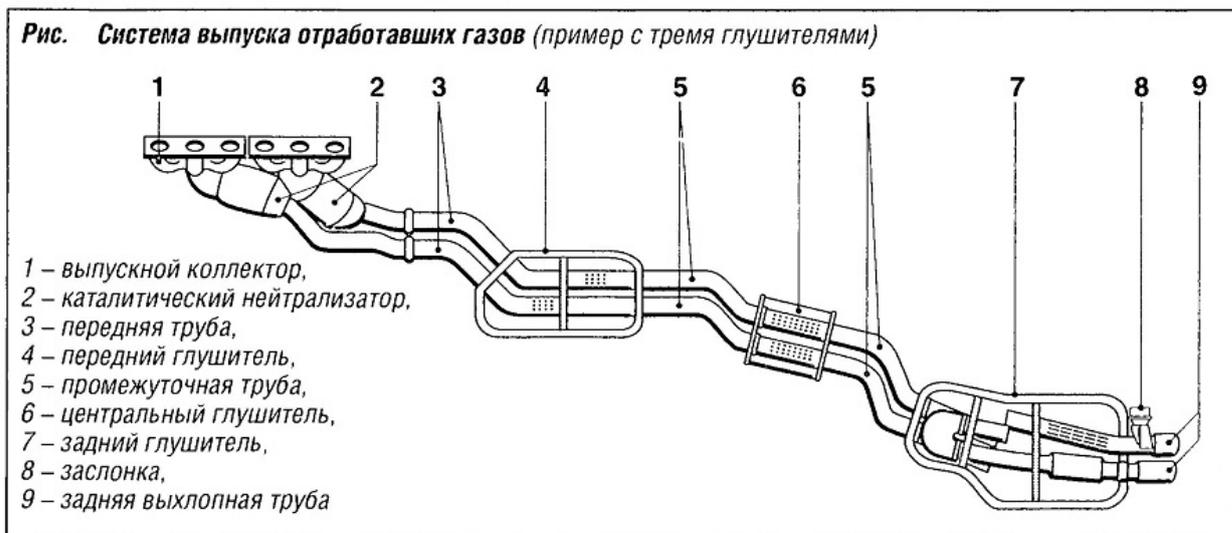


Рисунок 6 – Схематическое изображение системы выпуска

В 4-тактном двигателе внутреннего сгорания процесс работы включает четыре основных такта: впуск, сжатие, рабочий ход и выпуск.

На первом такте, впускном, поршень движется вниз, создавая вакуум в цилиндре, и впускной клапан открывается, позволяя смеси воздуха и топлива поступать в цилиндр. В этот момент отработавшие газы из предыдущего цикла уже находятся в выпускной системе, но они не участвуют в процессе.

На втором такте, такте сжатия, поршень начинает двигаться вверх, закрывая впускной клапан. В этом такте происходит сжатие топливно-воздушной смеси, и отработавшие газы, образовавшиеся ранее, остаются в выпускной системе, не влияя на текущий процесс.

Затем наступает третий такт, рабочий ход, когда поршень достигает верхней мертвой точки, и происходит искровое зажигание (в бензиновых двигателях) или самовоспламенение (в дизельных). В результате сгорания образуются новые отработавшие газы, которые создают высокое давление и толкают поршень вниз, обеспечивая работу двигателя.

Наконец, на четвертом такте, выпускном, поршень снова движется вверх, открывая впускной клапан. Отработавшие газы выбрасываются из

цилиндра в выпускной коллектор, а затем проходят через каталитический нейтрализатор, где происходит их химическая обработка для снижения токсичности, и через глушитель, который уменьшает уровень шума.

В конце концов, очищенные газы выходят в атмосферу через выходную трубу. Таким образом, отработавшие газы образуются в рабочем ходе и выводятся из цилиндра в выпускном такте, проходя через систему, которая снижает их вредное воздействие на окружающую среду.

На рисунке 7 можно увидеть все четыре такта работы 4-тактного двигателя внутреннего сгорания.

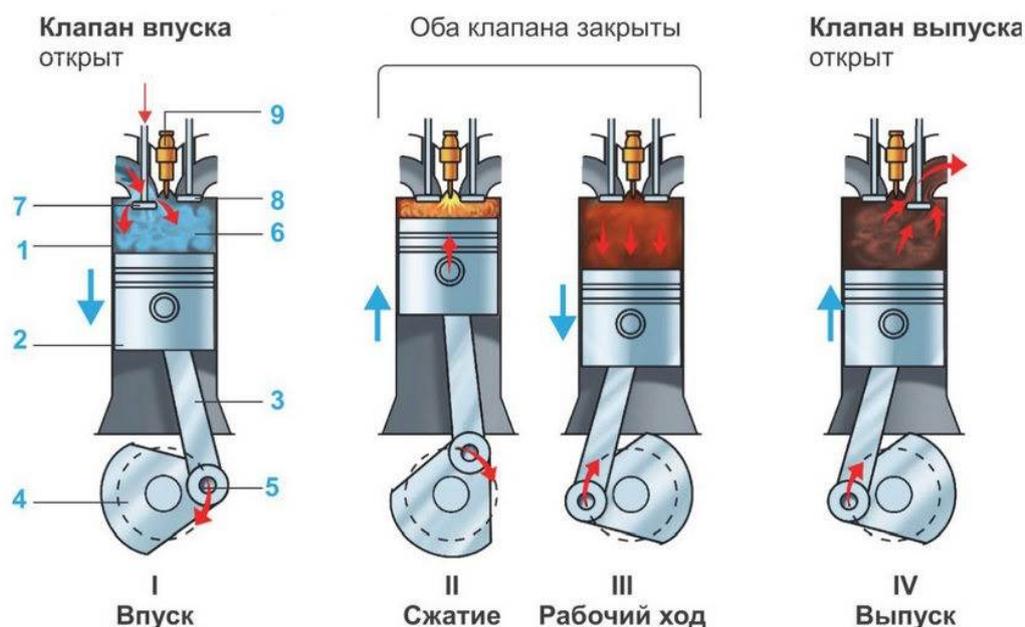


Рисунок 7 – Рабочие такты ДВС

Выпускную систему автомобиля изготавливают из термостойких материалов по нескольким ключевым причинам. Во-первых, в процессе работы двигателя температура отработавших газов может достигать очень высоких значений, особенно в области выпускного коллектора и глушителя. Термостойкие материалы способны выдерживать эти высокие температуры, не теряя прочности и не деформируясь. Во-вторых, отработавшие газы

содержат агрессивные химические соединения, такие как сернистые и азотистые соединения, которые могут вызывать коррозию. Поэтому термостойкие материалы, такие как нержавеющая сталь или специальные сплавы, обладают высокой коррозионной стойкостью, что значительно увеличивает срок службы выпускной системы.

Кроме того, выпускная система подвергается постоянным циклам нагрева и охлаждения, что может приводить к термическим напряжениям и, в итоге, к образованию трещин или другим повреждениям. Термостойкие материалы хорошо справляются с этими нагрузками, сохраняя свои свойства. Также использование таких материалов позволяет выпускной системе работать более эффективно, так как они помогают поддерживать оптимальную температуру отработавших газов, что способствует лучшему отведению тепла и снижению сопротивления потоку газов. Наконец, высокие температуры в выпускной системе могут представлять опасность, если материалы не выдерживают нагрузки, поэтому термостойкие материалы снижают риск возгорания и других опасных ситуаций, связанных с перегревом. Таким образом, применение термостойких материалов в выпускной системе является необходимым для обеспечения надежности, долговечности и безопасности работы двигателя, а также для снижения вредных выбросов и повышения общей эффективности автомобиля.

Импульсные выпускные системы представляют собой современное решение в автомобильной инженерии, направленное на оптимизацию работы двигателя и увеличение его производительности. Ключевая особенность таких систем заключается в использовании принципа резонанса для улучшения отведения отработанных газов, что, в свою очередь, способствует более эффективному заполнению цилиндров свежей топливно-воздушной смесью.

Существует несколько типов импульсных выпускных систем, среди которых наиболее популярны конфигурации 4-2-1 и 4-1. В системе 4-2-1 четыре цилиндра двигателя делятся на две группы по два цилиндра, которые затем соединяются в один общий коллектор. Этот подход создает два

резонансных эффекта, что улучшает отвод газов на средних оборотах и обеспечивает более равномерное распределение давления в системе. Это особенно полезно для двигателей, работающих в широком диапазоне оборотов, так как позволяет достичь оптимальной производительности в различных режимах.

В конфигурации 4–1 все четыре цилиндра соединяются в один общий коллектор, что позволяет достичь максимального резонансного эффекта на высоких оборотах. Это делает такую систему идеальной для спортивных автомобилей и гоночных машин, так как она способствует более быстрому удалению отработанных газов, увеличивая мощность и отзывчивость двигателя на нажатие педали акселератора.

Импульсные выпускные системы не только повышают производительность двигателя, но и могут снижать уровень шума и вибраций, что делает их привлекательными как для спортивных, так и для серийных автомобилей. Благодаря своей конструкции они обеспечивают оптимальный баланс между мощностью, экономичностью и комфортом вождения.

«На рисунках 8 и на рисунке 9 можно увидеть системы выпуска, со схемой 4–2–1 и со схемой 4–1 соответственно. Правильный выбор длины элементов трубопровода выхлопной системы имеет большое значение, так как это позволяет увеличить или уменьшить коэффициент наполнения цилиндров на различных диапазонах частот вращения коленчатого вала. Длина первичных трубопроводов оказывает наибольшее влияние на эффективность очистки камеры сгорания» [3].



Рисунок 8 – Система выпуска 4–2–1



Рисунок 9 – Система выпуска 4–1

Выводы по разделу

«В данном разделе были рассмотрены основные теоретические аспекты выпускной системы автомобиля. Рассмотрены такие теоретические сведения как функция система выпуска автомобиля, типы конструкций, основные параметры выпускных систем. Рассмотрены теоретические аспекты проектирования выпускной системы для гоночного автомобиля класса «Формула Студент» [20].

2 Проведение анализа конструкций гоночных болидов класса «Формула Студент»

Актуальность проведения сравнительного анализа конструкций болидов «Формула Студент» зарубежных команд обусловлена несколькими ключевыми факторами.

Во-первых, соревнования «Формула Студент» представляют собой платформу для студентов инженерных специальностей, где они могут применить теоретические знания на практике, разрабатывая и создавая собственные гоночные автомобили. Сравнительный анализ конструкций позволяет выявить лучшие практики и инновационные решения, которые могут быть адаптированы и использованы в будущих проектах.

Во-вторых, анализ различных подходов к проектированию и конструированию болидов помогает понять, какие технологии и материалы наиболее эффективны для достижения высоких показателей производительности, безопасности и надежности. Это особенно важно в условиях жесткой конкуренции, где каждая деталь может оказать значительное влияние на результаты гонок.

Кроме того, изучение зарубежных команд позволяет выявить тенденции и новшества в области автомобильной инженерии, что может быть полезно для студентов и преподавателей, стремящихся к постоянному развитию и улучшению образовательных программ. Сравнительный анализ также способствует обмену опытом между командами, что может привести к улучшению качества проектов и повышению уровня подготовки студентов.

Наконец, такой анализ может помочь в формировании стратегий для будущих соревнований, позволяя командам более эффективно планировать свои разработки и оптимизировать ресурсы. В условиях глобализации и быстрого развития технологий важно быть в курсе последних достижений и тенденций, что делает сравнительный анализ конструкций болидов «Формула Студент» зарубежных команд особенно актуальным и полезным.

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



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

На фотографии можно увидеть, что на болид «Формула Студент» установлен четырехцилиндровый ДВС от мотоцикла Хонда. «Можно увидеть, что из головки блока цилиндров выходит четыре отдельных трубы и далее соединяются воедино. Это означает, что команда использует схему выпускной системы 4-1. Можно сказать, что данное решение хорошо повлияет на работу двигателя внутреннего сгорания, путем обеспечения свежего заряда за счет своевременного и эффективного удаления отработавших газов из камеры сгорания. Также можно заметить, что данная команда решила не использовать глушитель или резонатор в своей системе выпуска, что скорее всего приведет

к тому, что команда не сможет пройти техническую инспекцию. Кроме того, на фото видно, что выходная труба направлена в сторону подвески и заднего колеса, что негативно скажется на управляемости болида за счет разной температуры шин на одной оси.

Далее, на рисунке 11 рассмотрим конструкцию выпускной системы одной из австралийских команд «Формула Студент» [20].



Рисунок 11 – Гоночный болид австралийской команды «Формула Студент»

«На рисунке 11 можно увидеть двигатель внутреннего сгорания от мотоцикла Ямаха, а также выпускную систему австралийской команды. Стоит заметить, что схема выпускной системы используется такая же, как и на рисунке 10, однако здесь используются более длинные первичные трубы, которые плавно перетекают в выпускную трубу. Данная команда использует глушитель для того, чтобы снизить шум от двигателя, что в свою очередь поможет команде пройти тест на шум во время технической инспекции. По сравнению с предыдущей командой, данная команда вывела выхлопную трубу назад, а не на колесо, однако можно увидеть, что настолько длинная система

выпуска скорее всего выходит за пределы пространственной рамы, что является небезопасным и запрещается регламентом соревнований.

Далее рассмотрим одну из немецких команд «Формула Студент», гоночный болид которой изображен на рисунке 12» [1].



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

На данном изображении можно увидеть, что команда также использует четырехцилиндровый ДВС, однако обратите внимание на расположении первичного трубопровода, а также на расположении глушителя в данной конструкции. Первое, что хочется отметить, так это то, что горячие части глушителя мало того, что в открытом доступе для человека, так еще и перекрывают большое количество элементов, которые могут выйти из строя и потребовать замену. Далее стоит отметить, что глушитель в данной конструкции имеет внушительные размеры, что в свою очередь может говорить о том, что шума издавал данный болид достаточно много, и команда

была вынуждена прибегнуть к увеличению глушащего элемента, чтобы пройти техническую инспекцию.

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 данном изображении можно увидеть гоночный болид «Формула Студент», оснащенный одноцилиндровым двигателем внутреннего сгорания. Обычно двигатели с одним цилиндром, такие как КТМ работают на очень высоких оборотах и создают много шума, поэтому можно увидеть, что команда применила схему 1–1 с использованием в системе и резонатора и глушителя, что указывает на то, что команда имела определенные проблемы с шумом. Также стоит отметить, что все горячие части выпускной системы располагаются в достаточно открытых зонах с легким доступом для человека.

Далее рассмотрим гоночный болид класса «Формула Студент» одной из перспективных австрийских команд на рисунке 14» [22].



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

На рисунке выше можно увидеть, что австрийская команда «Формула Студент» использует четырехцилиндровый мотор Хонда. По инженерным соображениям в данном автомобиле используется схема выпускной системы 4-2-1. Также можно увидеть, что первичные трубопроводы выпускной системы были заметно укорочены, что свидетельствует о том, что команда пыталась улучшить работу двигателя внутреннего сгорания на низких оборотах. Стоит отметить, что выпускная система данной команды изготовлена из углеродного волокна, что значительно снижает массу

выпускной системы, а также позволяет добавить конструкции прочности и жаростойкости. Однако из отрицательных моментов данной конструкции и компоновки стоит отметить вторичные трубопроводы, которые имеют изгибы до 90 градусов, что в свою очередь может создавать резонансные колебания за счет ударов отработавших газов в перпендикулярную стенку.

Выводы по разделу

В этом разделе были проанализированы различные конструкции и компоновки гоночных болидов класса «Формула Студент». Были определены позитивные и негативные стороны каждой из конструкций, что позволило взглянуть со стороны на ошибки, сделанные другими командами во время проектирования.

3 Проектирование системы выпуска гоночного болида класса «Формула Студент»

«Прежде чем приступить к проектированию узла или элемента, важно определиться с концепцией, сопутствующими компонентами, их назначением и требованиями, предъявляемыми к конечному продукту. В нашем случае нужно разработать выпускную систему для гоночного автомобиля класса «Формула Студент». Эта система должна строго соответствовать основным правилам соревнований «Формула Студент», чтобы команда могла успешно пройти технический контроль и получить допуск к динамическим испытаниям.

На этапе разработки концепции гоночного болида класса «Формула Студент» также определялись требования и рекомендации к разработке и компоновки выпускной системы гоночного болида, поэтому выпускная система должна соответствовать не только требованиям регламента, но и соответствовать концепции, разработанной командой, а именно:

- повышение эффективности работы двигателя;
- уровень шума в области выхлопной трубы не должен превышать 103 дБ на холостом ходу и 110 дБ на максимальных оборотах;
- максимальная масса выпускной системы должна составлять не более 5,5 кг;
- минимизация вибраций, для чего следует избегать резких поворотов в трубопроводе;
- размещение горячих элементов выпускной системы должно быть вне зоны досягаемости человека, что также может быть достигнуто с помощью аэродинамических элементов кузова гоночного автомобиля «Формула Студент»;
- окончательная часть выпускной системы не должна быть направлена на шины автомобиля; – соединение между выпускной системой и двигателем

внутреннего сгорания должно обеспечивать герметичность и предотвращать утечку отработанных газов в зону пилота.

В качестве исходных данных выступает силовой агрегат – односторонний двигатель от мотоцикла KTM 390, который может развивать обороты до 11500 в минуту. Следовательно, первичный трубопровод должен быть максимально коротким для повышения эффективности на высоких оборотах. Двигатель изображен на рисунке 15» [9].

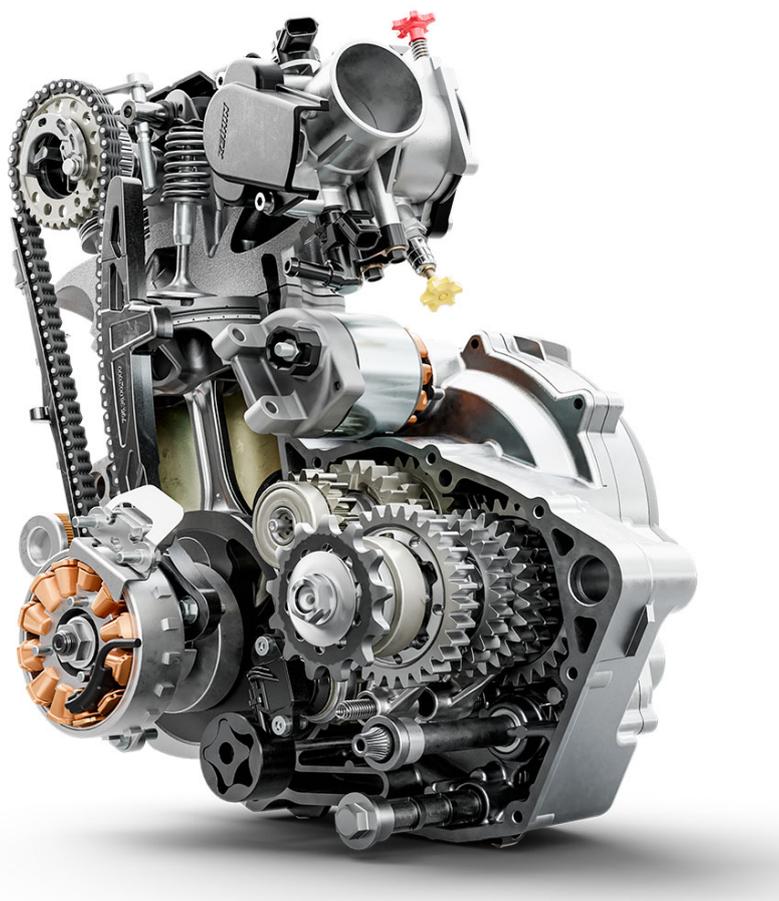


Рисунок 15 – Одноцилиндровый двигатель KTM 390

«Перед началом разработки выхлопной системы гоночного автомобиля важно не только разобраться, какой именно двигатель внутреннего сгорания будет использоваться, но и четко определить его позицию в конструкции будущего болида. Для этого требуется, как минимум, пространственная рама, которая создается от точек подвески автомобиля, а также важно учитывать

расположение сиденья пилота и огнеупорной перегородки, чтобы избежать возможных столкновений двигателя с этими элементами. Кроме того, необходимо иметь точную модель силового агрегата либо, как минимум, корректно оцифрованную упрощенную габаритную модель двигателя. На рисунке 16 представлена часть гоночного автомобиля класса «Формула Студент», необходимая для начала проектирования выхлопной системы» [10].

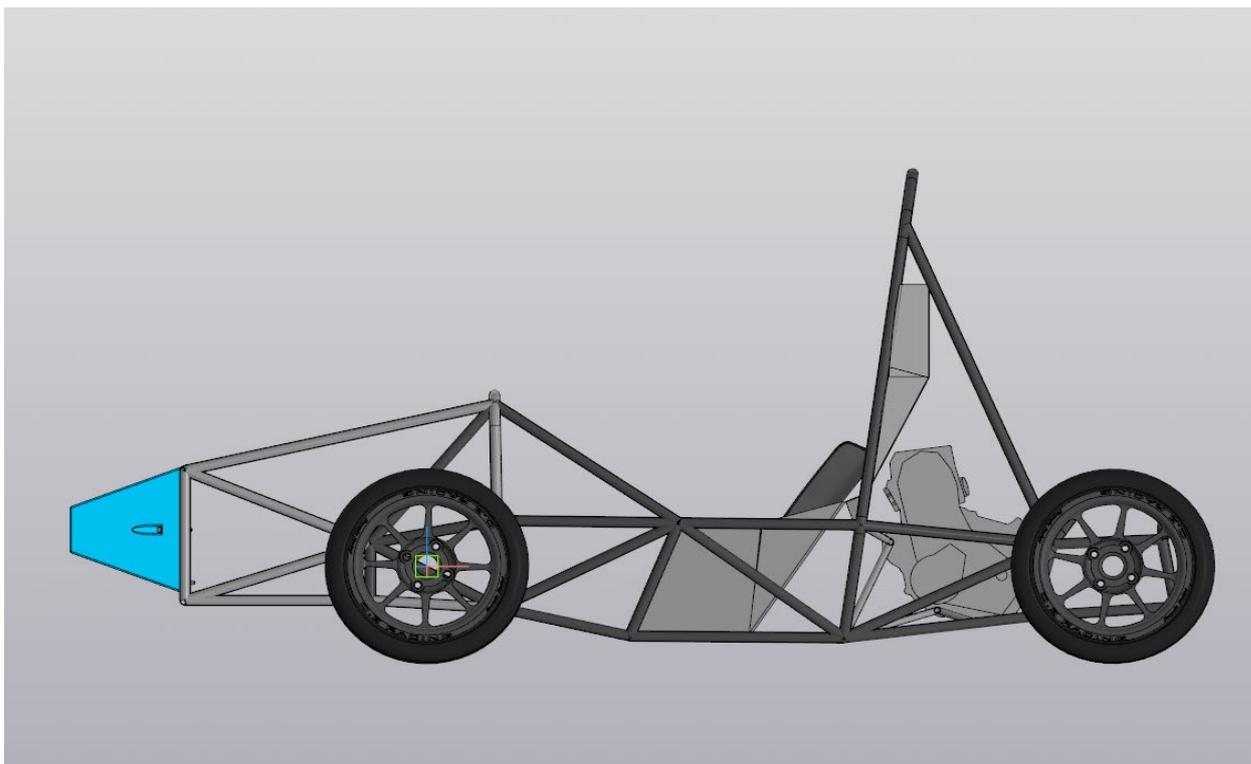


Рисунок 16 – Первый этап проектирования выпускной системы гоночного болида

«После того как силовой агрегат установлен и закреплен в своем положении, необходимо создать первичный трубопровод, начиная с переходного фланца, который обеспечит герметичное соединение между выпускным коллектором и двигателем внутреннего сгорания. Переходной фланец был спроектирован с внутренним диаметром 40 мм, так как для достижения ламинарного потока отработанных газов важно обеспечить максимально гладкий отвод газов без ям и других дефектов.

После разработки переходного фланца необходимо перейти к проектированию самого выпускного коллектора. Напомним, что в соответствии с нашими требованиями, трубопровод первого поколения должен обладать как можно более коротким участком для отвода отработанных газов. Учитывая требования регламента, удалось достигнуть прямой длины первичной трубы в 262 мм, что можно увидеть на рисунке 17» [16].

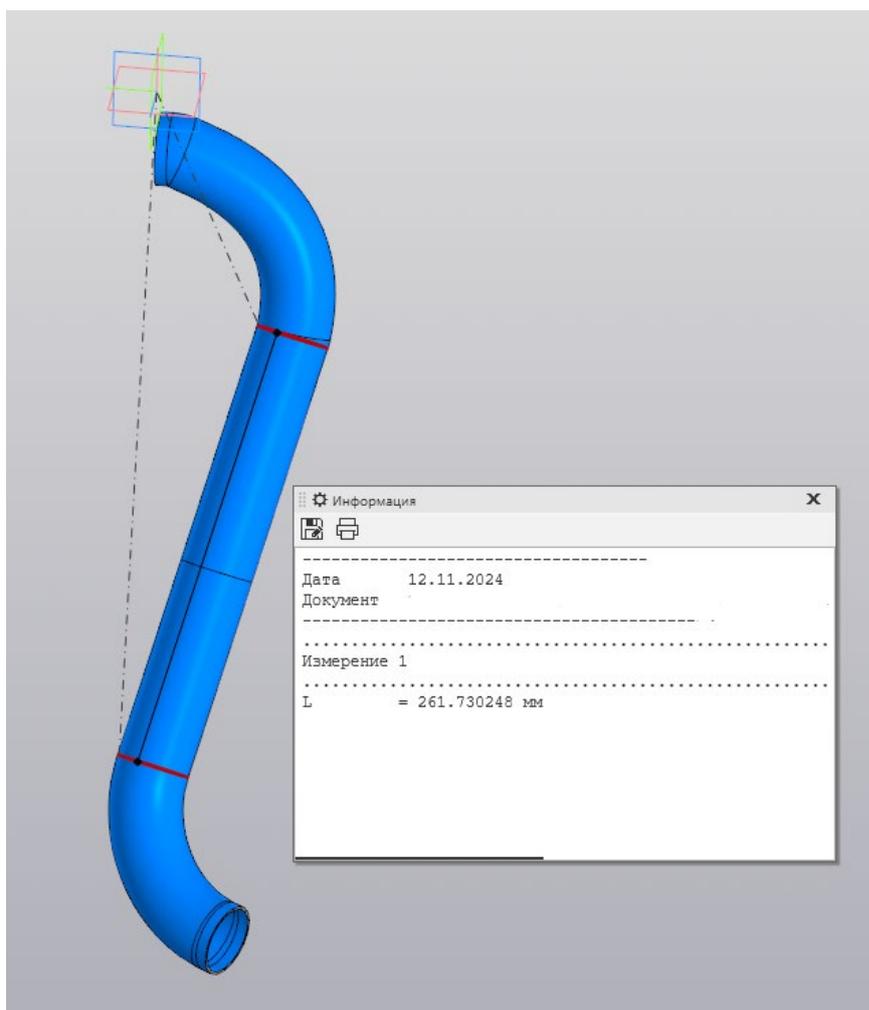


Рисунок 17 – Выпускной коллектор гоночного болида

«Также стоит отметить, что все резкие изгибы были устранены за счет использования трубы с большим радиусом закругления, что теоретически должно способствовать улучшению отвода отработавших газов. Для

первичного трубопровода была выбрана труба диаметром 40 мм, чтобы обеспечить ламинарность потока отработанных газов в процессе выпуска. Кроме того, были проведены симуляции работы выпускного коллектора с целью анализа ламинарности и плавности воздушных потоков, а также скорости их движения. Результаты одной из таких симуляций представлены на рисунке 18» [14].

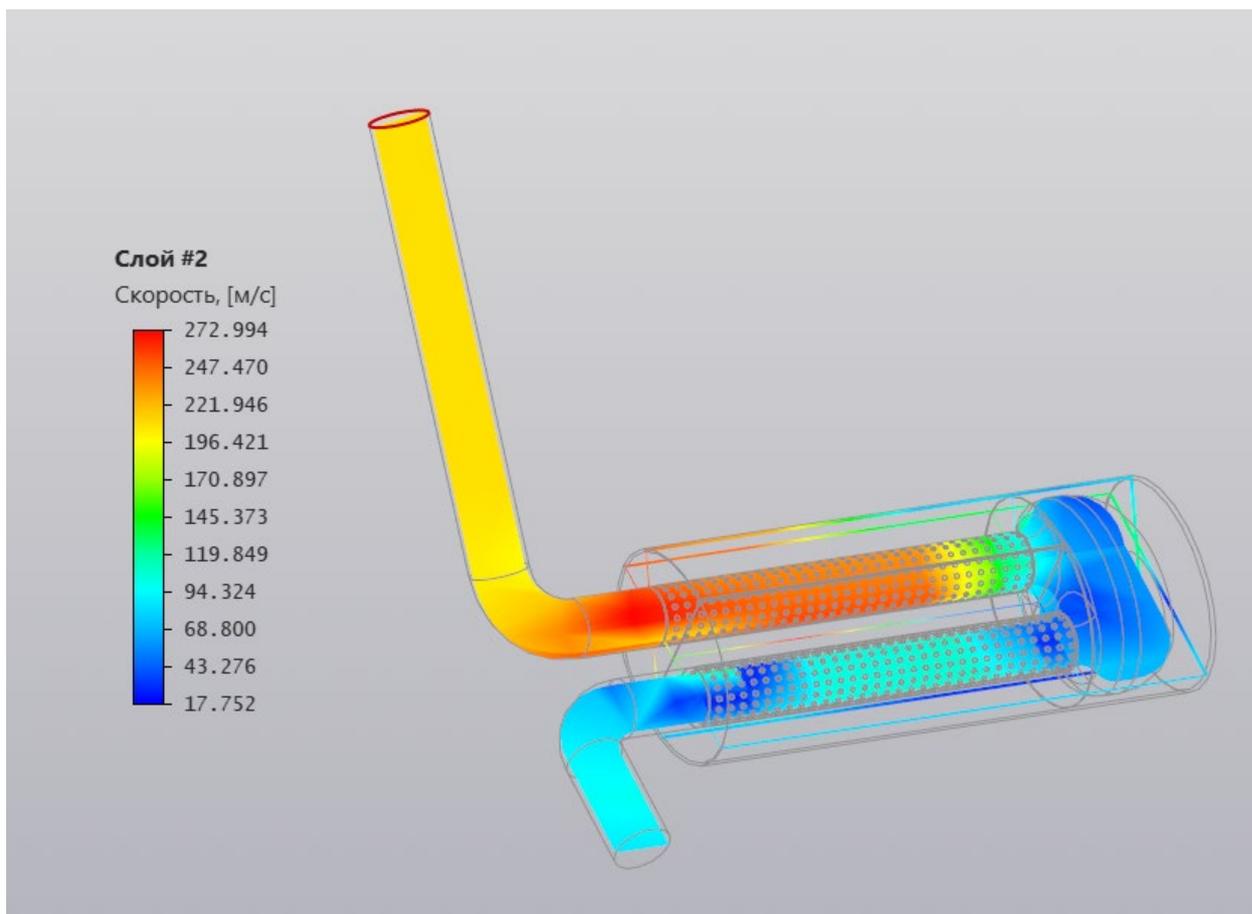


Рисунок 18 – Симуляция скорости потоков воздуха внутри первичного трубопровода выпускной системы

«Что касается обеспечения низкого уровня шума выпускной системы гоночного болида класса «Формула Студент», то для этого был разработан глушитель, который можно увидеть на рисунке 19» [7].

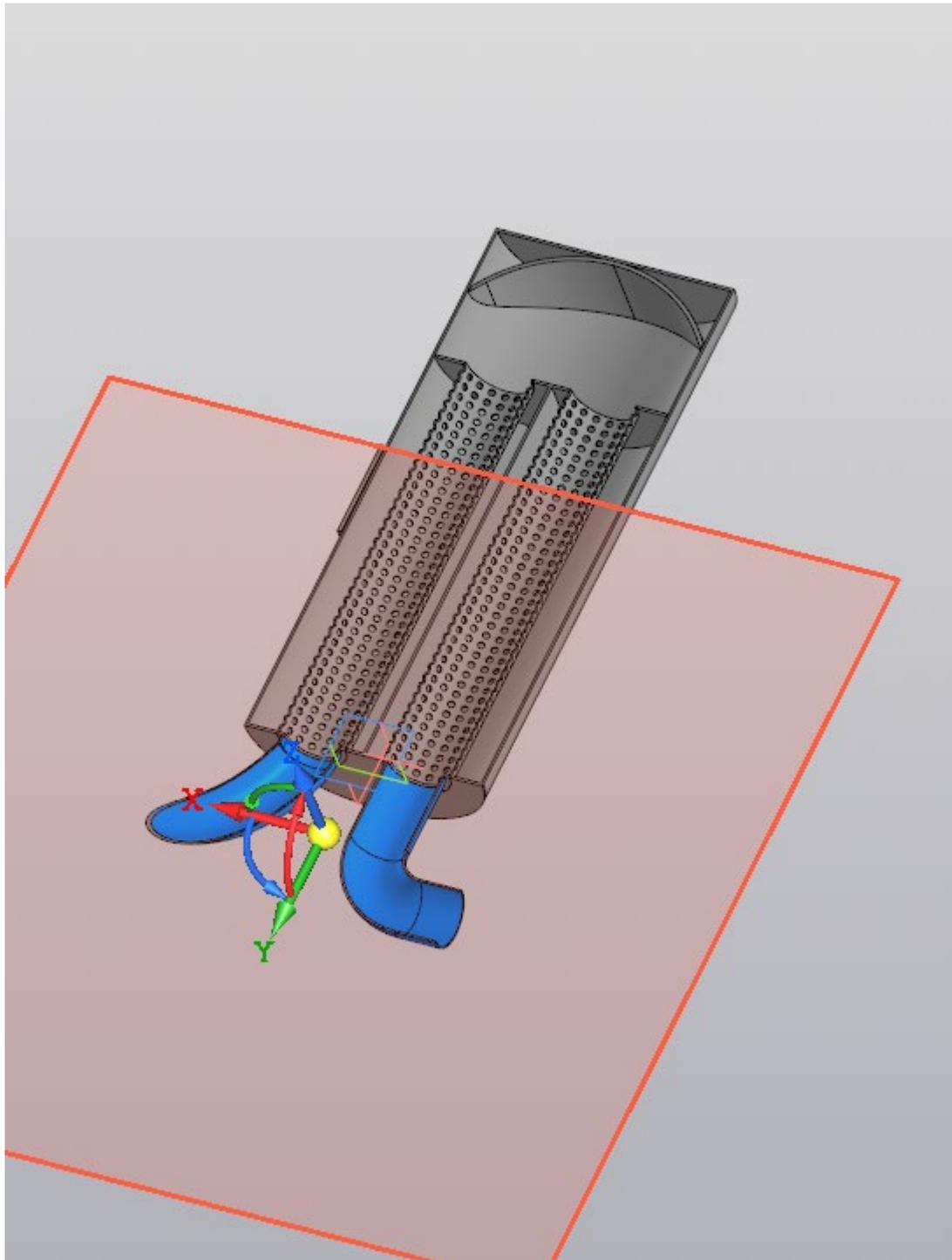


Рисунок 19 – Глушитель гоночного болида в разрезе

«На рисунке 20 показано, что глушитель включает в себя корпус, изготовленный из нержавеющей стали, две перфорированные трубки диаметром 40 мм, разделенные перегородками – одной продольной и одной поперечной, а также изогнутую стенку, форма которой предназначена для

предотвращения резонансных колебаний. В 3D-модель на рисунке 19 не включены такие компоненты, как стальная волокнистая вата и негорючая стекловата.

Глушитель собирается таким образом, что окончательно сваренная конструкция помещается в корпус из нержавеющей стали и заваривается лишь в последнюю очередь. Этот порядок выполнения работ важен, поскольку металлическая и стекловата должны быть обернуты несколькими слоями вокруг перфорированных труб, чтобы конструкция плотно вошла в корпус, что обеспечит эффективное подавление шума. Также критически важно создавать качественные сварные швы на всех соединениях системы выпуска, включая глушитель, поскольку она подвергается значительным вибрациям и может стать подверженной трещинам.

После установки двигателя в пространственную раму гоночного автомобиля класса «Формула Студент» необходимо будет подключить выпускную систему к двигателю, чтобы установить ее в правильное положение и приварить фиксирующие кронштейны. Эти кронштейны будут крепить выпускную систему к корпусу глушителя и фиксироваться к раме.

Результат того, как была реализована выпускная система гоночного болида класса «Формула Студент» можно увидеть на рисунке 20 (вид слева), а также на рисунке 21 (вид справа)» [15].

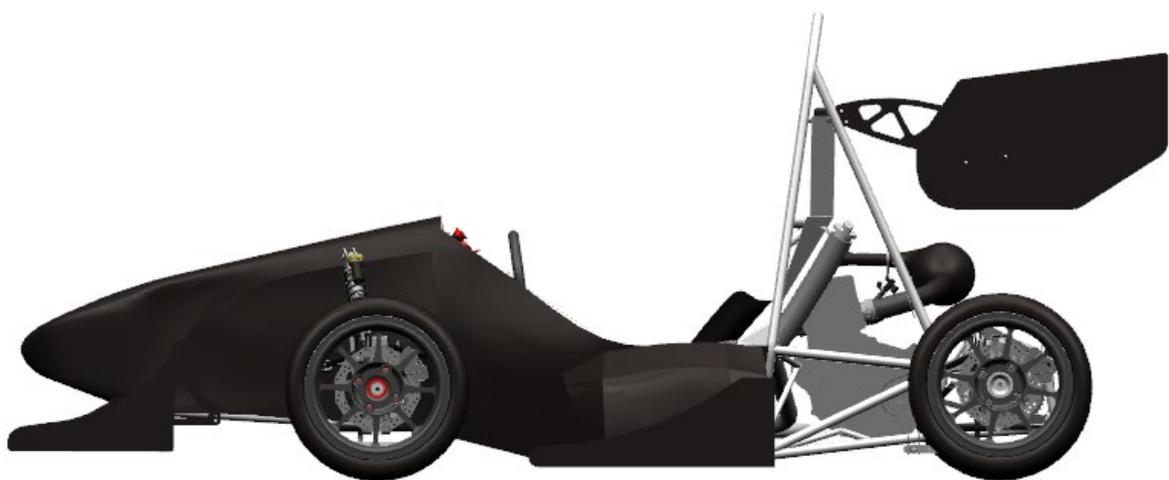


Рисунок 20 – Болид, оснащенный выпускной системой, вид слева

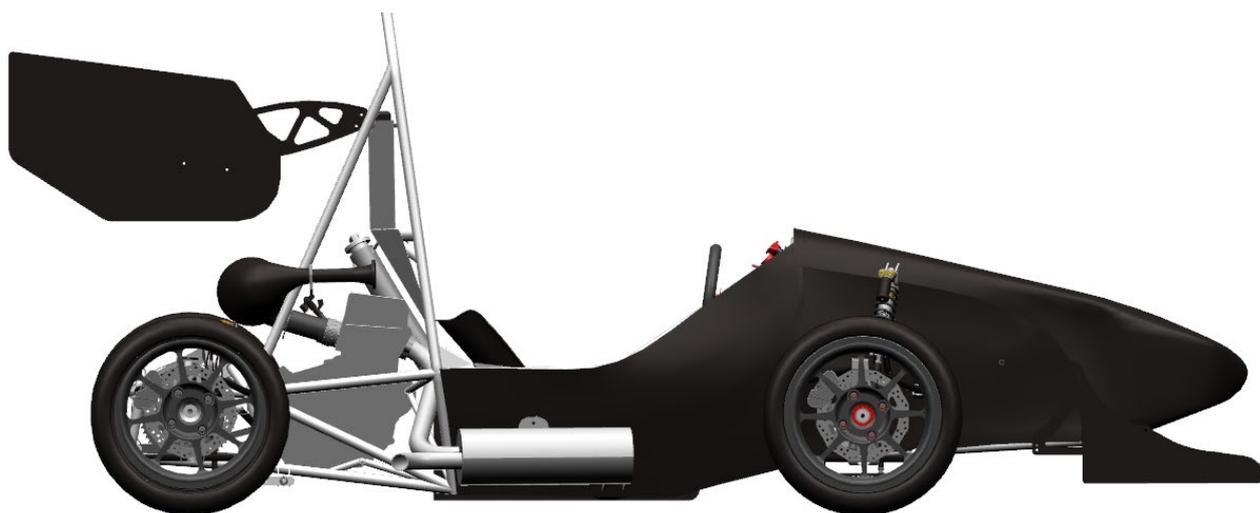


Рисунок 21 – Болид, оснащенный выпускной системой, вид справа

«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;
 φ – 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, м³;
 $L1$ – 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, м³;

L_1 – длина первичной трубы, мм.

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

$$t = Q_p + i_{\text{воздуха}} + i_T - Q_{\text{дис}} / V_T \times c_T, \quad (5)$$

где t – энтальпия топлива, кДж/ед. топлива;

Q_p – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$i_{\text{воздуха}}$ – теоретическое теплосодержание воздуха, кДж/м³;

i_T – теоретическое теплосодержание дымовых газов, кДж/м³;

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

V_T – объем дымовых газов, м³;

c_T – объемная теплоемкость дымовых газов, кДж/м³» [11].

Выводы по разделу

В данном разделе были показаны основные принципы разработки и проектирования системы впуска для гоночного болида класса «Формула Студент». Кроме того, в данном разделе были представлены основные формулы расчета трубопровода системы выпуска

4 Безопасность и экологичность технического объекта

«Создание выхлопной системы для гоночного автомобиля класса «Формула Студент» сопряжено с рисками для работников, поэтому весь процесс должен соответствовать нормам охраны труда, которые гарантируют безопасность сотрудников при производстве деталей. Разработка необходимой документации основывается на опыте зарубежных компаний в машиностроении, а также на законодательстве Российской Федерации. На предприятиях прописаны все важные аспекты, касающиеся обеспечения безопасности, и каждый сотрудник проходит инструктаж, а также регулярно участвует в семинарах по повышению квалификации, что способствует созданию безопасных условий труда.

Для изготовления выхлопной системы автомобиля требуются слесарные, сварочные и сборочные работы. Описание слесарных операций представлено в таблице 1» [5].

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 сотрудника установлены следующие требования по технике безопасности:

– использовать в работе оборудование, инструменты и средства малой механизации строго по назначению, следуя инструкциям производителя;

– выполнять только те задачи, которые были поручены непосредственным руководителем, и не передавать их другим лицам без его

разрешения;

– поддерживать чистоту и порядок на рабочем месте, включая проходы к нему; при возникновении захламления рабочей зоны следует организовать её уборку;

– регулярно проходить проверки знаний по технике безопасности и охране труда;

– периодически проходить медицинские осмотры и проверки состояния здоровья;

– соблюдать правила внутреннего распорядка предприятия;

– следить за соблюдением мер пожарной безопасности и охраны труда на рабочем месте. ОВПФ сварочных работ указаны в таблице 2» [12].

Таблица 2 – ОВПФ сварочных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
1	2	3	4
Сварочные работы	Сварка деталей	Сварочная оснастка, источник сварочного тока, 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 работника установлены следующие правила техники безопасности:

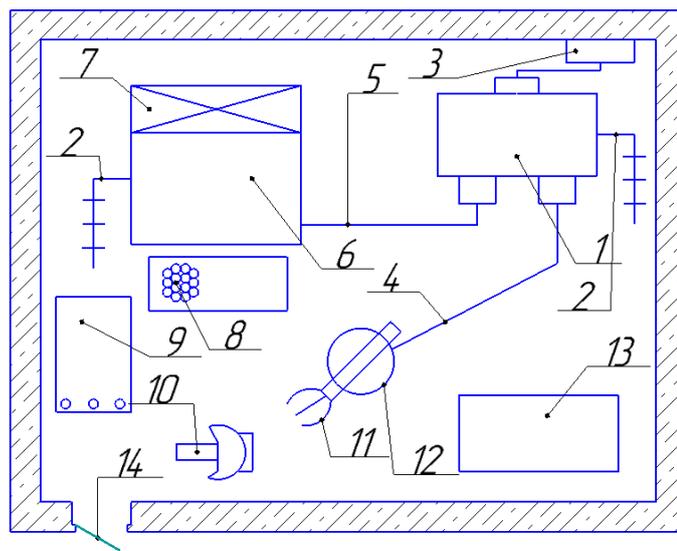
– необходимо провести подготовку и уборку перед осуществлением сварочных работ;

– проверка рабочего оборудования на исправность и его настройка осуществляется до начала работы;

– регулярно проводятся проверки знаний по технике безопасности и

охране труда;

- предполагается периодическая проверка здоровья и медицинские осмотры;
- важно соблюдать внутренний распорядок на предприятии;
- необходимо придерживаться норм пожарной безопасности и правил охраны труда на рабочем месте» [17].



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 электродов; 14 – дверной проем.

Рисунок 22 – Рабочие место для работ со сварочным аппаратом

«Основные обязанности сварщика включают в себя:

- сварку конструкций из различных материалов, обладающих требуемыми характеристиками;
- выполнение прихваток деталей;
- устранение дефектов путём зачистки;
- резку простых элементов с использованием дуговой сварки;
- контроль качества сварного шва и его проникаемости в материал после

завершения сварки с применением специализированных инструментов.

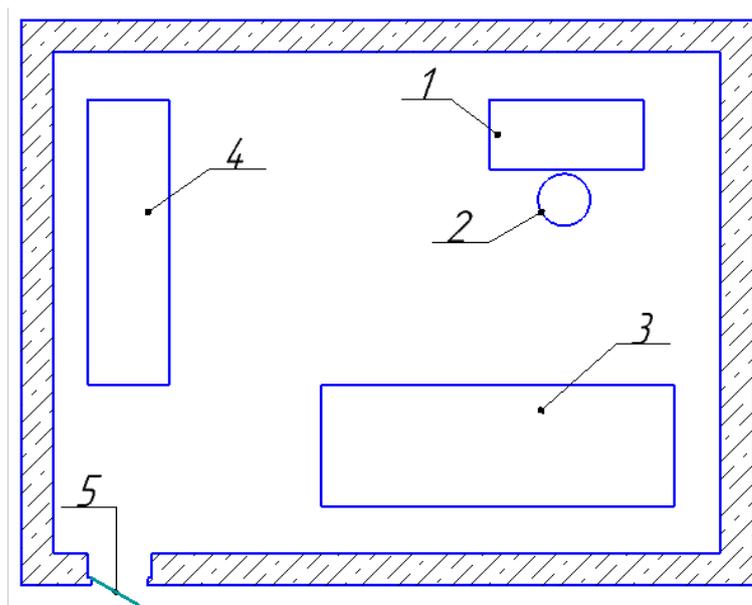
ОВПФ сборочных работ указаны в таблице 3» [18].

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 разрушившегося изделия, острые края; – повышенный уровень шума; – абразивная пыль, воздействие электрического тока

«Для данного сотрудника действуют следующие нормы техники безопасности:

- знакомство с инструкциями по безопасности;
- поддержание промышленной санитарии (содержание рабочего места в чистоте);
- соблюдение дисциплины на рабочем месте;
- правильное использование оборудования в соответствии с его назначением;
- в случае выявления поломки – необходимо информировать ремонтную группу» [19].



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

Рисунок 23 – Рабочее место для работ со сварочным аппаратом

«Ключевые обязанности сборщика включают в себя:

- сборку деталей или узлов конструкции в специальном приспособлении согласно чертежу или модели;
- проверку точности установки компонентов с использованием измерительных инструментов в соответствии с чертежами;
- предоставление комментариев для дальнейшей обработки данной детали.

В заключение данного раздела следует отметить, что выполнение всего спектра мероприятий и мер, разработанных для данных ОВПФ, позволит практически полностью защитить работников во время осуществления технологического процесса» [13].

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе рассмотрена роль и разновидности выпускных систем двигателей внутреннего сгорания. Основной задачей проекта являлось разработать и произвести расчет системы выпуска для гоночного автомобиля класса «Формула Студент», совместимую с двигателем КТМ 390 и соответствующую требованиям международных регламентов этого соревнования.

В процессе работы были освещены основные теоретические основы проектирования выпускных систем для транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания. Проведен анализ существующих решений, применяемых зарубежными командами в конструкциях выпускных систем для аналогичных гоночных болидов.

Создана трехмерная модель выпускного коллектора для автомобиля «Формула Студент», выполнено моделирование потоков выхлопных газов внутри коллектора. Результаты показали, что в разработанной конструкции отсутствуют завихрения и турбулентности, что способствует повышению эффективности выхлопа.

Разработанная система выпуска была установлена на двигатель КТМ 390 и протестирована на стенде. В ходе испытаний на двигатель была установлена система впуска с рестриктором. Полученные данные свидетельствуют о том, что максимальная мощность двигателя (52 л.с.) достигается при частоте вращения коленчатого вала около 9 000, а максимальный крутящий момент (48 Нм) – при примерно 8500.

Таким образом, цель данной работы, которая заключалась в создании выпускной системы для гоночного автомобиля класса «Формула Студент», которая бы соответствовала требованиям регламента соревнований и превосходила по характеристикам конструкции команд-конкурентов, была выполнена. Все основные задачи решены.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Автомобильные выхлопные системы [Электронный ресурс] : URL: <http://www.poiskavtouslug.ru/tehnicheskoe-obsluzhivanie/avtomobilnye-vyhlopnye-sistemy.html> (дата обращения: 18.11.2024).
2. Вибе, И.И. Теория двигателей внутреннего сгорания [Текст]: Конспект лекции / И.И.Вибе - Челябинск: ЧПИ, 1974. – 252 с.
3. Выпуск [Электронный ресурс] : URL: <http://www.baumanracing.ru/?p=8447#more-8447> (дата обращения: 10.03.2025).
4. Выхлопная система [Электронный ресурс] : URL: <http://www.avtika.ru/qa/393-vykhlopnaja-sistema> (дата обращения: 08.05.2025).
5. Вырубов, Д. Н. Двигатели внутреннего сгорания: теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст]: учеб. для вузов 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.
6. Доводка выхлопной системы атмосферных ДВС [Электронный ресурс]: URL: https://azlk-team.ru/articles/stati_s_clubazlknet/dovodka_vykhlopnoj_sistemy_atmosfernykh_dvs/ (дата обращения: 08.02.2025).
7. 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.
8. Модернизация системы выпуска отработавших газов [Электронный ресурс] : URL: <http://rajero.us/repair/107.shtml> (дата обращения: 08.05.2025).
9. Попык, К. Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей [Текст]: учебник / К. Г. Попык. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - Москва: Высш. шк., 1970. – 326 с.
10. Регламент международных соревнований 2022 Formula SAE® Rules.

11. 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.
12. Ceramic coating of exhaust systems in motor racing [Электронный ресурс] : URL: <http://metallspritztechnik.de/?loc=auspuff-keramik-beschichtung&u=22&lang=en> (дата обращения: 07.09.2024).
13. DALHOUSIE FORMULA SAE [Электронный ресурс] : URL: <https://blogs.dal.ca/formulaSAE/2012/03/27/few-powertrain-updates/> (дата обращения: 02.06.2025).
14. 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://scihub.io/http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X96900851> (дата обращения: 02.06.2025).
15. Exhaust Systems – Выхлопные системы [Электронный ресурс]: URL: http://ideal-plm.ru/flowmaster/exhaust_systems.html/ (дата обращения: 01.10.2024).
16. Formula Student [Электронный ресурс] : URL: <https://fsoulu.wordpress.com/> (дата обращения: 27.03.2025).
17. Gopaal, MMM Kumara Varma, Dr L Suresh Kumar Exhaust Manifold Design – FEA Approach [электронный ресурс] / Gopaal // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume17. - № 10. 2014. -URL: http://www.ijettjournal.org/volume-17/number-10/IJETT_V17P295.pdf
18. Graham Bell A. Performance Tuning in Theory and Practice Four Strokes [Текст] / A. Graham Bell. Haynes Publishing Group, 1981. - 252 p.
19. MUR Motorsports Newsletter (Sep 14) [электронный ресурс]: URL: <http://formulasae.eng.unimelb.edu.au/content/mur-motorsports-newsletter-sep-14> (дата обращения: 13.03.2025).

20. SolidWorks) [электронный ресурс]: URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> (дата обращения: 01.05.2025).

21. 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

22. 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: 12.05.2025).